



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

## TESTOVACÍ STAND PRO ŘÍDICÍ JEDNOTKY DC MOTORŮ

TEST STAND FOR DC MOTOR CONTROL UNITS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Procházka

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Najman

BRNO 2021

# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student:	<b>Jan Procházka</b>
Studijní program:	Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor:	Mechatronika
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jan Najman</b>
Akademický rok:	2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Testovací stand pro řídicí jednotky DC motorů

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Řízení elektrických pohonů je jednou z nejběžnějších úloh v mechatronice. Pro vývoj, úspěšné naladění regulátoru a následné otestování řídicí jednotky je pak v některých případech výhodné provádět testy na pohonech, které nejsou zabudovány do finálního zařízení. V případě chyby v návrhu pak nehrozí poškození celého stroje.

Cílem této práce je tedy návrh a realizace testovacího standu pro řídicí jednotky DC motorů. Tento stand by měl kromě různých variant motorů disponovat vhodnou výkonovou elektronikou, senzory a možnostmi jednoduchého připojení a testování většího počtu řídicích jednotek současně.

### Cíle bakalářské práce:

1. Vyberte vhodné komponenty pro testovací stand (motory, výkonová elektronika, senzory, ...).
2. Otestujte základní funkcionalitu vybraných komponent a vytvořte návrh standu umožňující testování většího množství řídicích jednotek na jedné sběrnici.
3. Sestavte kompletní testovací stand a vytvořte ukázkové úlohy s využitím více řídicích jednotek současně.

### Seznam doporučené literatury:

SKALICKÝ, Jiří. Elektrické servopohony. 2. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 2001, 86 s. ISBN 80-214-1978-4.

SKALICKÝ, Jiří. Teorie řízení I. Brno: VUT FEKT, 2002, 98 s. ISBN 80-214-2112-6.

VALÁŠEK, Michael. Mechatronika. Praha: České vysoké učení technické, 1995. ISBN 80-01-01276-X.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a sestavením testovacího standu pro testování řídicích jednotek DC motorů s možností použití více jednotek současně. Rešeršní část je věnována základnímu popisu stejnosměrných motorů a snímačů. Praktická část je zaměřena na testování komponent, následné sestavení mechanismů, které slouží k otestování různých variant řízení motorů a ke každému mechanismu byl vytvořen program v prostředí SIMULINK. Součástí práce je seznam použitých součástek, skript s programy pro každý mechanismus a soubor s popisem vodičů a návodem na řešení základních poruch.

## Summary

Main focus of this bachelor thesis is construction of testing stand for master-slave driver units with possibility of using more slave units at the same time. Theoretical part is about DC engines and sensors. Practical part is about testing components, construction of mechanisms, which are mented to test different variants of controlling DC engines. For every mechanism is created program in SIMULINK. With thesis is included list of used components, script with subsystem for each mechanism and file with wire description and basic troubleshoot.

## Klíčová slova

Testovací stand, DC motory, snímače

## Keywords

Testing stand, DC motors, sensors

PROCHÁZKA, Jan. *Testovací stand pro řídicí jednotky DC motorů*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132346>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. Vedoucí práce Jan Najman.

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *TESTOVACÍ STAND PRO ŘÍDICÍ JEDNOTKY DC MOTORŮ* vytvořil sám pod vedením Ing. Jana Najmana, s použitím materiálů uvedených v seznamu literatury.

**Jan Procházka**

v Brně dne .....

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Najmanovi za cenné návrhy a připomínky při vypracování bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval přátelům a rodině za podporu během realizace této práce.

---

# Obsah

<b>1.Úvod .....</b>	<b>8</b>
<b>2.Rešeršní část .....</b>	<b>9</b>
2.1 Stejnosměrné motory .....	9
2.1.1 Kartáčový stejnosměrný motor .....	9
2.1.2 Bezkartáčový motor (BLDC) .....	11
2.1.3 Krokový motor .....	12
2.1.4 Servomotor .....	13
2.2 Snímače .....	14
2.2.1 Snímače polohy .....	14
2.2.3 Koncové snímače .....	18
2.3 Výkonová elektronika .....	20
2.5 Možnosti připojení benche .....	22
<b>3.Řešení a výsledky .....</b>	<b>23</b>
3.1. Návrh zařízení .....	23
3.1.1. Popis základních komponent: .....	23
3.1.2 Základní rozvržení benche: .....	25
3.1.3 Popis mechanismů.....	26
3.2.Programovací část .....	31
3.2.1. Popis testovacích úloh.....	32
3.2.2. Popis komplexních úloh.....	36
<b>4.Závěr .....</b>	<b>38</b>
<b>5. Zdroje.....</b>	<b>39</b>
<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>41</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>42</b>
<b>Seznam příloh.....</b>	<b>43</b>

---

# 1. Úvod

Při mnoha průmyslových aplikacích jsou využívány stejnosměrné motory. Proto je potřeba testovat řídicí jednotky bez hotového produktu, nebo pokud bychom nechtěli produkt ve fázi vývoje poškodit. Řídicí jednotky se intenzivně testují už v rámci vývoje nového produktu, aby se včas odhalily problémy. Na testeru chceme testovat více jednotek současně, protože v mnoha moderních výrobcích se řídí více pohonů, které jsou spolu vzájemně provázány. Chceme mít možnost testovat různé varianty pohonů a senzorů, které jsou v praxi nedílnou součástí mechatronických systémů.

První částí je rešeršní studie, kde je rozebrána základní konstrukce stejnosměrných motorů a často používaných snímačů. V této části je rozebrána vhodnost jednotlivých motorů a snímačů při použití na benchi.

Druhá část je praktická, která se zabývá konstrukcí benche, testováním součástek a popisem vytvořených programů. Pro každý mechanismus je vytvořen samostatný program, také jsou vytvořeny dvě úlohy s použitím více mechanismů současně.



## 2.Rešeršní část

### 2.1 Stejnoseměrné motory

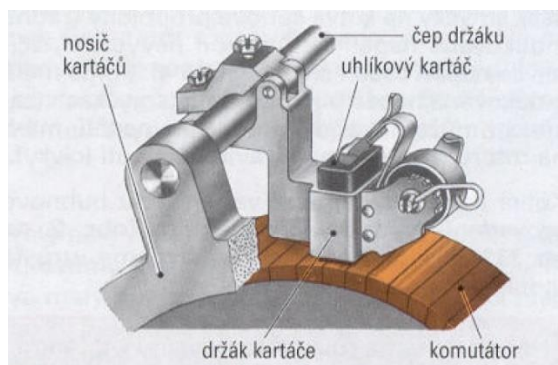
Stejnoseměrný motor je elektrický točivý stroj, který lze použít k přeměně elektrické energie na točivou mechanickou, i k mechanické na elektrickou. Motor se skládá ze dvou hlavních částí, jedná se o rotor a stator.

#### 2.1.1 Kartáčový stejnoseměrný motor

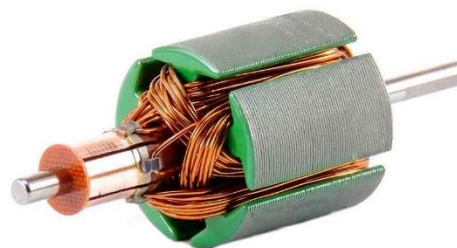
Výhodou takového motoru je vysoký záběrný točivý moment a také jeho snadná regulovatelnost. Velké stejnoseměrné motory se již téměř nepoužívají. Malé se používají především v automobilovém průmyslu, nový automobil jich má desítky. Najdou také využití například v levnějším ručním nářadí nebo v modelářství. [8]

#### Rotor

Rotor je jedna ze dvou hlavních součástí stejnoseměrného motoru. Musí být přesně vyvážen, aby nevznikaly nežádoucí vibrace, které mohou způsobit snížení životnosti jak motoru, tak stroje poháněného motorem. Rotor se skládá z jádra a párů navinutých cívek. V tomto případě je rotor pevně spojený s kotvou, která se stará o přepínání cívek v rotoru. Elektrický proud se přivádí do kotvy, kde se pomocí uhlíkových kartáčů, které kloužou po kontaktech na komutátoru, přivádí napětí do potřebných cívek, viz Obr.2.1. Ovšem tohle řešení má nedostatky, a to v podobě opotřebení kartáčů a vzniku rušení při přechodu na další cívku. Kvůli eliminaci těchto problémů je lepší na rotor dostat co nejvíce párů cívek, aby došlo k vyhlazení charakteristiky. Také jádro je vyrobeno z tenkých plechů, z důvodu eliminace vlivů vířivých proudů, které se indukují v rotoru, viz Obr.2.2. [7]



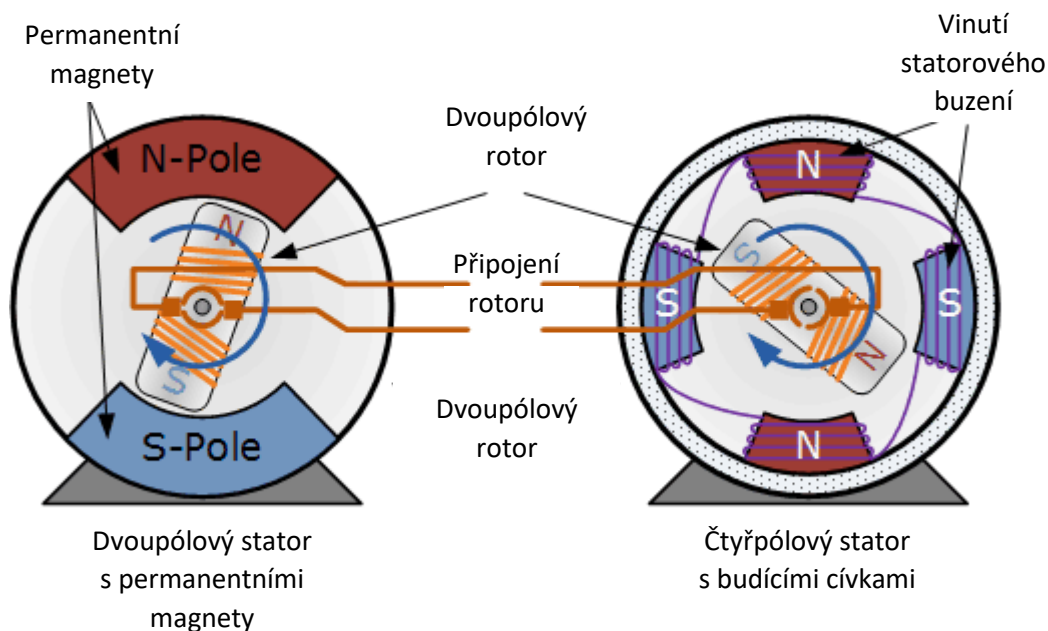
Obr.2.1 Komutátor [7]



Obr.2.2 Cívky na jádře rotoru [14]

### Stator

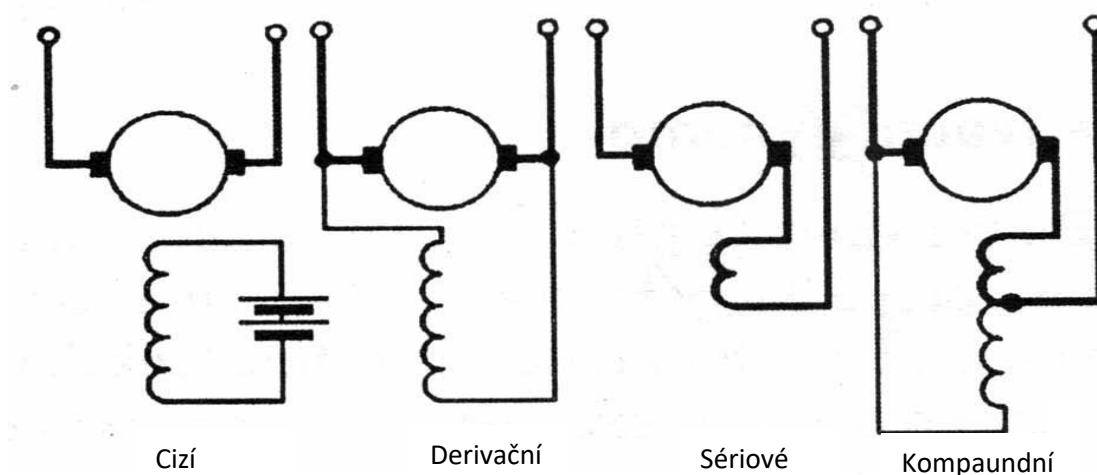
Stator je druhá z hlavních částí stejnosměrného motoru. Jedná se o obal motoru, který je osazen budícím obvodem, což mohou být permanentními magnety, případně budící cívky viz Obr.2.3. Vyšším počtem statorových cívek se dá dále zlepšit charakteristika motorů v porovnání proti permanentním magnetům, ovšem tohle řešení zvyšuje cenu motoru. [11]



Obr.2.3 Rozdíl mezi buzení permanentními magnety a cívkami [3]

### Možnosti zapojení buzení

Buzení stejnosměrných kartáčových motorů se dělí na dvě hlavní kategorie, a to vlastní a cizí. Vlastní buzení je takové, kdy je rotor přes kotvu propojen se statorem a dále se dělí na sériové, derivační a kompaundní buzení. Cizí buzení je takové, které je připojeno na jiný zdroj napájení než vinutí rotorové. [11]



Obr. 2.4 Možná zapojení buzení motoru [13]

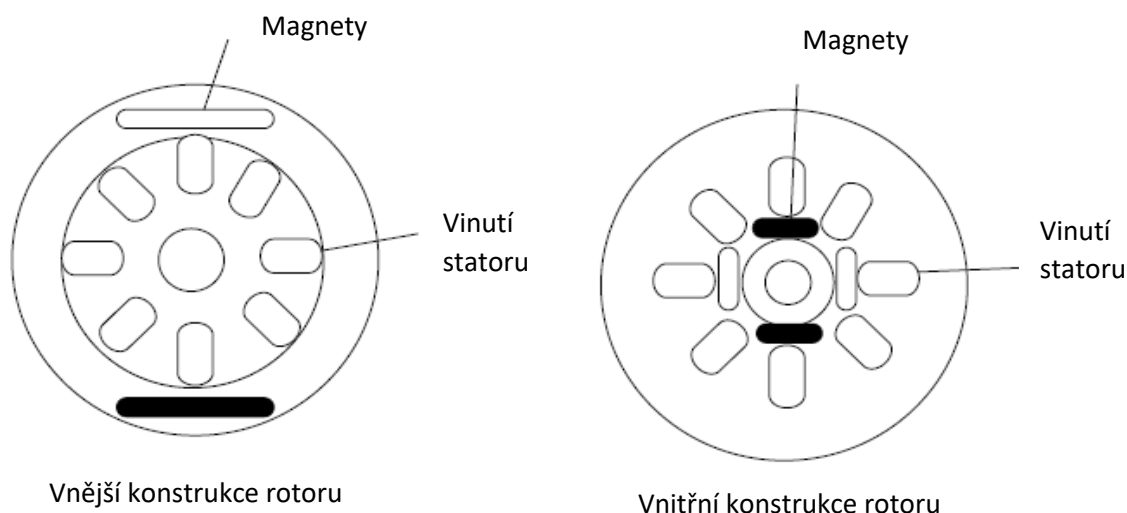
### 2.1.2 Bezkartáčový motor (BLDC)

Jedná se o bezkartáčovou variantu stejnosměrného motoru, skládá se z rotoru a statoru. Tohle řešení postupně začíná nahrazovat kartáčové motory, a to z důvodu levné produkce silných neodymových magnetů a stále levnější produkce polovodičových součástek použitých v budícím obvodu tohoto motoru.

BLDC motory mají výhodu ve větší mechanické odolnosti, protože odpadá opotřebení kartáčů, větší účinnosti, protože odpadá přechodový odpor mezi kartáči a kluznou plochou komutátoru a také nižší hlučnosti. Často je jejich životnost limitována životností použitých ložisek. [6,17]

#### Rotor

Rotor je osazen pouze permanentními magnety, tím pádem odpadá nutnost kotvy a výrazně se zvyšuje mechanická odolnost celého motoru. Rotor může být realizován jako vnitřní uvnitř statoru nebo jako vnější viz Obr. 2.5.



Obr.2.5 Možné konstrukce statoru BLDC motoru [7]

#### Stator

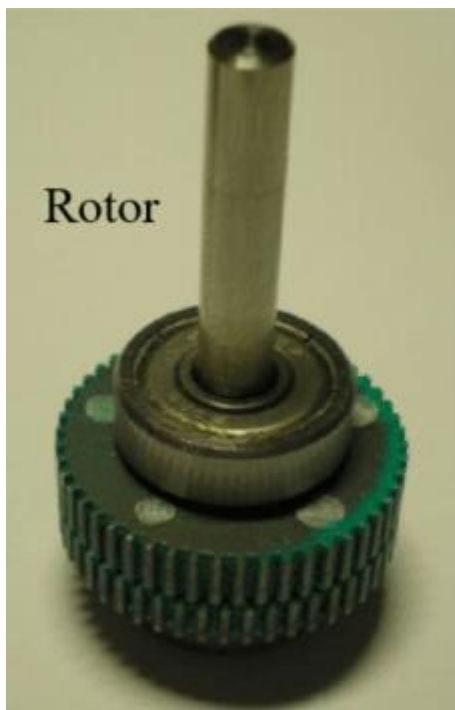
Stator je tvořen cívkami, které kontroluje řídicí jednotka. Posílá do nich pulsy tak, aby se vytvořilo způsobem ať je tvořeno točivé magnetické pole. Rotor se snaží udržet si konstantní polohu vůči točivému magnetickému poli, této poloze se říká zátěžný úhel a udává se ve stupních, které značí posun vůči statorovému magnetickému poli.

#### Budící obvod

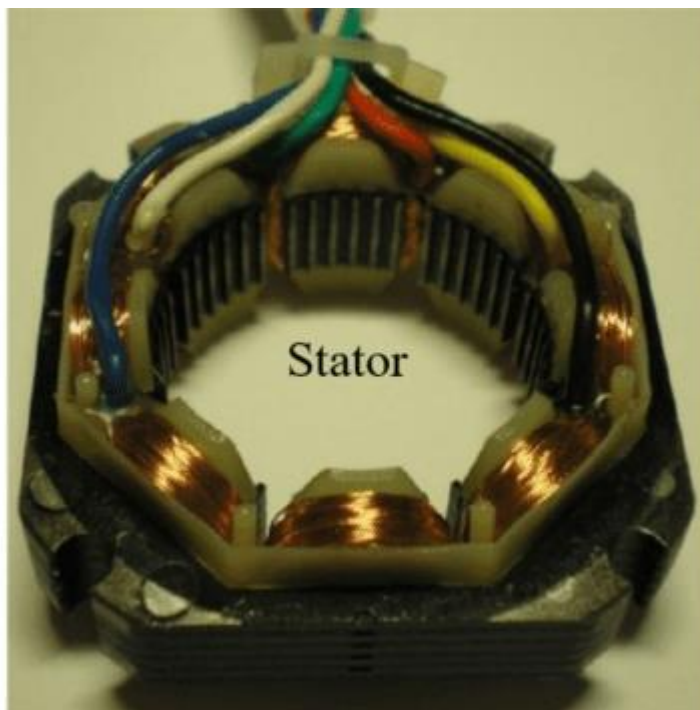
Budící obvod je tvořen řídicí jednotkou, která posílá pulsy do jednotlivých cívek na statoru. Tohle řízení se provádí pomocí senzoru umístěného na rotoru, který snímá, jak je rotor natočen. Tím pádem obvod přesně ví, kterou cívku sepnout, aby se motor mohl začít otáčet požadovaným směrem. V některých motorech je již integrovaný, jiné motory musí budící obvod použít externí.

### 2.1.3 Krokový motor

Krokový motor je typ stejnosměrného bezkartáčového motoru, skládá se z rotoru a statoru. Toto řešení je poněkud odlišné od BLDC. Konstrukčně je velice podobný BLDC motoru, ovšem rozdíl přichází v jeho řízení. Motor se dá řídit po jednotlivých krocích, což je nesporná výhoda v určitých aplikacích. Také je velmi jednoduché jeho použití v regulátorech s otevřenou smyčkou. [6,18]



Obr.2.6 Vzájemně posunuté magnety [5]



Obr.2.7 Cívky statoru [5]

#### **Rotor**

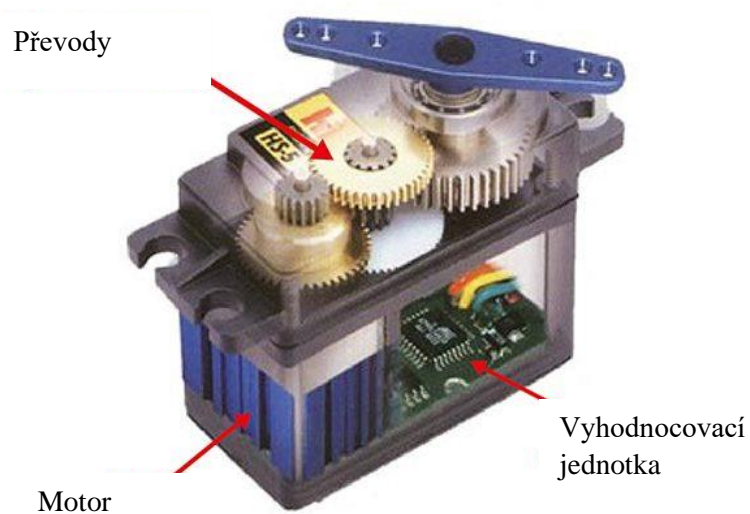
Rotor nabývá podoby drážkovaného válečku, kde jsou vzájemně vůči sobě posunuté magnetické póly viz Obr.2.6.

#### **Stator**

Stator je osazen pouze cívkami viz. Obr.2.7. Jejich řízení je na externí jednotce, kterou volí uživatel.

### 2.1.4 Servomotor

Jedná se o stejnosměrný motor kombinovaný s převodovkou a elektronikou, která sama vyhodnocuje chybu od chtěné hodnoty. Ovšem elektrický motor lze nahradit např. pneumotorem nebo hydrotorem. U nenáročných aplikací dokáže servomotor nahradit krokový motor, což je vítané z toho důvodu, že je mnohem jednodušší na řízení, než motor krokový. Ovšem jeho nevýhodou je statický odpor, který klade převodovka, plus kvůli použití ozubených kol vzniká mrtvá zóna mezi zuby, která se projeví při změně směru otáčení. Často servomotor nemá možnost celé otáčky, tzn. operuje v určité oblasti. Používá se tam, kde je potřeba regulovat na polohu, kde není potřeba rozsah celé otáčky. Příkladem použití může být přepínání výdechů klimatizace u moderní automatické klimatizace v automobilech. [6,1]



Obr. 2.8 Ukázka uspořádání servomotoru [12]

## 2.2 Snímače

### 2.2.1 Snímače polohy

Snímače polohy jsou důležité, když je potřeba přesně vědět, kde se mechanismus nachází. Například z důvodu například regulace na určitou polohu, počítání kusů, bezpečnosti obsluhy, spolupráci více mechanismů. Snímače polohy se dají dělit mnoha způsoby. Nejčastější dělení je na analogové a digitální nebo na absolutní a relativní. [9]

#### Absolutní

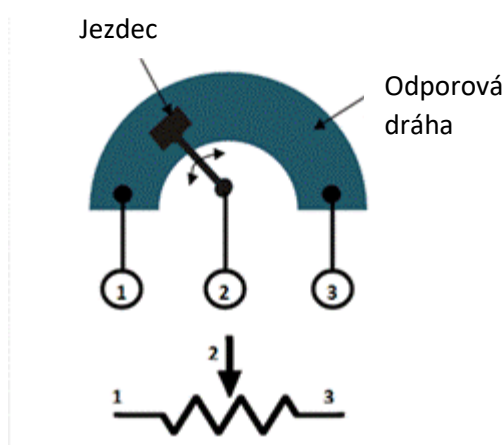
Výhodou absolutních snímačů je, že mechanismus ihned po zapnutí ví, kde přesně se nachází, nepotřebuje další snímač pro zjištění, nulové polohy. Tím pádem odpadá nutnost použití koncových snímačů, ovšem kvůli bezpečnosti se koncové snímače raději používají.

#### Relativní

Výhodou relativních snímačů je jejich jednodušší konstrukce a nižší výrobní cena. Hlavním nedostatkem je, že při spuštění nezná svou absolutní polohu. Nulová poloha pro tento typ snímačů je tam, kde je spuštěn. Ovšem tyto nedostatky se musí kompenzovat nějakým způsobem v řídicí jednotce. Například u jednobáňového enkodéru musí jednotka přičítat nebo odčítat polohu v závislosti na směrovém výstupu.

#### Odporové

Odporové snímače jsou nejjednodušším typem absolutních snímačů. Fungují na principu jezdec, který jezdí po odporové dráze viz Obr 2.9. Průběh může být lineární nebo nelineární. Z nelineárních se často používá logaritmický průběh. Pokud se vhodně zapojí, vznikne nám odporový dělič. Budeme se zabývat potenciometry s vyšší životností, potenciometry s uhlíkovou odporovou cestou nemají vysokou životnost, proto nejsou jako snímače polohy vhodné. Z důvodu zvýšení životnosti se používají například odporové dráhy z vodivého plastu. [3]



Obr.2.9 Jezdec po odporové dráze [3]



### Rotační

Rotační potenciometry se používají tam, kde potřebujeme znát přesné natočení určitého mechanismu. Rotační potenciometry se dají řetězit za sebe, tzn. na jedné hřídelce je více potenciometrů, tohle řešení je výhodné z důvodu zvýšené bezpečnosti a spolehlivosti. V případě selhání prvního potenciometru může stroj operovat pomocí druhého.

### Translační

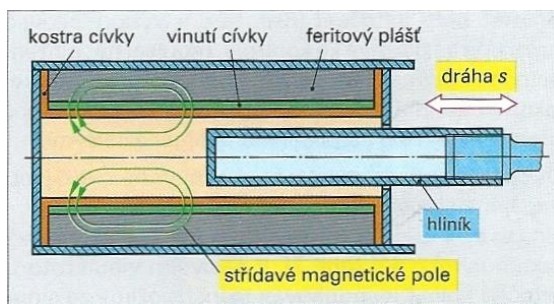
Translační neboli tahové potenciometry se používají tam, kde potřebujeme zjistit přesnou polohu. Ovšem toto řešení není příliš praktické pro zjišťování větších vzdáleností. V takovém případě je výhodnější použít například enkodér.

### Indukční

Indukční snímače využívají změny vlastností cívky v závislosti na poloze jádra. Indukční snímače se dělí na FLDT (Fast Linear Displacement Transducer), LVDT (Linear Variable Differential Transformer) a Proximitní. Poslední typ bude probrán v kapitole koncových snímačů. [9]

### FLDT

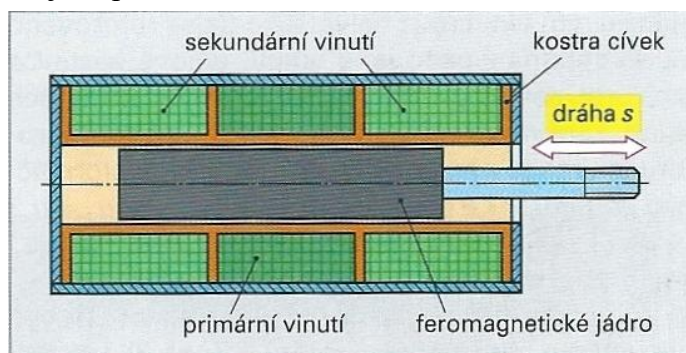
FLDT neboli česky Lineární snímač je tvořen cívkou válcového tvaru s feritovým pláštěm. Do cívky se zasouvá hliníkové jádro, které je pevně spojeno se sledovaným objektem. Magnetické pole tvořené cívkou indukuje vířivé proudy v jádře, které pole cívky zeslabují, tím pádem se změní celková indukčnost viz Obr.2.10. FLDT snímače také nejsou příliš praktické na snímání delších drah. [9]



Obr.2.10 Princip FLDT snímače [9]

**LVDT**

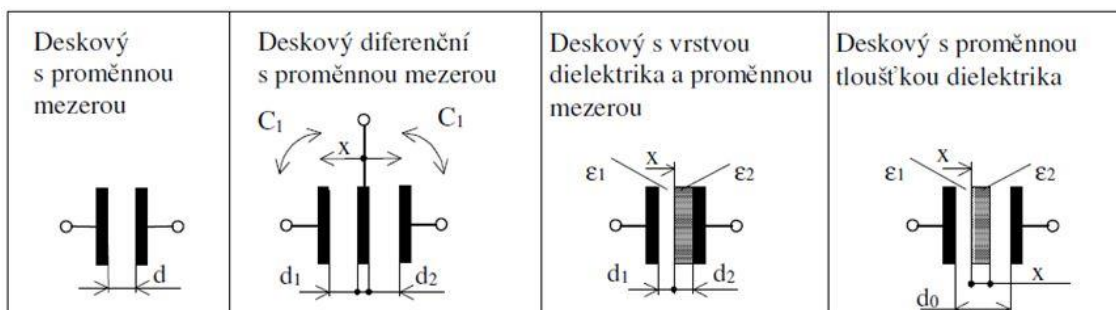
LVDT neboli česky Lineární rozdílový transformátor. Primární i obě cívky sekundárního vinutí jsou připojeny na spojené kostře. Dvě cívky na sekundárním vinutí jsou zapojeny v protifázi. Výstupní hodnota je rozdíl v napětí mezi cívkami. Pokud je jádro ve střední Tzn. nulové pozici, je napětí mezi cívkami nulové. [9]



Obr.2.11 Princip LVDT snímače [9]

**Kapacitní snímače**

Kapacitní snímače fungují na principu kondenzátoru. Se zvětšující se vzdáleností mezi deskami kapacita roste. Kapacitní snímač je zapojen do rezonančního obvodu, který se rozvažuje s měnící se kapacitou, a tím pádem se sledovaná hodnota převede na napětí, které se měří snáze než kapacita. Kapacitní snímače mají výhodu oproti indukčním snímačům v tom, že reagují na jakýkoliv materiál, kdežto indukční snímače reagují pouze na kov. [9,10]

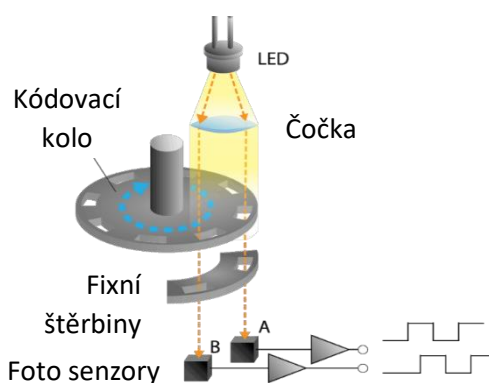


Obr.2.12. Ukázka konstrukce kapacitního snímače [10]



## Enkodéry

Enkodéry se dají dělit podle tří hlavních kritérií, a ty jsou podle typu snímání, podle jejich výstupu a podle pohybu, který koná. Výstup může být inkrementální, kde se poloha počítá od místa kde je zrovna mechanismus spuštěn nebo absolutní, kdy enkodér přesně ví, kde se nachází ihned po spuštění. Dělení podle typu snímání se dělí na dvě hlavní skupiny, a to jsou optické a magnetické. U optických se používá senzor a diodu s optickým čidlem. Optický enkodér funguje tak, že zdroj světla prochází skrz kotouč s otvory a následně pak skrz stacionární štěrby viz Obr.2.13. Vzniká nám fázově posunutý dvoukanálový signál, podle kterého pozná řídicí jednotka směr otáčení. U magnetických se používá kotouček se stálými magnety, které jsou snímány hallovými sondami. [2]



Obr. 2.13 Princip dvoukanálového optického enkodéru [2]

### 2.2.3 Koncové snímače

Koncové snímače se používají například na zjištění nulové polohy nebo jako bezpečnostní čidla které chrání mechanismus, když některá jeho část selže, případně špatně vyhodnotí vstup a mohlo by dojít k jeho poškození. Jelikož koncové snímače mají výstupy pouze binární výstup tak práce s nimi je velice jednoduchá. [9]

#### Mechanické

Mechanický typ je nejjednodušším typem koncového snímače. Jeho nevýhodou je mechanické opotřebení, které vzniká jak únavou materiálu, tak ojiskřením kontaktů při použití vyššího napětí. Také musí být použita speciální konstrukce, která zabrání tomu, aby mechanismus měl mezi polohu a vždy spolehlivě přeskočil do požadované polohy. Jejich spolehlivá aplikace v malém měřítku by byla náročná, z toho důvodu nejsou na benchi použity.

#### Kapacitní

Kapacitní typ je složitější konstrukce, ovšem odpadá mechanické opotřebení. Z důvodu absence jakýchkoliv pohybujících se částí je velice jednoduché vyrobit snímač odolný proti vodě a prachu. Také se dá použít na snímání jakéhokoliv materiálu na rozdíl od indukčních snímačů které snímají pouze kov. Kapacitní snímače jsou bezkontaktní. Buď mají pevně danou vzdálenost snímání, nebo ji lze nastavit přímo na snímači. Tato vzdálenost se pohybuje v řádech milimetrů. Kapacitní snímače pro použití na benchi jsou vhodnější než mechanické, ovšem jsou použity indukční, protože byly již dostupné v mechlabu.



Obr. 2.14 Kapacitní snímač

#### Indukční

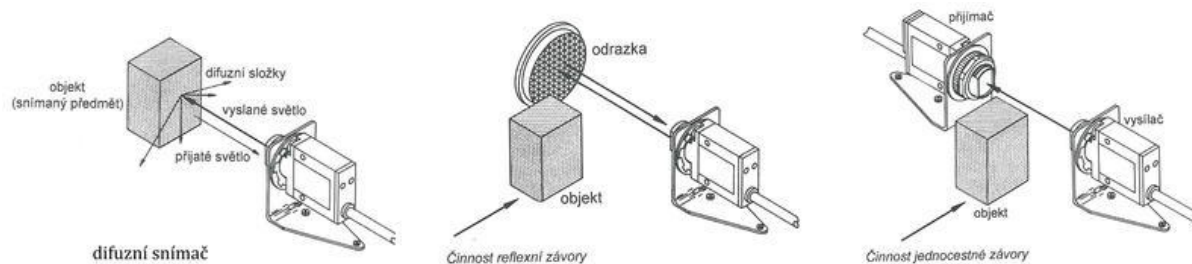
U indukčních snímačů taktéž odpadá mechanické opotřebení, což je velká výhoda. Stále platí výhoda jednoduché výroby s krytím proti prachu a vodě. Tenhle typ snímače je vhodný, když potřebujeme před snímačem pohybovat jinými materiály a on má reagovat pouze na kovové části. Například když se obsluha nahne pro nějakou součást a zavadí o snímač, nic se nestane, kdežto kapacitní by tento krok zaznamenal. Stejně jako v případě snímačů kapacitních jsou tyto snímače bezkontaktní a mají danou vzdálenost na kterou snímají. Indukční snímače byly zvolen pro oba mechanismy, protože již byly dostupné v mechlabu.

### Hallovy sondy

Výhody jsou stejné jako u indukčních snímačů, s tím rozdílem že, hallovy sondy reagují pouze na magnetické pole. Tím pádem se mohou i kovové části pohybovat před snímačem, aniž by je zaznamenal. Ovšem nevýhoda spočívá v tom, že někde musí být umístěn stálý magnet, který může chytat kovové nečistoty, a ty se pak mohou uvolnit v nevhodnou dobu a může dojít k poškození stroje. Hallovy sondy by byly taktéž vhodné, ovšem by se musely pořídit permanentní magnety. Je jednodušší použít indukční snímač v tomto případě.

### Optické závory

Optické závory viz Obr.2.15. se využívají hodně pro ochranu před vnějším zásahem, když například osoba vstoupí do nebezpečného prostoru. Jejich výhodou je, že světelný paprsek dokáže vytvořit i několik metrů dlouhou zábranu. Velkou nevýhodou je jejich zhoršená funkce ve vysoce prašném prostředí. Také jsou náchylné na natočení, když se omylem pohne s vysílačem nebo přijímačem, sensor nefunguje, je potřeba senzory znovu nastavit. [9]



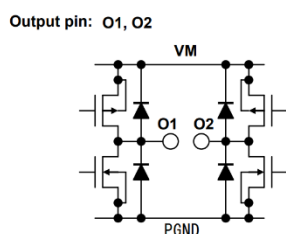
Obr.2.15. Typy optických závor [9]

## 2.3 Výkonová elektronika

Hlavním úkolem výkonové elektroniky je zpracovat signál jdoucí z řídicí jednotky na změnu otáček. Tímto signálem může být změna napětí, takové regulaci se říká analogová. Nebo změnou střídý u PWM regulace. Tuto změnu realizuje H-můstek.

H-můstek je obvod sestaven z tranzistorů, jehož úkolem je řídit stejnosměrné motory, viz Obr.2.16. Ve většině případů se prodávají integrované obvody, které v jednom pouzdře mají dva H-můstky.

Například u jednotky Pololu-713 viz Obr.2.17. použité v této práci je použit integrovaný obvod TB6612FNG. Velkými výhodami těchto integrovaných obvodů jsou malé rozměry, nízká cena a možnost napájení z USB portů, protože vyžadují napájení 5V.



Obr.2.16. Vnitřní zapojení H-můstku[4]

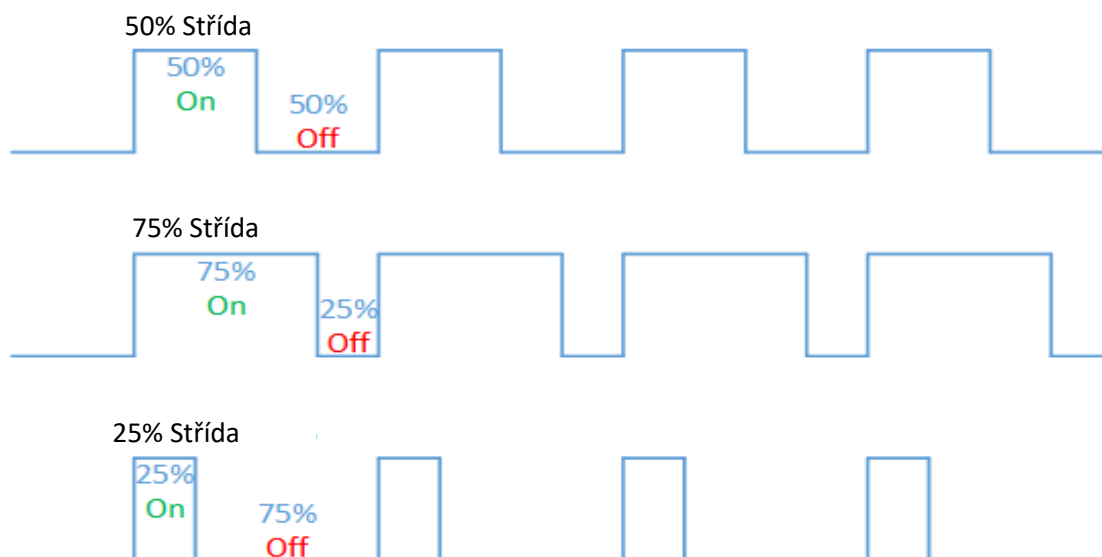
Obr.2.17. Jednotka Pololu-713[4]

### Spojité

Regulace pomocí změny napětí je méně používaná v komplexnějších úlohách. A to kvůli náchylnosti na úbytky napětí na vodičích. Ovšem je jednodušší a levnější. Ve své podstatě stačí pouze napěťový dělič s potenciometrem. Z důvodu menší rozšířenosti je na benchi pouze jeden analogový regulátor.

### PWM

PWM je zkratka pro Pulse Width Modulation neboli česky pulsně šířková modulace. Do jednotky jde signál o určité frekvenci. Každá jednotka má udávanou specifikaci výrobcem, ale obvykle je to kolem 20kHz. Řídící jednotka ovládá střidu, což je vlastně procentuální čas, jakou dobu je výstup v HI poloze v každém pulsu. Například když je střída 20 % při frekvenci 1Hz tak to znamená že 0.2s bude výstup v HI stavu a 0.8s bude v LO stavu. Tyto stavy se mezi sebou střídají. Z důvodu velké rozšířenosti jsou zbylé mechanismy řízeny pomocí pulsně šířkové modulace. [19]



Obr.2.18. Vizualizace PWM průběhu [19]

## 2.5. Možnosti připojení benche

Tato kapitola bude stručně pojednávat o dvou možnostech řízení mechanismů, na které byl mechanismus připraven.

### **Karta Humusoft MF624**

Tato rozšiřovací karta je zapojena do PCI-E portu v osobním počítači a její hlavní úlohou je v reálném čase zpracovávat vstup/výstupní signály, které se poté mohou být zpracovány v prostředí SIMULINK v kombinaci s knihovnou SIMULINK DESKTOP REAL TIME. Karta Humusoft má široké využití, dokáže zpracovávat jak analogové, tak digitální signály. Dále má také speciální výstupy v podobě čítačů/časovačů. Ze vstupů to jsou vstupy na enkodér. Operuje na pěti voltové logice. [15]

### **Standalone jednotky**

Bench je připraven také na připojení řídicích jednotek s konfigurací master-slave. Je na ně nachystána napájecí větev 24V společně s kabely na sériovou komunikaci. Bench je připraven na 5 slave jednotek s jednou master, tím pádem na každý mechanismus by připadla jedna slave jednotka.

## 3.Řešení a výsledky

### 3.1. Návrh zařízení

Následující kapitola se bude zabývat samotnou realizací benche, včetně popisu vytvořených programů.

#### 3.1.1. Popis základních komponent:

##### Motory:

Motory byly voleny tak, aby byly použity nejzákladnější typy motorů a současně aby byly kompatibilní se zamýšleným napájením. Dalším faktorem byly otáčky, které jsem si stanovil na maximální hodnotu 300ot/min, protože vyšší otáčky by byly nepraktické při testování mechanismů. Tyto základní parametry byly rozhodující u výběru motorů.

Název	Typ motoru	Napájecí napětí	Otáčky	Enkodér	Integ. driver	Max. Proud	Max. Kroucí moment	Úhel kroku
		[V]	[min <sup>-1</sup> ]	[puls/ot]		[mA]	[mNm]	[stupeň]
HN-27GMB-1525Y	Kartáčový	12	70	200	Ne	700	107	
28BYJ-48	Krokový	5	1	Ne	Ne		34,3	5,625/64*
FIT0441	BLDC	12	159	270	Ano	700	240	
FIT0520	Kartáčový	6	300	224,4	Ne	2700	353	

\*5,625 je úhel kroku motoru, 64 je převodový poměr integrované převodovky. Krok na hřídeli je 0,087 stupňů

Tabulka 3.1. Popis základních parametrů motorů

##### Výkonové jednotky:

Výkonové jednotky byly voleny po motorech, aby byly spolu kompatibilní. Takže hlavními parametry při výběru bylo napájecí napětí logické části, velikost spínaného napětí a typ řízení.

Název driveru	Napájecí napětí	Spínané napětí	Max počet motorů	Maximální pracovní proud	Maximální špičkový proud	kmitočet	Analog. vstup	Low logic	High logic
	[V]	[V]	-	[A]	[A]	[kHz]	[V]	[V]	[V]
Pololu-713	2,7-5,5	4,5-13,5	2	1	3	20-100	-	0,8	4
EM-241-C	10-35	10-35	1	10	15	-	0-5/0-10	1	4
FIT0441	12	12	1	0,7	0,7	20-30	-	0,7	4
ULN2003	5-12	5-12	1	0,5	0,5	100	-	0,9	2

Tabulka 3.2. Popis základních parametrů výkonových jednotek

**Senzory:**

Senzory byly voleny na základě potřeb mechanismů a podle toho, co se již nacházelo v mechlabu. Poté už bylo potřeba jen zvolit vhodné rozsahy a průběhy snímačů.

Typ snímače	Název	Typ	Rozsah	Průběh	Napájecí napětí	Max výkon	Jiné
-	-		[kΩ]	-	[V]	[W]	
Absolutní	POT2218P-50K	Rotační potenciometr	0-50	Lineární	5	2	max. 10 otáček
Absolutní	RS60112-100KAX2	Tahový potenciometr	0-100	Logaritmický	Max.10	0.1	Zdvojené cesty
Koncový	TL-W5MC1	Indukční koncový	nemá	Booleovský	12-24	3,6	2mm mezera max, NO*
Koncový	LJ12A3-4-Z/BX	Indukční koncový	nemá	Booleovský	6-36	10,80	4mm mezera max,NO*

\*NO-Normally Open

Tabulka 3.3. Popis základních parametrů snímačů



**3.1.2 Základní rozvržení benche:**

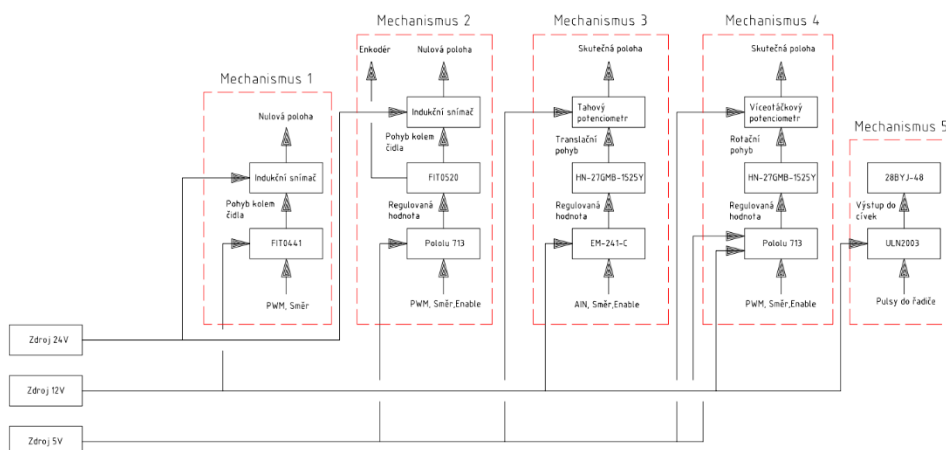
Testovací bench se skládá ze čtyř hlavních částí. První částí jsou samotné mechanismy s výkonovými jednotkami, druhou místo pro připojení standalone jednotek, třetí kabeláž pod benchem a poslední šuplík se zdroji.

Mechanismy jsou umístěny tak, aby zabíraly co nejmenší plochu, žlutě ohraničená oblast viz obr.3.2., aby bylo vše přehledné a aby nepřesahují příliš přes okraj. Současně si nezavazí a nevznikají nechtěné interference.

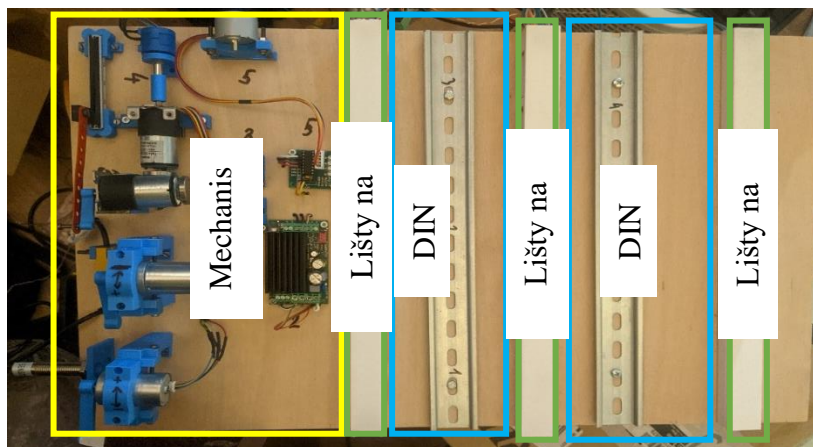
Ve druhé části jsou DIN lišty, modře ohraničená oblast s lištami na kabeláž, oranžově ohraničená část, která je vedena pod horní deskou benche.

Další část je pod deskou benche, kde se nachází pouze kabeláž. Kabeláž je spojena konektory, plus jsou rezervy pro případný další rozvoj benche. Kabely jsou zajištěny smršťovací bužírkou kvůli možnému rozpojení během transportu.

Šuplík se zdroji se nachází pod horní deskou, aby nebyl uživatelsky přístupný, protože je zde přivedeno 230V, až zde dochází k transformaci na 3 napěťové úrovně které, jsou použity.



Obr.3.1. Blokové schéma zapojení benche



Obr.3.2. Uspořádání testovacího benche

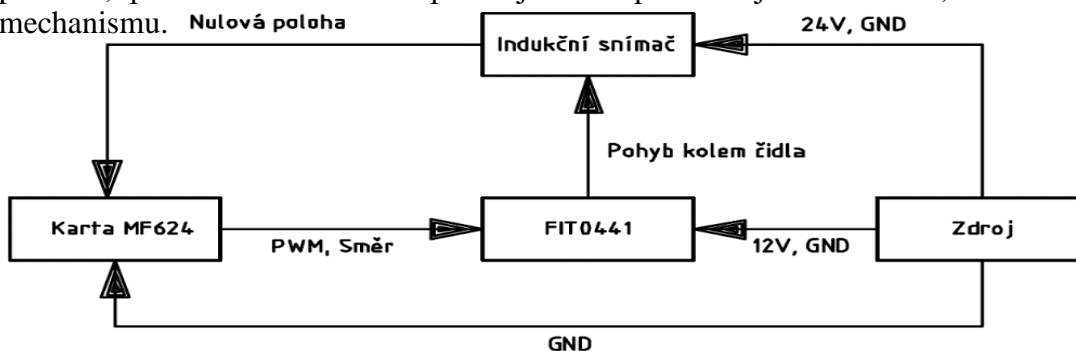
### 3.1.3 Popis mechanismů

Mechanismy byly navrženy tak, aby bylo možné je použít jako výukový materiál a současně, aby bench šel použít na otestování základní funkčnosti řídicích jednotek. U všech mechanismů bylo zvoleno řízení za pomoci simulinku a karty MF-624, protože jde rychle a jednoduše upravit program.

#### 1. Mechanismus

První mechanismus je BLDC motor řízený pulsně šířkovou modulací. Motor, výkonová jednotka a enkodér jsou integrovány v jednom pouzdře. Toto řešení je výhodné z hlediska úspory prostoru, ovšem v případě poškození se musí vyhodit celý systém. Mechanismus byl zamýšlen jako ukázka jednoduché PWM regulace s indikací nulové polohy.

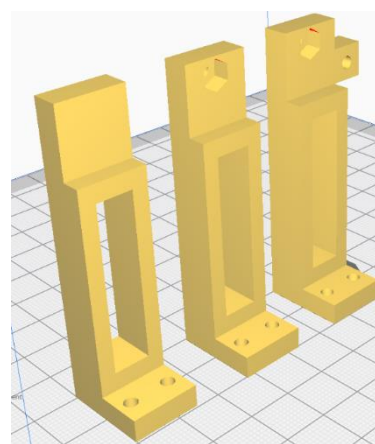
Mechanismu je postaven z celkem šesti částí. Levá noha, pravá noha, horní objímka motoru, spodní objímka motoru, packa s kovovou matickou a držák čidla viz. Obr.3.4. V první verzi nebyly nohy pevně spojeny s objímkami. Toto řešení se ukázalo jako neefektivní, protože mechanismus se neudržel na v nohách. Druhá verze tento problém odstranila, byly přidány aretační šrouby do nohou mechanismu a bylo přidáno zahloubení na šrouby v objímkách. I toto řešení mělo své nedostatky, při prudkých změnách směru se mechanismus pohnul, což je nežádoucí. Třetí verze vyřešila i tento problém, přidáním kontaktních ploch jak na spodní objímku motoru, tak na nohy mechanismu.



Obr.3.3. Blokové schéma mechanismu 1



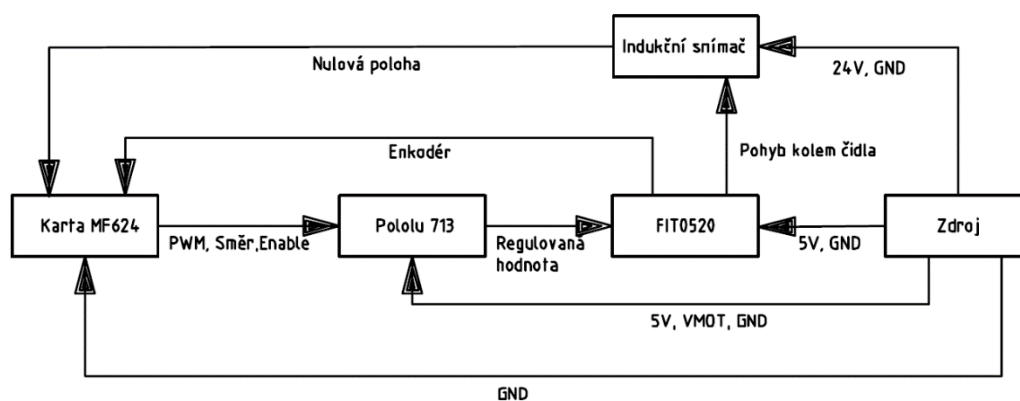
Obr.3.4. Konečná podoba mechanismu 1



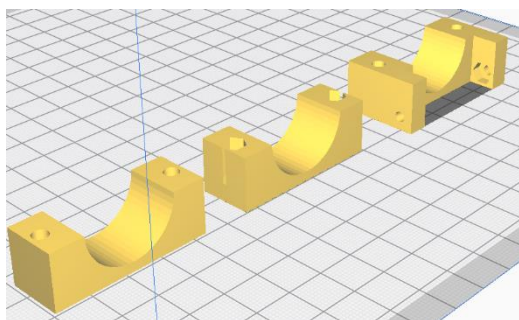
Obr. 3.5. Evoluce nohou

## 2. Mechanismus

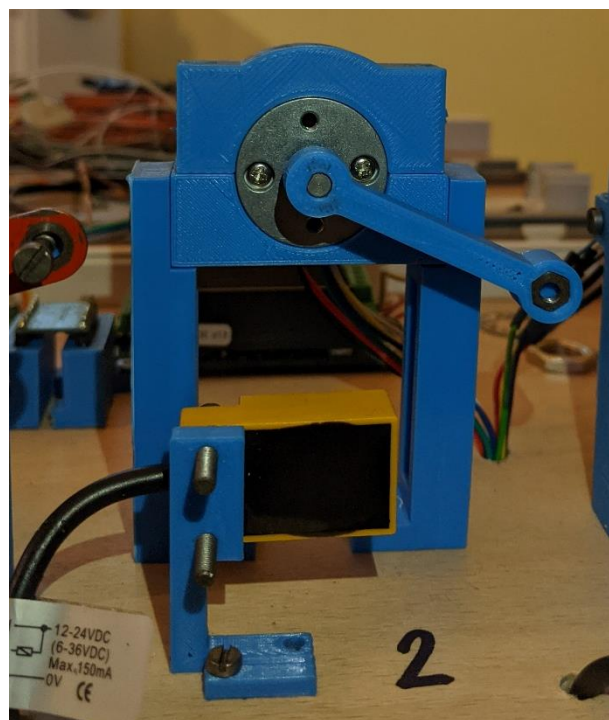
Druhý mechanismus je kartáčový servomotor řízen také pulsně šířkovou modulací. Motor má na své hřídelce integrovaný enkodér. Motor a výkonová jednotka jsou odděleny, což je výhodné z hlediska levnější výměny komponent. Mechanismus je zamýšlen znovu jako ukázka jednoduché PWM regulace, tentokrát s pomocí dvoukanalového enkodéru a indukčního čidla nulové polohy, toutle kombinací se stává mechanismus absolutním.



Obr.3.6. Blokové schéma systému



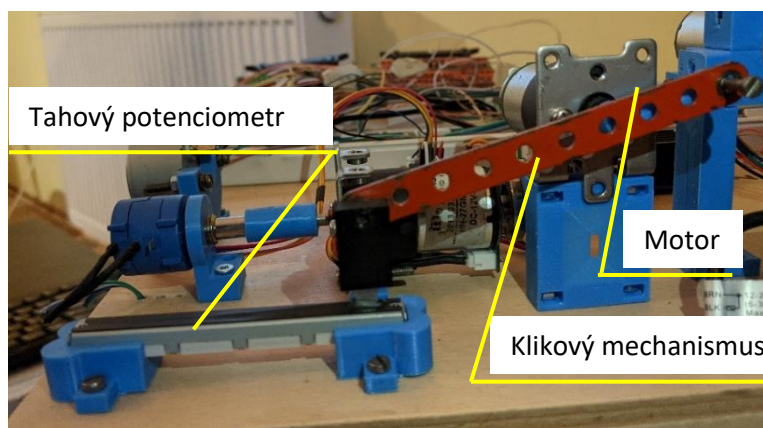
Obr.3.7. Evoluce spodní objímky motoru



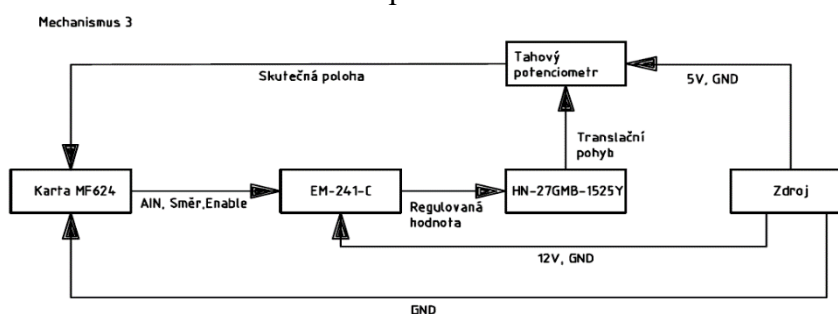
Obr.3.8. Konečná podoba mechanismu 2

### 3.Mechanismus

Třetí mechanismus je kartáčový motorek řízen analogovým signálem. Motor má na své hřídelce integrovaný jednonábový enkodér. Motor a výkonová jednotka jsou taktéž odděleny jako u mechanismu 2. Mechanismus je zamýšlen jako ukázka jednoduché regulace na polohu za pomoci absolutního snímače, v tomto případě tahový potenciometr s logaritmickým průběhem, a to celé za pomoci regulátoru s analogovým vstupem.



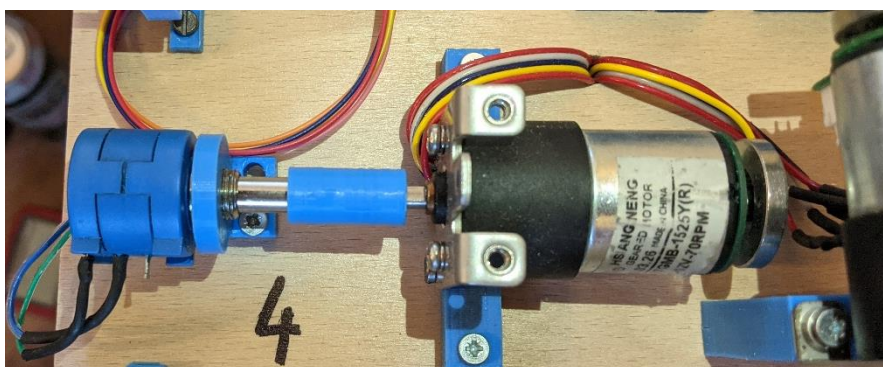
Obr.3.9. Konečná podoba mechanismu 3



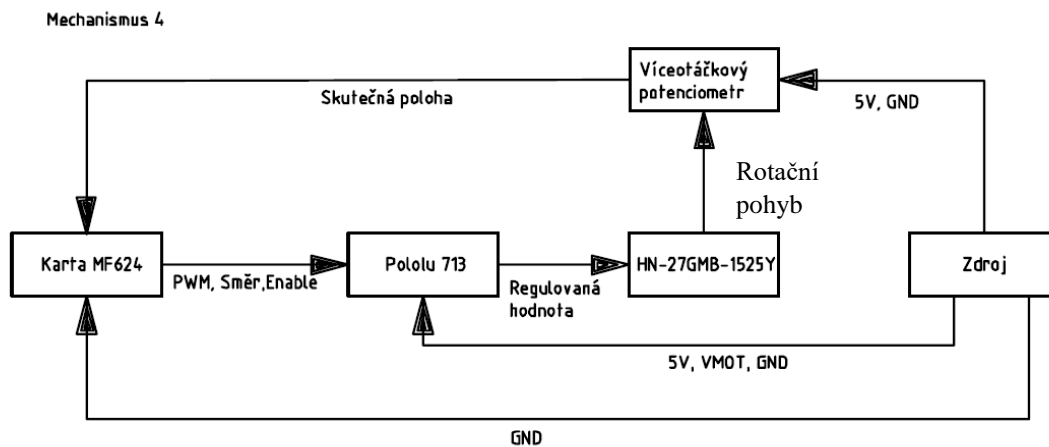
Obr.3.10. Blokové schéma systému

#### 4. Mechanismus

Čtvrtý mechanismus používá stejný motor jako třetí. Rozdíl je v řízení, které je opět realizováno pomocí PWM. Z důvodu unifikace je použit stejnou výkonovou jednotku jako u mechanismu číslo 2. Mechanismus je zamýšlen jako ukázka jednoduché regulace na polohu tentokrát v rotačních souřadnicích, protože jako absolutní senzor je použit více otáčkový potenciometr. Aby se zabránilo poškození potenciometru je propoj mezi mechanismy navržený tak, aby v případě kdy náhodou dojde na doraz, protočí se spojka a potenciometr se nijak nepoškodí.



Obr.3.11. Konečná podoba mechanismu 4

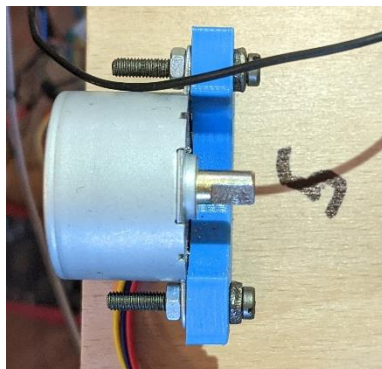


Obr.3.12. Blokové schéma systému



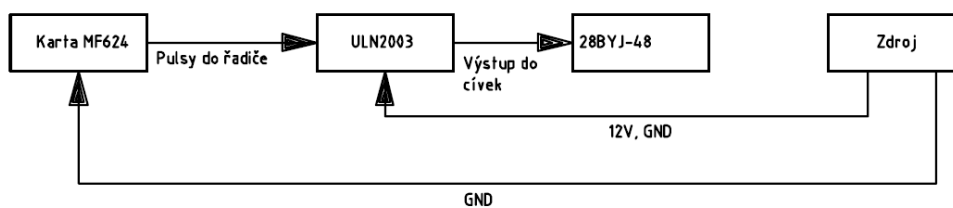
## 5. Mechanismus

Pátý mechanismus používá krokový motor s řadičem, který spíná potřebný výkon. Mechanismus je použit pro vysvětlení principu krokového motoru. Hlavní předností krokového motoru je ta, že se dá skvěle použít i do regulátorů s otevřenou smyčkou. Na obrázku 3.15. je vidět že do karty MF624 nejde žádný zpětný signál.



Obr. 3.13. Uchycení krokového motoru

Mechanismus 5



Obr. 3.14. Blokové schéma systému

## **3.2. Programovací část**

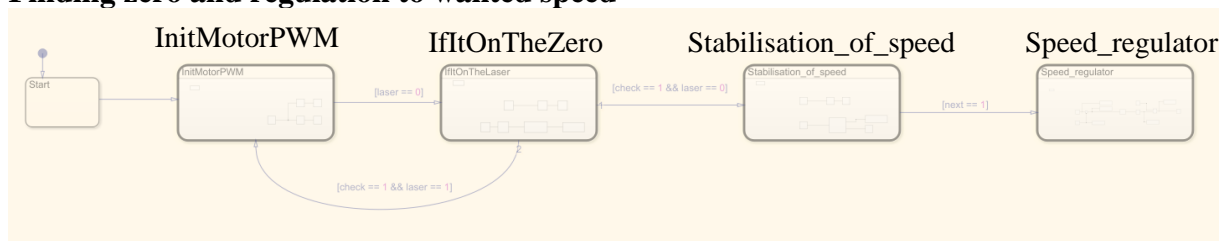
Tato kapitola se zabývá krátkým popisem programů vytvořených k jednotlivým mechanismům. K programování bylo využito prostředí MATLAB/Simulink s využitím karty MF-624. Během programování se využívala toolbox Simulink Desktop realtime, pro zpracování vstupních a výstupních signálů v reálném čase. Dále se využil Stateflow, který simuluje použití stavového automatu. Je velmi podobný způsobu fungování standalone jednotek. Stručně je shrnuto, co by měla úloha představovat a také základní popis subsystémů a globálních proměnných.

### 3.2.1. Popis testovacích úloh

#### Úloha 1:

První úloha je zamýšlena jako ukázka mechanismu, kdy mechatronik nemá všechny potřebné snímače a musí vyjít z toho, co má. Prvním krokem je nalezení nulové polohy, mechanismus se začne otáčet, dokud nenarazí na nulový snímač. Poté proběhne kontrola, jestli se skutečně zastavil a začíná část, kde se stabilizuje rychlost pomocí čtyř otáček. Mechanismus zjišťuje rychlost pouze pomocí nulového snímače. Program počítá čas mezi pulsy, tím pádem si dopočítá rychlost otáčení mechanismu pomocí jednoduché logiky. V posledním kroku je regulátor, kde si uživatel volí rychlost otáčení.

#### Finding zero and regulation to wanted speed



Obr. 3.15. Ukázka stavového automatu pro mechanismus 1

Chart, který zahrnuje inicializační proces. *InitMotorPWM* je roztočení motoru v kladném směru na 10% rychlosti dokud narazí na nulovou polohu. *IfItOnTheZero* je kontrola, jestli se mechanismus zastavil správně na nulové poloze. *Stabilisation\_of\_speed* je blok, kde se provedou 4 otáčky na 40% rychlosti čímž se stabilizuje čtení rychlosti. *Speed\_regulator* je již samotný regulátor, kde uživatel může volit chtěnou rychlost.

#### Output to PWM

Zpracování duty hodnoty na hodnotu procentuální plus vyřešeno přepínání duty hodnoty podle směru.

#### Direction

Směrový výstup za použití globální proměnné.

#### Zero detection

Vstup z čidla nulové polohy, převod proměnné na typ Bool.

#### Calculation of RPMs and position

Výpočet rychlosti za pomocí času mezi pulsy. Z rychlosti pomocí integrace dopočítaná poloha.

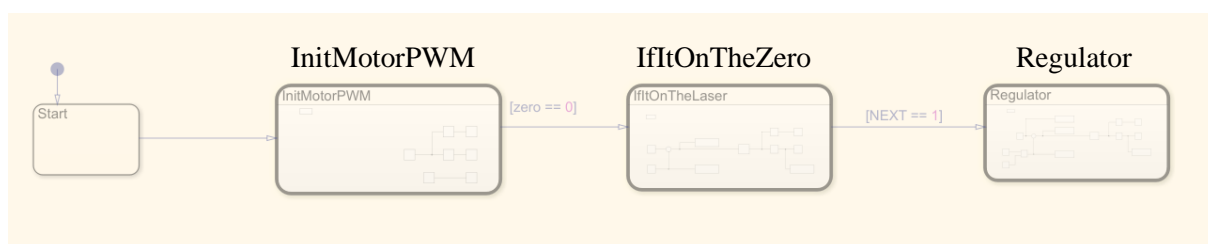
Proměnná	Význam	Datový typ
next	Pomocná proměnná kvůli stabilizaci rychlosti	Boolean
enc	Poloha v radiánech	Double
duty	Hodnota střídy	Double
dir	Směr otáčení	Boolean
real	Skutečná hodnota rychlosti	Double
wanted	Chtěná hodnota rychlosti	Double
laser	Signál z čidla nulové polohy	Boolean
check	Pomocná proměnná pro kontrolu jestli je přesně na nule	Boolean

Tabulka 3.4. Legenda proměnných



**Úloha 2:**

Druhá úloha je zamýšlena jako ukázka mechanismu, kdy mechatronik má všechny potřebné snímače. Prvním krokem je nalezení nulové polohy, mechanismus se začne otáčet, dokud nenarazí na nulový snímač, který přejede z důvodu HW limitací mechanismu. Poté se pustí první, pomalejší regulátor, který má najet přesně na nulovou polohu. Regulace na nulovou polohu může zabrat delší dobu, jakmile je na nulové poloze, spustí se kontrola. Pokud je úspěšná, spustí se poslední krok, tím je regulátor na úhel natočení vůči nulové poloze. Uživatel volí chtěný úhel a regulátor soustavu vyreguluje na přesnou hodnotu.

**Init\_process**

Obr. 3.16. Ukázka stavového automatu pro mechanismus 2

*InitMotorPWM* je základní blok, kdy se motor roztočí na 20% rychlosti dokud nenarazí na nulový snímač. *IfItOnTheZero* je regulátor, který má za úkol vyregulovat mechanismus přesně na nulovou polohu. Až je přesně na nule, pustí se regulátor na uživatelem zadanou hodnotu, který se nachází v bloku *Regulator*.

**Encoder data and conv. To angle**

Zpracování signálu enkodéru a převeden na úhel na točení.

**Delay for zero position**

Zpoždění kvůli kontrole jestli je mechanismus na nulové hodnotě.

**Zero position**

Vstup z čidla nulové polohy, převod proměnné na typ Bool.

**PWM output**

Převod a výstup PWM signálu.

Proměnná	Význam	Datový typ
enc	Vstup z enkodéru	Double
duty	Hodnota duty cyklu	Double
dir	Směr otáčení	Boolean
zero	Signál z čidla nulové polohy	Boolean
setUP	Nulová poloha enkodéru	Double
NEXT	Pomocná proměnná pro kontrolu jestli je přesně na nule	Boolean
wanted	Chtěná hodnota polohy	Double

Tabulka 3.5. Legenda proměnných

**Enable**

Enable výstup, uživatel musí přepnout do úrovně 1, jinak celý mechanismus nebude fungční.

**Direction**

Vyřešená sestava na automatické přepínání směru.

**Úloha 3:**

Třetí úloha je zamýšlena jako ukázka mechanismu, kdy je použita výkonová elektronika řízena analogovým signálem s absolutním snímačem. Není zde žádný inicializační proces, z důvodu použití absolutního snímače. Regulátor je zde nastaven na velice rychlé zásahy, ovšem překmitne při větší změně. Uživatel volí chtěnou polohu.

Mechanismus 3, popis subsystémů:

**Regulator**

Regulátor na polohu, který je naladěný na vysokou rychlost a nižší přesnost, také je zde vyřešeno přepínání směru.

**Direction**

Výstup směru vyřešený tak, aby nemohla nastat situace kdy jsou aktivní oba výstupy.

**Regulator output**

Výstup do regulátoru s potřebným přepočtem.

**Enable**

Enable výstup, uživatel musí přepnout do úrovně 1, jinak celý mechanismus nebude funkční.

**Intake from potentiometer**

Vstup analogové hodnoty, která představuje reálnou hodnotu pozice.

Proměnná	Význam	Datový typ
duty	Hodnota duty cyklu	Double
dir	Směr otáčení	Boolean
real	Skutečná hodnota polohy	Double
wanted	Chtěná hodnota polohy	Double

Tabulka 3.6. Legenda proměnných

**Úloha 4:**

Čtvrtá úloha je zamýšlena jako ukázka mechanismu, kdy je potřeba přesná regulace. Není zde žádný inicializační proces, z důvodu použití absolutního snímače. Regulátor je zde nastaven na pomalé zásahy s nulovým překmitem. Tenhle mechanismus může být použit jako ukázka řízení obráběcí hlavy, kde je potřeba velká přesnost. Uživatel volí chtěnou polohu

Mechanismus 4, popis subsystémů:

**Regulator**

Regulátor na polohu, který je nalaďený na vysokou rychlost a nižší přesnost, také je zde vyřešeno přepínání směru.

**Output to PWM**

Převod a výstup PWM signálu.

**Input from potentiometer**

Vstup reálné hodnoty z potenciometru

**Direction**

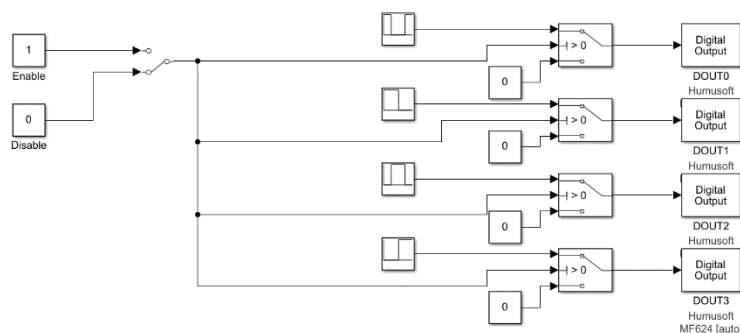
Výstup směru vyřešený tak, aby nemohla nastat situace, kdy jsou aktivní oba výstupy.

**Enable**

Enable výstup, uživatel musí přepnout do úrovně 1, jinak celý mechanismus nebude funkční.

**Úloha 5:**

Pátá úloha není vybavena žádným mechanismem, jedná se pouze o samotný krokový motor s přiřazeným řadičem. Tím pádem odpadá potřeba jakýchkoliv subsystémů. Jedná se nejjednodušší způsob, kterým se dá rozpohybovat. Tenhle způsob spočívá v generování pulsů ve správné frekvenci a správném pořadí.



Obr. 3.17. Ukázka nejjednoduššího ovládání krokového motoru

Proměnná	Význam	Datový typ
duty	Hodnota duty cyklu	Double
dir	Směr otáčení	Boolean
real	Skutečná hodnota polohy	Double
wanted	Chtěná hodnota polohy	Double

Tabulka 3.7. Legenda proměnných

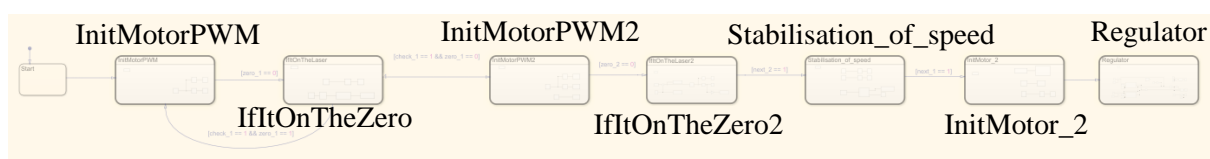
### 3.2.2. Popis komplexních úloh

Komplexní úlohy jsou ukázkou více mechanismů pracujících společně. Mají ukázat simulaci praktického využití a také možnost benche provozovat více mechanismů současně.

#### Komplexní úloha 1

Komplexní úloha 1 je spolupráce mezi mechanismy 1 a 2. Jsou konstruovány tak, aby se jejich dráhy protínaly. Tím pádem se jedná se o úlohu, kdy oba mechanismy najdou nulovou polohu a poté se spustí regulace na posun mezi nimi. Také je zde zahrnuta ochrana proti kolizi, pokud uživatel špatně zvolí úhel.

#### Chart for init.proces of both mechanisms



Obr. 3.18. Ukázka stavového automatu pro mechanismy 1 a 2

Chart, kde je inicializační proces pro oba mechanismy, který musí proběhnout, než se mechanismus začne používat.

*InitMotorPWM* je roztočení prvního mechanismu na 10% rychlosti v kladném směru, dokud neprojde přes nulový snímač, kde se má zastavit.

Jakmile zaregistruje nulovou polohu, přepne se do stavu *IfItOnTheZero*, kde se zastaví a proběhne kontrola, jestli se mechanismus zastavil správně, pokud ne přepne se zpět do stavu *InitMotorPWM*.

Jakmile je správně na nulové poloze, přepne se mechanismus do stavu *InitMotorPWM2*, kde se začne druhý mechanismus otáčet kladným směrem, dokud nenarazí na nulový snímač.

Poté se zastaví, přepne do stavu *IfItOnTheZero2*, kde se nachází regulátor, který vyreguluje soustavu na nulovou hodnotu.

Jakmile proběhne úspěšně kontrola, že oba mechanismy se nachází na nulové pozici, sestava pokročí do bloku *Stabilistaton\_of\_speed* kdy mechanismus 1 provede 4 otáčky, kvůli stabilizaci rychlosti.

V dalším kroku *InitMotor\_2* se roztočí motor danou rychlostí tak at' se vyhnou kolizi.

V posledním bloku *Regulator* se nachází regulátor s ochranou proti kolizi. Uživatel si volí úhel mezi oběma mechanismy. Pokud zde použitá logika vyhodnocení že dojde ke kolizi, tak se zastaví druhý mechanismus a jakmile nebezpečí kolize pomine, tak se znovu vyreguluje na chtěný posun.

Popis subsystémů viz. Úlohy 1 a 2.

## Komplexní úloha 2

Komplexní úloha 2 je simulací výrobního systému pomocí Stateflow, což má simulovat řízení mechanismů pomocí stavového automatu, které jsou běžně používané v průmyslových aplikacích.

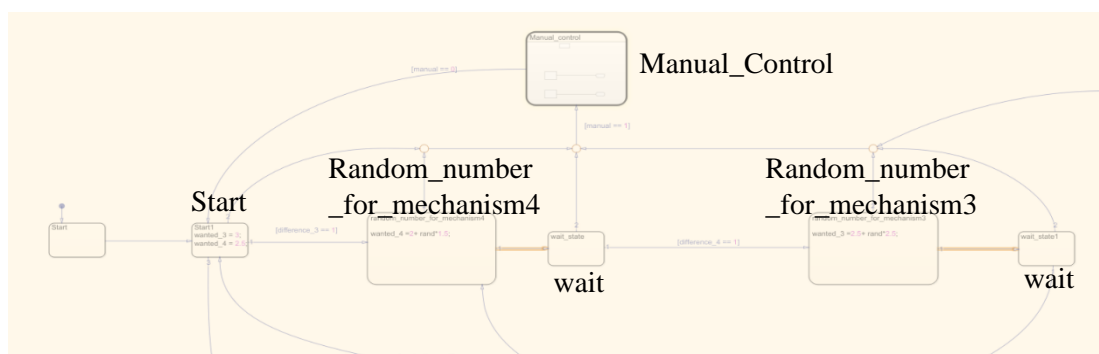
### Machine

Chart začíná startovní pozicí, kdy mechanismy najedou na nulovou pozici. Odtud se větví na 3 módy. První je automatický.

Jakmile je mechanismus 3 na své poloze, chart se přesune do stavu *random\_number\_for\_mechanism4* který značí obrábění.

Jakmile je dokončeno, chart přejde do stavu *random\_number\_for\_mechanism3*, který je zamýšlen jako simulace posunutí součástky.

Dalším stavem je manuální ovládání, které je nadřazeno zbylým režimům.



Obr. 3.19. Ukázka stavového automatu pro manuální a automatický režim

Posledním režimem je režim výrobní.

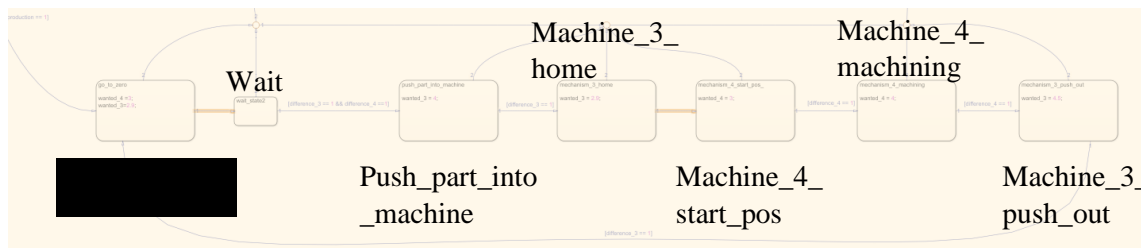
V kroku *go\_to\_zero* se mechanismy posunou do výchozí pozice.

Jakmile se tam nachází tak ve stavu *push\_part\_into\_machine* tak dojde k podání součásti mechanismem číslo 3.

Jakmile je umístěna tak se v kroku *mechanism\_3\_home* mechanismus vrátí do nulové pozice.

Jakmile je bezpečně na své pozici, tak obráběcí nástroj, simulovaný mechanismem 4 najede na začátek obrábění v kroku *mechanism\_4\_start\_pos*.

Jakmile je obrábění dokončeno mechanismus 3 vystrčí součást ve stavu *mechanims\_3\_push\_out*. Poté celý proces začíná znovu.



Obr. 3.20. Ukázka stavového automatu pro výrobní režimu

## 4. Závěr

V předchozím textu byla nejdříve vysvětlena konstrukce DC motorů a různé varianty jejich provedení. Dále se práce zabývala často používanými senzory v průmyslových aplikacích, které se dají efektivně využít v kombinaci s DC motory.

Prvním cílem práce bylo vhodně zvolit všechny komponenty benche. A vymyslet budoucí podobu mechanismů, která by simulovala nejčastější využití senzorů v reálných aplikacích. To zahrnovalo zvolení součástí tak, aby byly použity nejčastější úrovně napětí v různých aplikacích, a to je 5V často používaných v robotice, 12V v automobilovém průmyslu a 24V, který je častým standardem ve výrobních halách.

Druhým cílem bylo komponenty otestovat, ověřit jejich vhodnost pro použití na benchi. Po testování proběhlo modelování potřebných součástí, jejich tisk a kompletace mechanismů. V případě výkonových jednotek je potřeba generátor PWM signálu. Byl použit simulink v kombinaci s kartou MF624 a knihovnou SIMULINK DESKTOP REAL TIME. U snímačů a čidel stačilo základní vybavení elektro laboratoře. Mechanismy byly úspěšně otestovány, ovšem byly odhaleny HW limity, které jsou popsány v přílohách.

Po úspěšném otestování jednotlivých komponent bylo možné přistoupit k samotné konstrukci úloh. Jakmile byly hotovy modely pro sestavení úloh tak se mohlo začít s jejich spojováním. Jakmile bylo vybráno vhodné prostorové rozvržení na benchi, tak se mohl finálně zkompletovat a poté začít s vývojem programů na ukázkové úlohy. Pro otestování a naprogramování úloh byla zvolena varianta řízení s využitím karty MF-624 s využitím softwaru SIMULINK, která umožňuje připojení a ovládání více pohonů současně. Pro každý mechanismus byla vyvinuta jedna základní úloha, která ukazuje doporučený způsob, jak mechanismus správně používat. Poté byly vytvořeny dvě komplexní úlohy za použití více mechanismů současně, jeden z toho silně orientovaný na použití stavového automatu.

Dalším krokem v rozvoji konstrukce benche by mohlo být doděláním snímače k mechanismu číslo pět. Ideálně kapacitní koncový snímač, kde je použito více typů koncových snímačů.

Další prostor pro vylepšení benche by mohl být v oblasti konektivity. A to přidáním DPS s wago konektory, které jsou použity na DPS pro připojení k simulinku. Tohle řešení by bylo výhodné, protože zdroje mají dostatečně velkou výkonovou rezervu, a proto by se dal bench použít také pro napájení externích sestav.

## 5. Zdroje

- [1] Angeti, Jival & Adamu Kadalla, Shu'aibu & Dubukumah, Gachada & Zirata, Bitrus, 2019. *Speed Control of BLDC Motor using Fuzzy: Tuned PID Controller*[online]. [cit. 2021-05-13].  
Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Show-the-BLDCM-Outer-Rotor-and-Inner-Rotor-Design\\_fig1\\_335311453](https://www.researchgate.net/figure/Show-the-BLDCM-Outer-Rotor-and-Inner-Rotor-Design_fig1_335311453)
- [2] AsahiKASEI. *Principle and advantages of optical encoder*[online]. [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.akm.com/kr/ko/technology/technical-tutorial/basic-knowledge-encoder/optical-encoder/>
- [3] COMPONENTS101. *Potentiometer*[online]. Zář.2017, [cit. 2021-05-13].  
Dostupné z: <https://components101.com/resistors/potentiometer>
- [4] Datasheet – TB6612FNG [online]. [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <https://toshiba.semicon-storage.com/info/docget.jsp?did=10660&prodName=TB6612FNG>
- [5] Dong, Huy & Leuchter. *Design of Interfering Mobile Device in the Band Wi-Fi with Magnetron. Advances in Electrical and Electronic Engineering*[online]. Led. 2018, [cit. 2021-05-13].  
Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Construction-of-hybrid-stepper-motor\\_fig2\\_329882727](https://www.researchgate.net/figure/Construction-of-hybrid-stepper-motor_fig2_329882727)
- [6] ElectronicTutorials. *DC motors*[online]. [cit. 2021-05-13].  
Dostupné z: [https://www.electronics-tutorials.ws/io/io\\_7.html](https://www.electronics-tutorials.ws/io/io_7.html)
- [7] ELUC. *Komutace*[online]. 2015, [cit.2021-05-13].  
Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/768>
- [8] ELUC. *Princip činnosti a konstrukce*[online]. 2015, [cit.2021-05-12].  
Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/766>
- [9] ELUC. *Snímače polohy*[online]. 2015, [cit.2021-05-13].  
Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/960>
- [10] ELUC. *Snímače polohy – kapacitní*[online]. Kvě.2021, [cit. 2021-05-14].  
Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1579>
- [11] ELUC. *Vinutí stejnosměrných strojů*[online]. 2015, [cit.2021-05-12].  
Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/767>

- [12] GONZÁLES, García, Antony Pros. *What is and how does servomotor work?*[online]. 2018, [cit. 2021-05-10].  
Dostupné z: <http://panamahitek.com/en/what-is-and-how-does-a-servomotor-work/>
- [13] KREJČÍ, František. *Hlavní druhy stejnosměrných strojů*[online]. [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/hlavni-druhy-stejnosmernych-stroju/view>
- [14] Mechtroface. *Armature Resistance in DC generators*[online]. [cit. 2021-05-13].  
Dostupné z: <https://mechatroface.com/electrical/armature-resistance>
- [15] MF624 - PCI Multifunkční vstupně-výstupní karta. *Humusoft* [online]. [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.humusoft.cz/datacq/mf624/>
- [16] Pololu. *TB6612FNG Dual Motor Driver Carrier*[online]. [cit. 2021-05-14].  
Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/713>
- [17] Wikipedie. *Bezkartáčový stejnosměrný motor*[online]. Kvě.2021, [cit. 2021-05-14].  
Dostupné z:  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Bezkart%C3%A1%C4%8Dov%C3%BD\\_stejnosm%C4%9Brn%C3%BD\\_motor](https://cs.wikipedia.org/wiki/Bezkart%C3%A1%C4%8Dov%C3%BD_stejnosm%C4%9Brn%C3%BD_motor)
- [18] Wikipedie. *Krokový motor*[online]. Kvě.2021, [cit. 2021-05-14].  
Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Krokov%C3%BD\\_motor](https://cs.wikipedia.org/wiki/Krokov%C3%BD_motor)
- [19] Wikipedie. *Pulse-width modulation*[online]. Led.2021, [cit. 2021-05-12].  
Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width\\_modulation](https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation)



## Seznam obrázků

Obrázek 2.1.: Komutátor[7].....	10
Obrázek 2.2.: Cívky na jádře rotoru[2].....	10
Obrázek 2.3.: Rozdíl mezi buzením permanentními magnety a cívkami[3] .....	11
Obrázek 2.4.: Možná zapojení buzení motoru[13] .....	11
Obrázek 2.5.: Možné konstrukce BLDC motoru[7] .....	12
Obrázek 2.6.: Vzájemně posunuté magnety[5].....	13
Obrázek 2.7.: Cívky statoru[5]. .....	13
Obrázek 2.8.: Ukázka uspořádání servomotoru[12] .....	14
Obrázek 2.9.: Jezdec po odporové dráze[3].....	15
Obrázek 2.10.: Princip FLDT snímače [9] .....	16
Obrázek 2.11.: Princip LVDT snímače [9].....	17
Obrázek 2.12.: Ukázka konstrukce kapacitního snímače[4].....	17
Obrázek 2.13.: Princip dvoukanalového optického enkodéru [2] .....	18
Obrázek 2.14.: Kapacitní snímač .....	19
Obrázek 2.15.: Typy optických závor[9] .....	20
Obrázek 2.16.: Vnitřní zapojení H-můstku[4] .....	21
Obrázek 2.17.: Výkonová jednotka Pololu-713 [20].....	21
Obrázek 2.18.: Vizualizace PWM průběhu [8].....	22
Obrázek 3.1.: Blokové schéma zapojení benche .....	26
Obrázek 3.2.: Uspořádání testovacího benche.....	26
Obrázek 3.3.: Blokové schéma mechanismu 1 .....	27
Obrázek 3.4.: Konečná podoba mechanismu 1 .....	27
Obrázek 3.5.: Evoluce nohou.....	27
Obrázek 3.6.: Blokové schéma mechanismu 2 .....	28
Obrázek 3.7.: Evoluce spodní objímky motoru .....	28
Obrázek 3.8.: Konečná podoba mechanismu 2.....	28
Obrázek 3.9.: Konečná podoba mechanismu 3.....	29
Obrázek 3.10.: Blokové schéma mechanismu 3 .....	29
Obrázek 3.11.: Konečná podoba mechanismu 4.....	30
Obrázek 3.12.: Blokové schéma mechanismu 4 .....	30
Obrázek 3.13.: Uchycení krokového motoru .....	31
Obrázek 3.14.: Blokové schéma mechanismu 5 .....	31
Obrázek 3.15.: Ukázka stavového automatu pro mechanismus 1 .....	33
Obrázek 3.16.: Ukázka stavového automatu pro mechanismus 2 .....	34
Obrázek 3.17.: Ukázka nejjednoduššího ovládní krokového motoru .....	36
Obrázek 3.18.: Ukázka stavového automatu pro mechanismy 1 a 2 .....	37
Obrázek 3.19.: Ukázka stavového automatu pro manuální a automatický režim.....	38
Obrázek 3.20.: Ukázka stavového automatu pro výrobní režim.....	38

## Seznam tabulek

Tabulka 3.1.: Popis základních parametrů motorů .....	24
Tabulka 3.2.: Popis základních parametrů výkonových jednotek .....	24
Tabulka 3.3.: Popis základních parametrů snímačů .....	25
Tabulka 3.4.: Legenda proměnných pro mechanismus 1 .....	33
Tabulka 3.5.: Legenda proměnných pro mechanismus 2 .....	34
Tabulka 3.6.: Legenda proměnných pro mechanismus 3 .....	35
Tabulka 3.7.: Legenda proměnných pro mechanismus 4 .....	36

# Seznam příloh

Elektronické přílohy:

- 1) 3D modely součástí
- 2) SIMULINK soubor se všemi úlohami
- 3) Návod, jak připojit jakýkoliv mechanismus k SIMULINKU