

UNIVERZITA PARDUBICE  
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2025

Jan Teplý

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Mobilní robotický parkovací manipulátor  
Bakalářská práce

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2024/2025

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jan Teplý**  
Osobní číslo: **I22032**  
Studijní program: **B0714A150008 Automatizace**  
Téma práce: **Mobilní robotický parkovací manipulátor**  
Zadávající katedra: **Katedra automatizace a matematiky**

## Zásady pro vypracování

Cílem práce je vytvoření případové studie, s následným návrhem a realizací vlastního konstrukčního řešení mobilního robotického parkovacího manipulátoru ultralehkých letadel. Jedná se o zařízení, které slouží jako nástroj k řazení ultralehkých letadel do jejich parkovacího prostoru. Součástí práce bude rešerše tématu, která bude základem případové studie návrhu zařízení této kategorie. Návrh konstrukčního řešení a jeho realizace bude provedena na úrovni funkčního prototypu.

Teoretická část práce bude obsahovat podrobnou rešerši zadaného tématu. Výsledky této rešerše budou použity ke vzniku případové studie. Z této studie bude vycházet návrh vlastního konstrukčního řešení ve fázi prototypu. Základem řídicí jednotky a dálkového ovládní robotu budou vybrané typy jednočipových mikropočítačů, například mikropočítačů s jádrem AVR, ARM, řady Atmega, STM atp. Mezi hlavní funkce mikropočítačů bude realizace řídicích módů pohonu robotického manipulátoru. Řídicí módy budou vycházet z kombinací signálů obdržných od operátora, společně s algoritmem jeho autonomního chování.

V praktické části práce bude proveden popis postupné realizace navržené konstrukce prototypu vlastního zařízení, tvorby firmware mikropočítačů a provedeno jeho testování. Testování bude realizováno v kombinaci laboratorních a reálných provozních podmínek na realizovaném prototypu. Výsledky testování, společně s výrobními podklady zařízení, budou součástí kompletní elektronické dokumentace práce.

Rozsah pracovní zprávy: **50**  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

MATOUŠEK, D., Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR-3.díl, edice uP a praxe, 2. vydání, BEN – technická literatura, 2006, ISBN 80-7300-209-4  
MAZIDI, Muhammad Ali; CHEN, Shujen a GHAEMI, Eshragh. *STM32 Arm programming for embedded systems: using C language with STM32 Nucleo*. [Velká Británie]: MicroDigital, 2014-2018. ISBN 978-0-997-92594-4.  
ZÁHLAVA, V., Návrh a konstrukce DPS, BEN-technická literatura, 2010, ISBN 978-80-7300-266-4  
MAIXNER, L. a kol., Mechatronika, Brno, Computer Press, 2006, ISBN 80-251-1299-3

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Libor Havlíček, Ph.D.**  
Katedra automatizace a matematiky

Datum zadání bakalářské práce: **15. prosince 2024**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **16. května 2025**

**prof. Ing. Petr Doležel, Ph.D.** v.r.  
děkan

L.S.

**Ing. Libor Kupka, Ph.D.** v.r.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 24. ledna 2025

Prohlašuji:

Práci s názvem mobilní robotický parkovací manipulátor jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze 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, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnicí Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 5. 5. 2025

Jan Teplý

### **Poděkování**

Na tomto místě bych rád vyjádřil poděkování vedoucímu bakalářské práce Ing. Liboru Havlíčkovi, Ph.D. za jeho ochotu, odborné vedení a cenné rady, které mi výrazně pomohly při řešení praktických i teoretických částí práce. Dále děkuji své rodině a blízkým za podporu a trpělivost během celého studia, bez níž by tato práce nevznikla.

V Pardubicích dne

Jan Teplý

## **ANOTACE**

*Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací dálkově ovládaného kolového manipulátoru určeného pro přesun letadel s maximální hmotností do 1000 kg. Cílem bylo vytvořit cenově dostupné, technicky spolehlivé a snadno ovladatelné zařízení, které zvyšuje bezpečnost a efektivitu manipulace v omezených prostorách hangárů. V práci je popsána mechanická konstrukce manipulátoru, návrh elektroniky, bezdrátová komunikace mezi ovladačem a vozíkem pomocí modulu NRF24L01 a implementace řídicího systému na platformě Arduino. Součástí je také testování funkčnosti zařízení v reálném provozu.*

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

*Manipulátor letadel, Arduino, DC motor, NRF24L01, dálkové ovládání, robotické vozidlo, konstrukce, joystick, LCD, hangárová technika*

## **TITLE**

*MOBILE ROBOTIC PARKING MANIPULATOR*

## **ANNOTATION**

*This bachelor thesis deals with the design and implementation of a remotely controlled wheeled manipulator intended for moving aircraft with a maximum weight of up to 1000 kg. The aim was to develop a cost-effective, technically reliable and user-friendly device to improve safety and handling efficiency in confined hangar spaces. The work describes the mechanical structure of the manipulator, the design of the electronics, wireless communication between the controller and the vehicle via NRF24L01 module, and the control system implemented on the Arduino platform. The functionality of the device was tested in real-world conditions.*

## **KEYWORDS**

*Aircraft tug, Arduino, DC motor, NRF24L01, remote control, robotic vehicle, frame design, joystick, LCD, hangar equipment*

# OBSAH

SEZNAM ZKRATEK .....	8
SEZNAM ILUSTRACÍ.....	9
SEZNAM TABULEK .....	10
ÚVOD.....	11
1 TEORETICKÁ ČÁST .....	12
1.1 Přehled konstrukčních provedení manipulátorů .....	12
1.1.1 Typy manipulátorů letadel.....	13
1.1.2 Hmotnostní kategorie letadel a význam manipulace.....	16
1.2 Konstrukční řešení.....	17
1.3 Principy a funkce komponent.....	28
1.3.1 Vývojová deska .....	29
1.3.2 Stejnosměrný motor.....	29
1.3.3 Převodovka pro elektromotory .....	30
1.3.3 Drivery DC motoru.....	31
2 PRAKTICKÁ ČÁST .....	33
2.1 Návrh elektroniky manipulátoru.....	33
2.1.1. Napájení manipulátoru a ovladače .....	34
2.1.2 Řídicí jednotka manipulátoru .....	35
2.1.3 Ovládací prvky a bezdrátový přenos .....	36
2.1.4 Řízení motoru .....	38
2.2 Návrh rámu a konstrukční uspořádání.....	40
2.2.1 Montáž a krytí elektroniky .....	42
2.2.3 Servisní přístup k zařízení .....	43
2.3 Program .....	44
2.3.1 Program Arduino Mega 2560 .....	45
2.3.2 Program Arduino NANO.....	46
2.4 Testování manipulátoru .....	49
2.4.1 Průběh testování .....	50
2.4.2 Výsledky testování .....	50
2.4.3 Sledované hodnoty manipulátoru .....	51
2.4.4 Vyhodnocení testování .....	53
3 ZÁVĚR.....	55
POUŽITÁ LITERATURA .....	56
PŘÍLOHY .....	58

## SEZNAM ZKRATEK

DC	Direct Current (stejnosemřný proud)
PWM	Pulse Width Modulation pulzně řířková modulace
LCD	Liquid Crystal Display
I <sup>2</sup> C	Inter-Integrated Circuit (sériová sběrnice)
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter
MTOW	Maximum Take-Off Weight max. vzletová hmotnost
VLA	Very Light Aircraft
LSA	Light Sport Aircraft
GA	General Aviation

## SEZNAM ILUSTRACÍ

Obrázek 1: Ruční manipulátor (BOGERAVIATION, 2015) .....	13
Obrázek 2: Pásový manipulátor (KITPLANES, 2019) .....	14
Obrázek 3: Kolový manipulátor (KITPLANES, 2024) .....	15
Obrázek 4: Stejnoseměrný motor s převodovkou (VLASTNÍ, 2025).....	19
Obrázek 5: Driver Cytron MDD20A (CND-UPGATES, 2025).....	20
Obrázek 6: Arduino MEGA 2560 (PAJTECH, 2024) .....	22
Obrázek 7: Arduino NANO (LASKAKIT, 2025) .....	23
Obrázek 8: NRF24L01 (DRATEK, 2025).....	24
Obrázek 9: LCD s I2C (WHADDA, 2019) .....	25
Obrázek 10: Joystick (DRATEK, 2025).....	26
Obrázek 11: Konstrukční profil 30x30 (MAREK, 2016) .....	27
Obrázek 12: Ložisko otočné základny (KOLAPIRKL, 2024) .....	28
Obrázek 13: Schéma elektroniky manipulátoru (VLASTNÍ, 2025).....	33
Obrázek 14: Schéma elektroniky ovladače (VLASTNÍ, 2025).....	34
Obrázek 15: Zapojení elektroniky manipulátoru (VLASTNÍ, 2025) .....	36
Obrázek 16: Zapojení elektroniky ovladače (VLASTNÍ, 2025) .....	37
Obrázek 17: Uchycení předního kola manipulátoru (VLASTNÍ, 2025) .....	40
Obrázek 18: Uchycení zadního kola manipulátoru (VLASTNÍ, 2025).....	41
Obrázek 19: Točna na příďové kolo letadla (VLASTNÍ, 2025).....	41
Obrázek 20: Umístění elektroniky v přední části manipulátoru (VLASTNÍ, 2025) .....	42
Obrázek 21: Vývojový diagram programu manipulátoru (VLASTNÍ, 2025) .....	46
Obrázek 22: Vývojový diagram ovladače (VLASTNÍ, 2025).....	48
Obrázek 23: Funkční prototyp manipulátoru (VLASTNÍ, 2025).....	54

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Hmotnostní rozdělení letadel.....	16
Tabulka 2: Technické parametry Cytron MDD20A .....	21
Tabulka 3: Technické parametry Arduino NANO .....	23
Tabulka 4: Technické parametry LCD .....	25
Tabulka 5: Technické parametry joysticku PS2 .....	26
Tabulka 6: Souhrn parametrů manipulátoru .....	54

## ÚVOD

V současnosti dochází k neustálému nárůstu provozu v leteckém průmyslu, což s sebou přináší zvýšené nároky na letištní infrastrukturu. Hangárové kapacity často přestávají stačit, a proto je nezbytné efektivně využívat každý dostupný metr čtvereční. Letadla bývají v hangárech umístěna těsně vedle sebe, což výrazně komplikuje jejich manipulaci, a to především u menších letadel s hmotností do 1000 kg, která jsou často přesouvána ručně nebo za pomoci jednoduchých tažných zařízení.

Manipulace s těžkými a hodnotnými stroji je náročná nejen fyzicky, ale vyžaduje i značnou míru přesnosti a opatrnosti. Každé neodborné zacházení s letadlem může mít za následek poškození konstrukce či systému, což představuje výrazné finanční náklady na opravy. Z těchto důvodů se v posledních letech začínají objevovat na některých letištích dálkově ovládané manipulátory, které umožňují bezpečné a přesné přemísťování letadel bez přímé fyzické námahy obsluhy.

Tato práce se zabývá návrhem a realizací dálkově ovládaného manipulátoru, určeného pro přesun letadel o hmotnosti do 1000 kg. Navržený systém využívá elektrické pohony, bezdrátové řízení pomocí joysticku a LCD displej zobrazující základní provozní informace. Řídicí jednotka je postavena na platformě Arduino, přičemž pro bezdrátovou komunikaci mezi jednotlivými částmi systému je použit modul NRF24L01.

Hlavním cílem práce je vytvořit funkční, spolehlivé a cenově dostupné zařízení, které usnadní manipulaci s menšími letadly v omezeném prostoru. V teoretické části práce je popsána problematika manipulace letadel, existující komerční řešení a použité technologické komponenty. Praktická část obsahuje návrh mechanické konstrukce, popis zapojení elektroniky, implementaci řídicího softwaru a vyhodnocení funkčních vlastností navrženého zařízení. Práce zároveň prezentuje spojení poznatků z oblasti elektrotechniky, mikroprocesorových systémů a programování při vývoji účelového technického zařízení.

# 1 TEORETICKÁ ČÁST

## 1.1 Přehled konstrukčních provedení manipulátorů

Letecká doprava patří k nejrychleji se rozvíjejícím odvětvím dopravy, a s rostoucím počtem letadel se zvyšují nároky na letištní infrastrukturu. Jedním z klíčových problémů, kterému letiště čelí, je efektivní manipulace s letadly na zemi, zejména při jejich manipulaci v hangárech nebo na stojánkách. Vzhledem k omezenému prostoru v hangárech a vysoké ceně letadel je nezbytné zajistit bezpečný, přesný a efektivní způsob jejich přesunu.

Tradiční způsoby manipulace zahrnují použití lidské síly nebo tažných vozidel, která však vyžadují zkušenou obsluhu a dostatek prostoru k manévrování. S rostoucí potřebou optimalizace letištních operací se začínají prosazovat elektrické manipulátory letadel, které umožňují přesné řízení pohybu letadla a minimalizují riziko poškození. Tyto manipulátory jsou často navrženy jako pásové nebo kolové vozíky, které uchopí příďové nebo hlavní podvozkové kolo letadla a umožní jeho přesun i v omezených prostorech.

V současnosti existuje několik komerčních řešení manipulátorů, jako jsou pásové tahače letadel, které se vyznačují vysokou tažnou silou a dobrou trakční stabilitou. Tyto systémy jsou však často finančně nákladné a nejsou vhodné pro menší letiště nebo soukromé hangáry, kde je třeba řešení s nižšími náklady. Alternativní přístup představují kolové manipulátory, které při zachování dostatečné tažné síly umožňují jednodušší konstrukci a nižší výrobní náklady.

Tento projekt se zaměřuje na návrh a realizaci kolového dálkově ovládaného manipulátoru letadel do 1000 kg, jehož hlavním cílem je poskytnout ekonomicky dostupné a efektivní řešení pro pohyb letadel v omezených prostorech. Manipulátor bude řízen bezdrátově pomocí joysticku a jeho hlavní pohonné jednotky budou tvořit elektrické stejnosměrné motory. Cílem návrhu je vytvořit kompaktní, snadno ovladatelný a cenově dostupný systém, který bude konkurovat komerčně dostupným řešením s mnohonásobně vyšší cenou.

V této práci bude provedena analýza dostupných technologií a návrh kompletního systému manipulátoru, včetně mechanické konstrukce, elektrických komponent a řídicího softwaru. Výsledkem tohoto projektu bude funkční prototyp, jehož provozní parametry budou testovány v reálných podmínkách.

### 1.1.1 Typy manipulátorů letadel

Manipulátory letadel se používají pro přesun letadel na letištní ploše a v hangárech. V závislosti na konstrukci, způsobu pohonu a ceně lze rozlišit několik typů manipulátorů. Hlavními faktory ovlivňujícími jejich výběr jsou hmotnost letadla, druh povrchu, přesnost řízení a finanční dostupnost.

#### Ruční manipulátory

Ruční manipulátory představují nejjednodušší a nejlevnější řešení, které můžeme vidět na obrázku č. 1. Obvykle se jedná o mechanické válečkové systémy, pákové manipulátory nebo malé kolečkové transportní vozíky, které se připojují k podvozku letadla. Přesun letadla je zajištěn ručním tlačáním nebo tažením obsluhou.

#### Výhody ručních manipulátorů:

- Nízká pořizovací cena (řádově 5 000 – 10 000 Kč podle provedení).
- Jednoduchá konstrukce bez nutnosti napájení.
- Nízké provozní náklady.

#### Nevýhody ručních manipulátorů:

- Omezené použití pouze pro velmi lehká letadla (do 400 kg).
- Vyžaduje fyzickou sílu obsluhy. Nízká přesnost manipulace, nevhodné pro těsné prostory.



Obrázek 1: Ruční manipulátor (BOGERAVIATION, 2015)

## **Pásové manipulátory**

Pásové manipulátory využívají pásový podvozek, viz obrázek č.2, což zajišťuje vyšší trakci a stabilitu i na kluzkých nebo nezpevněných površích. Jsou běžně využívány pro větší a těžší letadla, která vyžadují silný pohon a spolehlivost při manipulaci.

### **Výhody pásových manipulátorů:**

- Vysoká trakce i na mokřem nebo kluzkém povrchu.
- Větší stabilita při přesunu těžkých letadel.
- Možnost využití na různých typech povrchů.

### **Nevýhody pásových manipulátorů:**

- Vyšší pořizovací cena (cca 200 000 – 800 000 Kč).
- Složitější údržba pásového podvozku.
- Vyšší hmotnost a energetická náročnost.



Obrázek 2: Pásový manipulátor (KITPLANES, 2019)

### **Příklady komerčních modelů:**

Acair Technology Track Tug – pásový manipulátor s elektrickým pohonem a dálkovým ovládním, cena cca 300 000 Kč.

Goldhofer AST-1X – vysoce výkonný pásový tahač pro velká letadla, cena přes 2 000 000 Kč.

## Kolové manipulátory

Kolové manipulátory využívají elektrické nebo spalovací motory pro pohon kol, přičemž obsluha musí stát přímo u manipulátoru a ovládat ho manuálně pomocí řídicí páky nebo madla. Tento typ manipulátorů, který můžeme vidět na obrázku č. 3, je vhodný pro pevné povrchy i travnaté plochy a dokáže manipulovat stejně těžká letadla jako pásové modely.

### Výhody kolových manipulátorů:

- Nižší pořizovací cena než pásové modely (cca 50 000 – 200 000 Kč).
- Snadná údržba a jednodušší konstrukce oproti pásovým modelům.
- Možnost použití na travnatém povrchu i pevných letištních plochách.
- Schopnost manipulovat letadla s hmotností srovnatelnou s pásovými modely.

### Nevýhody kolových manipulátorů:

- Obsluha musí být fyzicky přítomná u manipulátoru, není ovládán na dálku.
- Nižší trakce na kluzkém povrchu oproti pásovým modelům.



Obrázek 3: Kolový manipulátor (KITPLANES, 2024)

### Příklady komerčních modelů:

Lindbergh Aircraft Tug – kolový manipulátor s elektrickým pohonem, obsluha stojí na plošině za manipulátorem, cena cca 80 000 Kč.

PowerTow 40 EZ – kolový model s benzínovým motorem, obsluha vede manipulátor ručně, cena cca 65 000 Kč.

### Srovnání typů manipulátorů

Každý typ manipulátoru má své specifické využití v závislosti na velikosti letadla a provozním prostředí. Pásové modely poskytují lepší trakci na nezpevněných nebo kluzkých površích, ale mají složitější údržbu a vyšší cenu. Kolové manipulátory jsou jednodušší na údržbu a levnější, přičemž jsou schopné manipulovat stejně těžká letadla jako pásové modely, ale mají o něco horší trakci na kluzkém povrchu. Ruční manipulátory jsou nejlevnější, ale jejich použití je omezeno na velmi lehká letadla.

V rámci této práce bude navržen kolový dálkově ovládaný manipulátor pro letadla do 1000 kg, který spojuje výhody nízké ceny, jednoduché údržby a dostatečné manévrovací schopnosti pro provoz v hangárovém prostředí. Na rozdíl od komerčních kolových modelů, kde musí být obsluha přímo u zařízení, bude tento manipulátor plně ovládán na dálku pomocí joysticku.

#### 1.1.2 Hmotnostní kategorie letadel a význam manipulace

Letadla lze rozdělit do několika kategorií podle maximální vzletové hmotnosti (MTOW – Maximum Take-Off Weight). Toto členění je důležité nejen z hlediska legislativního zařazení a pilotní kvalifikace, ale rovněž z pohledu manipulace a parkování. Hmotnost letadla totiž přímo ovlivňuje nároky na mechanickou sílu potřebnou k jeho pohybu na zemi, především v omezených prostorách hangárů a stojánek. (ÚCL, 2023; Klement, 2021)

V civilním letectví jsou běžně používány hmotnostní kategorie, uvedené v tabulce č.1.

Tabulka 1: Hmotnostní rozdělení letadel (VLASTNÍ, 2025)

Kategorie	Maximální vzletová hmotnost (MTOW)	Příklady letadel
<b>UL (ultralehká letadla)</b>	do 600 kg	TL-3000 Sirius, Bristell B23
<b>LSA (Light Sport Aircraft)</b>	do 600–650 kg	Tecnam P2002 Sierra, Evektor SportStar
<b>VLA (Very Light Aircraft)</b>	do 750 kg	Zlin Z242, Piper Tomahawk
<b>GA – malá letadla (General Aviation)</b>	do 5 700 kg	Cessna 172, Piper PA-28
<b>Střední letadla</b>	5 700–136 000 kg	Cessna CitationJet, Learjet 60
<b>Velká letadla</b>	nad 136 000 kg	Boeing 737, Airbus A320

Z tabulky číslo 1 vyplývá, že letadla s hmotností kolem 1 000 kg spadají již do nižší kategorie General Aviation, tedy mezi plně certifikovaná letadla jak pro výcvik, přepravu

osob tak i leteckou práci. Ve srovnání s ultralehkými typy, jejichž hmotnost často nepřesahuje 300–500 kg, se jedná o stroje, které jsou výrazně robustnější a obtížněji manipulovatelné. Pro jejich přemísťování na zemi je v některých případech nutné využít více osob, nebo právě mechanizované pomocné zařízení, jako je dálkově ovládaný manipulátor. (Klement, 2021)

Kromě hmotnosti hraje významnou roli také rozměrový profil letadla, tedy délka trupu a rozpětí křídel. I relativně lehká letadla mohou zabírat značný prostor, a proto je potřeba přesného manévrování v hangárech, kde bývají letouny často „našlapány“ křídlo na křídlo. (FAA, 2016)

S přibývajícím počtem letadel a rostoucí poptávkou po hangárování strojů nejen pro sportovní, ale i komerční účely, roste význam efektivních metod pozemní manipulace. Zařízení určené pro přesun letadel o hmotnosti do 1000 kg tedy pokrývá potřeby značné části soukromého a klubového letectví.

## **1.2 Konstrukční řešení**

Tato kapitola se věnuje konstrukčním aspektům navrženého manipulátoru, a to jak z pohledu mechanické stavby rámu, tak z hlediska použitých komponent a jejich rozmístění. Popsány jsou základní rozměry zařízení, rozmístění kol, uložení motorů, uchycení elektroniky a připojení zátěže. Důraz je kladen na jednoduchost, stabilitu a snadnou montáž celé konstrukce s ohledem na praktické použití manipulátoru v hangárovém prostředí.

### **1.2.1 Výběr komponent**

Při návrhu manipulátoru bylo nutné zvolit vhodné komponenty, které zajistí bezpečný a efektivní provoz při zachování nízkých výrobních nákladů. Každá součástka byla vybírána s ohledem na funkčnost, kompatibilitu a dostupnost, aby bylo možné systém snadno sestavit a případně rozšířit.

#### **Dostatečný výkon a nosnost**

Manipulátor musí být schopen přesouvat letadla s hmotností až 1000 kg, což vyžaduje dostatečně výkonné pohonné jednotky s vysokým krouticím momentem a optimalizovaný převodový systém. Současně bylo nutné dimenzovat napájecí soustavu, aby umožňovala dostatečnou dobu provozu bez nutnosti častého dobíjení.

#### **Bezdrátové ovládání a stabilita řízení**

Ovládání manipulátoru musí být rychlé a přesné, s minimální latencí při přenosu signálů. Důležitým aspektem je spolehlivá bezdrátová komunikace, která nebude náchylná

k rušení v prostředí letišť. Ovládací systém byl navržen tak, aby byl ergonomický a intuitivní, což usnadní manipulaci i v omezených prostorech hangáru.

### **Optimalizace nákladů a dostupnost konstrukčních komponent**

Projekt je finančně limitován částkou 25 000 Kč, proto byly vybírány komponenty s optimálním poměrem cena/výkon. Upřednostněny byly součástky s dostupnou dokumentací a komunitní podporou, což usnadňuje jejich implementaci a minimalizuje rizika spojená s nekompatibilitou či nedostupností náhradních dílů.

### **Mechanická odolnost a provozní spolehlivost**

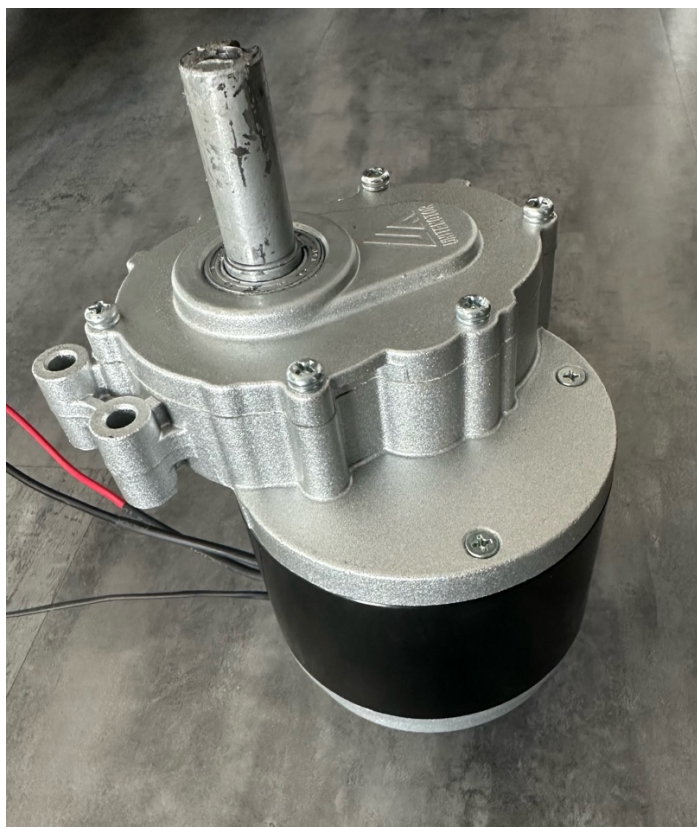
Vzhledem k zatížení během provozu byly voleny cíleně komponenty s dlouhou životností a odolností vůči mechanickému namáhání. Důraz byl kladen na robustnost konstrukce a modularitu, která umožní budoucí rozšíření systému či snadnou výměnu součástí při údržbě.

### **Stejnoseměrný motor 24 V / 350 W s planetovou převodovkou**

Použitý motor je stejnosměrný elektromotor s kartáčovým komutátorem, napájený napětím 24 V a dimenzovaný na jmenovitý výkon 350 W, jež lze vidět na obrázku č. 4. Jeho výstupní otáčky činí přibližně 120 ot/min, čehož je dosaženo pomocí integrované planetové převodovky s pevným převodovým poměrem. Tento typ motoru je běžně využíván v elektrických invalidních vozících a dalších mobilních pohonných aplikacích, kde je kladen důraz na vysoký točivý moment při nízkých výstupních otáčkách.

Planetová převodovka je pevně spojená s hřídelí motoru a slouží k mechanickému převodu původně vysokých otáček rotoru na požadované otáčky na výstupu. Převodový poměr bývá navržen tak, aby byl výstupní pohyb plynulý, tichý a účinný i při zatížení. Výhodou planetové převodovky je rovnoměrné rozložení sil mezi jednotlivé satelity, kompaktní provedení a vysoká životnost při dlouhodobém provozu.

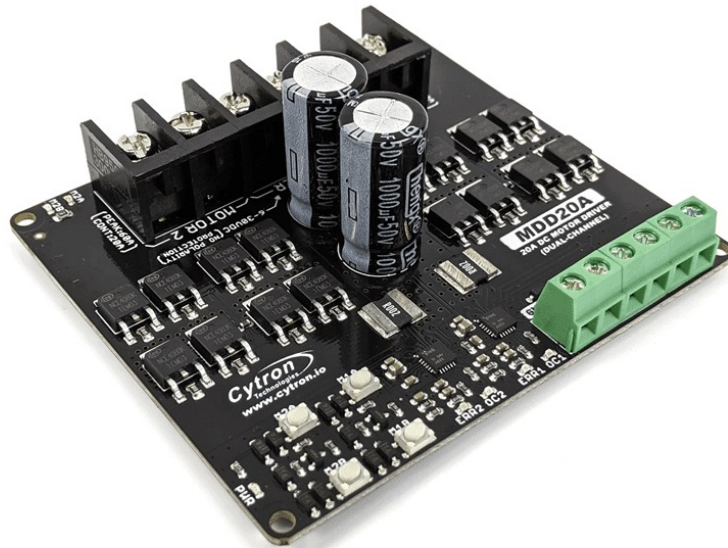
Motor je dimenzován na jmenovitý proud 18,7 A a je zpravidla osazen elektromagnetickou brzdou, která slouží k zajištění rotoru při odpojení napájení. Tato vlastnost je důležitá zejména v aplikacích, kde je vyžadováno zabránit samovolnému pohybu zařízení. Vzhledem k napájecímu napětí 24 V je motor kompatibilní s běžnými průmyslovými napájecími systémy i s bateriovými zdroji. (ElectroDrive Motors, 2024)



Obrázek 4: Stejnoseměrný motor s převodovkou (VLASTNÍ, 2025)

### **Driver Cytron MDD20A**

Cytron MDD20A, zobrazen na obrázku č. 5, je dvoukanálový motorový driver navržený pro obousměrné řízení dvou stejnosměrných motorů v aplikacích vyžadujících vysoký výkon. Hlavní technické parametry lze vidět v tabulce č.2. Tento umožňuje řízení motorů v napěťovém rozsahu 6 V až 30 V s trvalým proudem až 20 A na kanál a špičkovým proudem 60 A po dobu několika sekund. Díky plně diskrétnímu NMOS H-můstkovému designu dosahuje vysoké účinnosti a minimalizuje tepelné ztráty, což eliminuje potřebu dodatečných chladičů. (Cytron Technologies, 2025)



Obrázek 5: Driver Cytron MDD20A (CND-UPGATES, 2025)

**Hlavní vlastnosti:**

- Široký rozsah napájecího napětí: 6 V až 30 V DC.
- Vysoký proudový výkon: trvalý proud 20 A na kanál, špičkový proud 60 A.
- Kompatibilita s různými logickými úrovněmi: podporuje vstupní napětí 1,8 V, 3,3 V, 5 V a 12 V, což zajišťuje snadnou integraci s různými mikrokontroléry, jako jsou Arduino, Raspberry Pi či PLC systémy.
- Vysokofrekvenční PWM řízení: podporuje PWM frekvenci až 20 kHz, což umožňuje tiché a plynulé řízení motorů.
- Vestavěné ochrany: zahrnují ochranu proti nadproudu s aktivním omezením proudu, tepelnou ochranu a ochranu proti podpětí, což zvyšuje spolehlivost a bezpečnost provozu.
- Testovací tlačítka a LED indikátory: umožňují rychlé ověření funkčnosti driveru bez potřeby externího řídicího signálu.

Tabulka 2: Technické parametry Cytron MDD20A (Cytron Technologies, 2025)

<b>Parametr</b>	<b>Hodnota</b>
<b>Napájecí napětí</b>	6 V – 30 V DC
<b>Trvalý proud na kanál</b>	20 A
<b>Špičkový proud na kanál</b>	60 A
<b>Vstupní logické napětí</b>	1,8 V, 3,3 V, 5 V, 12 V
<b>PWM frekvence</b>	až 20 kHz
<b>Rozměry</b>	88,9 mm x 78,7 mm

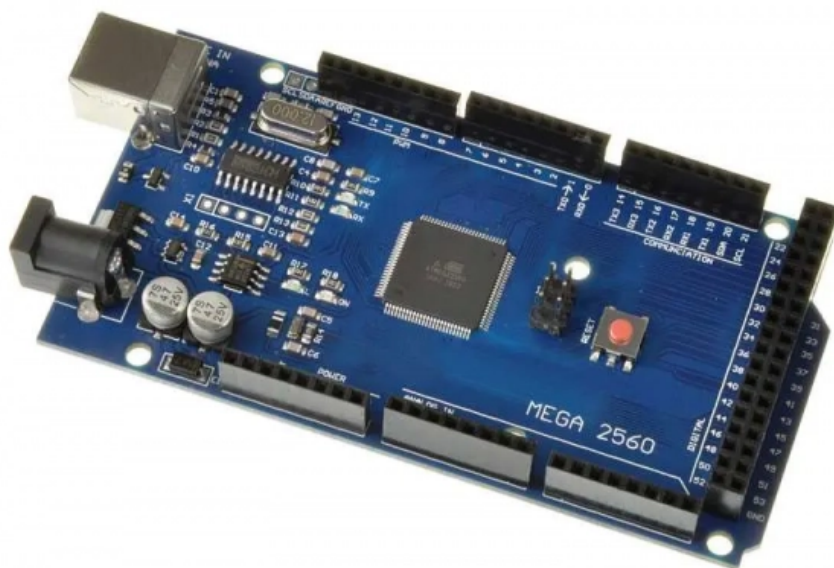
### **Arduino MEGA 2560**

Arduino Mega 2560 je vývojová mikrokontrolérová deska založená na obvodu ATmega2560, která je navržena pro rozsáhlejší embedded systémy vyžadující vyšší počet vstupních a výstupních pinů, větší paměťovou kapacitu a pokročilejší komunikační možnosti. Zobrazena je na obrázku číslo 6. Vzhledem ke své otevřené architektuře, jednoduché programovatelnosti a široké komunitní podpoře nachází uplatnění především v oblasti robotiky, automatizace, sběru dat a řízení více periferních zařízení současně. (Arduino, 2023)

Deska disponuje 54 digitálními vstupně-výstupními piny, z nichž 15 může být použito jako PWM výstupy, a dále 16 analogovými vstupy. Komunikace s periferiemi je umožněna prostřednictvím čtyř sériových rozhraní UART, sběrnice I<sup>2</sup>C a SPI. Kromě toho je zařízení vybaveno USB rozhraním s převodníkem ATmega16U2, který zajišťuje spojení s počítačem pro nahrávání programového kódu a sériovou komunikaci. (Arduino, 2023)

Napájení desky je možné buď přes USB, nebo externím napájecím zdrojem v rozsahu 6–20 V (doporučeno 7–12 V). Integrovaný lineární stabilizátor zajišťuje napájení vnitřních obvodů na úrovni 5 V. Pro trvalé uchování dat je k dispozici 4 kB EEPROM, zatímco hlavní paměť pro běh programů tvoří 256 kB flash a 8 kB SRAM. (Arduino, 2023)

Díky vysoké modularitě a kompatibilitě s většinou tzv. shieldů je Arduino Mega 2560 vhodnou platformou pro realizaci pokročilých řídicích systémů, včetně řízení více motorů, displejů, snímačů a komunikačních modulů.



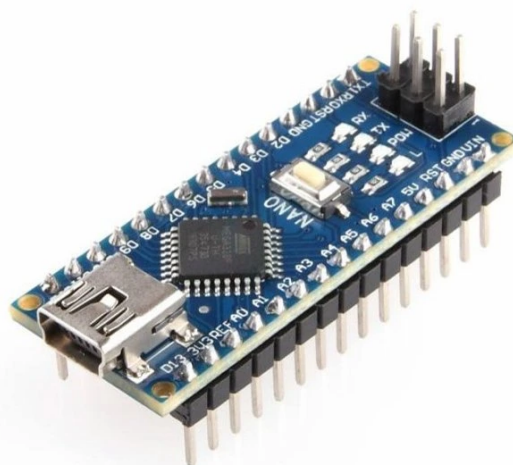
Obrázek 6: Arduino MEGA 2560 (PAJTECH, 2024)

### **Arduino NANO**

Arduino Nano je kompaktní mikrokontrolérová vývojová deska založená na čipu ATmega328P, vyobrazena na obrázku č. 7, určená pro aplikace, kde je kladen důraz na malé rozměry při zachování plné funkčnosti. Nabízí obdobné možnosti jako větší deska Arduino Uno, ale v podstatně menším formátu, což umožňuje její snadnou integraci do prototypových plošných spojů nebo nositelných systémů. Hlavní technické parametry lze shlédnout v tabulce č. 3.

Deska je vybavena celkem 14 digitálními vstupně-výstupními piny, z nichž 6 podporuje generování PWM signálu, a 8 analogovými vstupy pro snímání analogových veličin. Napájení může být přivedeno buď přes pin VIN (napětí 7–12 V), nebo přímo na pin 5V, případně prostřednictvím USB portu, který je navíc využíván pro programování desky.

Komunikačně podporuje protokoly UART, SPI a I<sup>2</sup>C, čímž je zajištěna možnost připojení celé škály periférií, jako jsou senzory, displeje, motorové drivery či bezdrátové moduly. Programování probíhá přes Arduino IDE, přičemž deska obsahuje bootloader, který umožňuje nahrávání kódu bez potřeby externího programátoru. Komunikaci s počítačem zajišťuje obvod FT232RL, který převádí USB signál na sériovou linku TTL. (Arduino, 2024)



Obrázek 7: Arduino NANO (LASKAKIT, 2025)

Tabulka 3: Technické parametry Arduino NANO (LASKAKIT, 2025)

Parametr	Hodnota
Mikrokontrolér	ATmega328P
Provozní napětí	5 V DC
Vstupní napětí (doporučené)	7–12 V
Digitální I/O piny	14 (z toho 6 s PWM)
Analogové vstupy	8
Maximální proud na I/O pin	40 mA
Flash paměť	32 kB (2 kB využito bootloaderem)
SRAM	2 kB
EEPROM	1 kB
Taktovací frekvence	16 MHz
Komunikační rozhraní	UART, SPI, I <sup>2</sup> C
USB konektor	Mini USB typu B
Rozměry	cca 45 mm × 18 mm
Hmotnost	cca 7 g

## NRF24L01

nRF24L01+ je bezdrátový transceiver modul pracující v pásmu 2,4 GHz ISM, navržený pro ultranízkovýkonové bezdrátové aplikace. Tento modul umožňuje obousměrnou komunikaci s rychlostí přenosu dat až 2 Mbps. (Nordic Semiconductor, 2011)

Pro aplikace vyžadující větší dosah a vyšší výkon byla vyvinuta varianta nRF24L01+PA+LNA, která integruje výkonový zesilovač (PA) a nízkošumový zesilovač (LNA). Tuto verzi zachycuje obrázek č. 8. Tato verze umožňuje komunikaci na vzdálenost až 1 000 metrů v přímé viditelnosti a je vybavena externí anténou pro zlepšení kvality signálu. (HandsOn Tech, 2023)



Obrázek 8: NRF24L01 (DRATEK, 2025)

## LCD 20×4 s I<sup>2</sup>C rozhraním – princip činnosti a integrace

Znakový LCD displej, obrázek č. 9, s rozlišením 20 znaků × 4 řádky představuje spolehlivý zobrazovací prvek určený pro zobrazování textových dat v systémech s mikroprocesorovým řízením. K řízení znakové matice využívá integrovaný řadič HD44780, který přijímá řídicí signály v paralelní formě. Vzhledem k relativně vysokému počtu potřebných signálových vodičů (min. 6 pinů) bývá k displeji připojen I<sup>2</sup>C převodník, který umožňuje komunikaci po dvouvodičové sériové sběrnici. (AZ-Delivery, 2023)

Nejčastěji je použit I/O expandér PCF8574, který na základě dat přijatých po I<sup>2</sup>C sběrnici generuje potřebné paralelní výstupy pro řadič HD44780. Tímto způsobem je možné displej jednoduše připojit k mikrokontrolérům (např. Arduino) pomocí pouze dvou vodičů – SDA (datová linka) a SCL (hodinová linka). Převodník rovněž umožňuje ovládání podsvícení

displeje a nastavení kontrastu pomocí integrovaného potenciometru. (NXP Semiconductors, 2016)

Displej je napájen stejnosměrným napětím 5 V a umožňuje zobrazení 80 znaků (4 řádky po 20 znacích). Kromě samotného textu může řadič zobrazit i vlastní definované znaky uložené v CGRAM. Typická I<sup>2</sup>C adresa zařízení je 0x27, v závislosti na konfiguraci propojek adresových pinů na převodníku. Parametry LCD přehledně shrnuje tabulka č. 4.

Díky standardizovanému rozhraní, nízké spotřebě energie, čitelnosti a široké podpoře v programovacích knihovnách je LCD 20×4 s I<sup>2</sup>C převodníkem vhodný pro zobrazování dat v řídicích systémech, přístrojových panelech, laboratorní technice a embedded aplikacích. (NXP Semiconductors, 2016)



Obrázek 9: LCD s I2C (WHADDA, 2019)

Tabulka 4: Technické parametry LCD

Parametr	Hodnota
Typ displeje	Znakový LCD, 20 znaků × 4 řádky
Řadič displeje	HD44780
I <sup>2</sup> C převodník	PCF8574
Komunikační rozhraní	I <sup>2</sup> C (SDA, SCL)
Napájecí napětí	5 V DC
Nastavení kontrastu	Pomocí integrovaného potenciometru
Podsvícení	LED, softwarově ovladatelné
I <sup>2</sup> C adresa	0x27 nebo 0x3F (dle modulu)
Počet zobrazitelných znaků	80 (20 znaků × 4 řádky)
Podporované znaky	ASCII + definovatelné uživatelské znaky

## Joystick

Joystick PS2, viz. obrázek č. 10, je analogový ovládací prvek, který umožňuje snímat pohyb ve dvou osách – X (horizontální) a Y (vertikální). Jeho konstrukce se skládá ze dvou potenciometrů, každý s hodnotou 10 k $\Omega$ , přehledně uvedeno v tabulce č. 5, které detekují vychýlení páčky v příslušných směrech. V neutrální poloze je výstupní napětí obou os přibližně 2,5 V. Při pohybu páčky se napětí mění v rozsahu od 0 V do 5 V, v závislosti na směru a intenzitě vychýlení. (Margolis, 2012)

Kromě analogového výstupu je joystick vybaven také tlačítkem, které je aktivováno stlačením páčky směrem dolů. Tento spínač poskytuje digitální signál, který lze využít pro dodatečné ovládací funkce. (Geddes, 2016)



Obrázek 10: Joystick (DRATEK, 2025)

Tabulka 5: Technické parametry joysticku PS2

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	5 V DC
Výstupní signály	2× analogové (VRx, VRy), 1× digitální (SW)
Rozsah výstupního napětí	0–5 V
Východzí napětí (střed)	cca 2,5 V
Hodnota potenciometrů	10 k $\Omega$
Spínací tlačítko	Ano (integrované, stisk páčky)
Připojení	Pinové vývody (GND, VCC, VRx, VRy, SW)
Rozměry modulu	cca 34 mm × 26 mm × 32 mm
Provozní teplota	0 °C až 70 °C

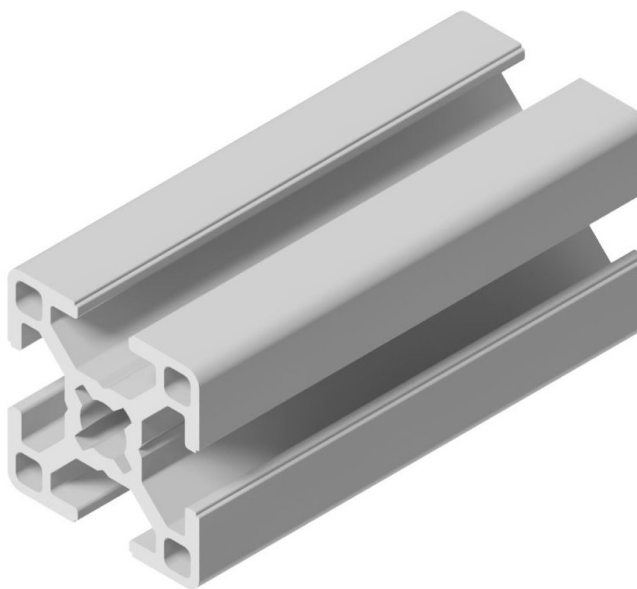
## Konstrukční prvky – hliníkové profily

Rám zařízení je sestaven z modulárních hliníkových profilů typu 30×30 mm s drážkou 8 mm, jež lze vidět na obrázku č.11, které jsou běžně využívány v průmyslové automatizaci a jednoúčelových konstrukcích. Tento typ konstrukčního systému umožňuje rychlou montáž, vysokou tuhost a snadné upevnění mechanických a elektronických prvků bez nutnosti svařování.

Profily jsou vyrobeny z hliníkové slitiny, která kombinuje nízkou hmotnost, korozní odolnost a dostatečnou pevnost pro běžné zatížení v rozsahu desítek až stovek kilogramů. Povrch profilů je eloxovaný, což zajišťuje vyšší mechanickou i chemickou odolnost.

Součástí systému jsou také spojovací prvky, jako jsou T-matice, úhelníky a spojovací desky, které umožňují flexibilní změnu rozměrů konstrukce bez nutnosti vrtání. Tato variabilita je zásadní při prototypování, protože umožňuje rychlé úpravy rámu podle aktuální potřeby nebo změn v rozmístění komponent. (VSK-Profily, 2025)

Volba tohoto konstrukčního systému výrazně přispívá k stabilitě, opakovatelnosti montáže a zároveň umožňuje zachovat nízkou celkovou hmotnost zařízení, což je výhodné zejména při manipulaci s mobilní platformou.



Obrázek 11: Konstrukční profil 30x30 (MAREK, 2016)

## Otočné ložisko jako točný prvek manipulátoru

Pro zajištění rotace nákladní části manipulátoru bylo zvoleno otočné ložisko, které umožňuje snadné natáčení připojeného segmentu rámu vůči podvozku. Tento konstrukční prvek funguje jako točna – tedy rotační spoj mezi statickou základnou a otočným ramenem nebo nákladní plošinou.

Použité ložisko, které lze vidět na obrázku číslo 12, je tvořeno dvěma ocelovými prstenci, mezi nimiž jsou uloženy ocelové kuličky vedené v kuličkové dráze. Spodní prstenec je pevně přichycen k nosné části podvozku, zatímco horní slouží k uchycení loženého rámu nebo přípojné části. Díky kuličkovému vedení se celá konstrukce může otáčet s minimálním třením, a to i při zatížení v řádu stovek kilogramů. (Hůlek, 2012)

Výhodou tohoto řešení je nízký konstrukční profil, relativně jednoduchá montáž a schopnost přenášet jak axiální, tak částečně i radiální zatížení. Otočné ložisko zároveň přispívá k vyšší manévrovatelnosti manipulátoru, protože umožňuje natačení zátěže nezávisle na směru jízdy.

Kromě mechanické funkce je zvolený typ ložiska vhodný i pro nízké rychlosti a přerušovaný provoz, jaký je běžný při přesunu letadel v hangárovém nebo travnatém prostředí. Umožňuje také jednoduché domazávání, čímž je zajištěna dlouhá životnost i při nepravidelném zatížení. (Kuličková ložiska, 2012)



Obrázek 12: Ložisko otočné základny (KOLAPIRKL, 2024)

### 1.3 Principy a funkce komponent

Pro správnou funkci celého systému manipulátoru je klíčový nejen samotný výběr jednotlivých komponent, ale také jejich technické vlastnosti, princip fungování a vzájemná kompatibilita. Tato kapitola se zaměřuje na podrobné zhodnocení použitých součástí z hlediska jejich funkce v systému a důvodů, které vedly k jejich výběru.

Každá komponenta byla volena s ohledem na specifické požadavky projektu, jako je spolehlivost, dostupnost, rozměrová vhodnost, kompatibilita s řídicí jednotkou, ale i ekonomická stránka věci. Současně jsou uvedeny principy fungování vybraných prvků, aby bylo možné porozumět jejich úloze v rámci celého systému a objasnit jejich zapojení do řídicí struktury.

### 1.3.1 Vývojová deska

Výběr vývojové desky představuje klíčový bod při návrhu řídicí elektroniky manipulátoru. Jelikož celý systém vyžaduje současné připojení více periferních zařízení (joystick, displej, bezdrátový modul, drivery motorů), bylo nutné zvolit takovou platformu, která poskytuje dostatečný počet vstupně-výstupních pinů, stabilní provoz a širokou knihovni podporu.

V tomto projektu byly využity desky Arduino Mega 2560 a Arduino Nano. Arduino Mega je hlavní řídicí jednotkou, protože disponuje velkým množstvím digitálních i analogových vstupů a zároveň nabízí čtyři sériová rozhraní UART, což výrazně usnadňuje komunikaci s periferními zařízeními, jako je např. bezdrátový modul NRF24L01 nebo LCD displej. Oproti běžně používané desce Arduino Uno poskytuje Mega vyšší paměťovou kapacitu, více pinů a možnost paralelního připojení více zařízení bez potřeby přepínání sběrnic nebo použití multiplexerů. (Margolis, 2012)

Naopak Arduino Nano slouží v projektu jako podřízený mikrokontrolér, zejména v části ovladače, kde zajišťuje čtení hodnot z joysticku a odesílání dat přes bezdrátový modul. Díky svým malým rozměrům je vhodný pro mobilní část systému, kde je potřeba šetřit místem a hmotností. Kompatibilita s Arduino IDE a snadná integrace do návrhu umožnila rychlý vývoj a ladění obou částí systému. (Geddes, 2016)

Obě desky byly zvoleny také s ohledem na nízkou cenu, dostupnost náhradních kusů a rozsáhlou komunitní podporu, což v případě technického problému značně usnadňuje diagnostiku a opravu.

### 1.3.2 Stejnoseměrný motor

Stejnoseměrný motor (DC motor) je elektrický stroj, který přeměňuje stejnosměrný elektrický proud na mechanickou práci, obvykle ve formě rotačního pohybu. Pracuje na základě elektromagnetického principu – konkrétně na interakci mezi magnetickým polem a proudem ve vodiči. Základními částmi motoru jsou stator, rotor (kotva), komutátor a kartáče. Stator tvoří pevnou část motoru a vytváří stálé magnetické pole. Rotor je pohyblivá část, do které je přiveden elektrický proud pomocí kartáčů a komutátoru. Když proud prochází vinutím rotoru, vzniká v něm magnetické pole. Toto pole interaguje s polem statoru a vzniká síla, která otáčí rotor. (Tůma, 2006)

Komutátor zajišťuje pravidelné přepínání směru proudu ve vinutí rotoru, aby se rotor neustále otáčel stejným směrem. Kartáče, vyrobené většinou z uhlíku, slouží jako vodivý spoj mezi statorem a rotující částí motoru. Otáčky motoru lze regulovat změnou napětí nebo pomocí pulzně šířkové modulace (PWM). Při nízkých otáčkách má motor vysoký krouticí moment, což je výhodné při rozběhu nebo zátěži. Stejnosměrné motory mohou být s permanentními magnety nebo s budícím vinutím. Motory s převodovkou umožňují snížit otáčky a zároveň zvýšit sílu. Díky jednoduché konstrukci a snadnému řízení se DC motory používají v mnoha aplikacích. Patří sem pohony malých vozidel, ventilátory a roboti. Velkou výhodou je také možnost reverzace otáček změnou polaritu napájení. Motor je účinný, spolehlivý a snadno udržovatelný. (Tůma, 2006)

### 1.3.3 Převodovka pro elektromotory

Převodovky jsou důležitou součástí mnoha pohonů s elektromotorem, protože umožňují přizpůsobit otáčky a krouticí moment motoru požadavkům konkrétní aplikace. Zatímco elektromotor často pracuje při vysokých otáčkách s relativně nízkým točivým momentem, v praxi je často potřeba naopak – nízké otáčky a vysoký moment, například při rozjezdu, zvedání zátěže nebo při přesném řízení pohybu. (Mejstřík, 1986)

#### **Pomocí převodovky lze:**

- zvýšit točivý moment na výstupu,
- snížit otáčky hřídele,
- zvýšit plynulost a přesnost pohybu,
- nebo také změnit směr otáčení.

Typ převodovky se volí podle požadovaných vlastností – velikosti zařízení, přenášené síly, účinnosti i nároků na prostor.

#### **Základní typy převodovek:**

- Čelní převodovky – jednoduché a účinné řešení s přímým záběrem ozubených kol, používané pro rovnoběžné hřídele.
- Kuželové převodovky – vhodné pro přenos síly v pravém úhlu, často kombinované s dalšími stupni.
- Šnekové převodovky – umožňují velké převodové poměry v kompaktním těle, ale mají nižší účinnost.

- Planetové převodovky – kompaktní a velmi výkonné řešení s vysokým převodovým poměrem a nízkou hmotností.

### **Planetová převodovka**

Planetová převodovka se skládá z centrálního (slunečního) kola, několika planetových kol, která se otáčejí kolem něj, a vnějšího ozubeného věnce. Planety jsou uchyceny v tzv. nosiči, který může být vstupem, výstupem nebo pevnou částí – podle toho, jaký převodový poměr a směr otáčení je požadován. (Mejstřík, 1986)

### **Hlavní výhody planetové převodovky:**

- Vysoký převodový poměr při malých rozměrech,
- Vysoká nosnost a spolehlivost díky rozložení sil mezi více kol,
- Nízká hlučnost a vysoká účinnost,
- Možnost vícestupňového převodu bez výrazného zvětšení rozměrů.

Díky těmto vlastnostem jsou planetové převodovky oblíbené v robotice, mobilních pohonech, elektrokolech a také v manipulátorech letadel, kde je potřeba kompaktní, ale výkonné řešení schopné přenášet velké zatížení při nízkých otáčkách.

### **1.3.3 Drivery DC motoru**

Motorový driver je elektronické zařízení určené k řízení a kontrole elektromotorů. Jeho hlavní funkcí je převod nízkoúrovňových signálů z řídicí jednotky (např. mikrokontroléru) na vyšší úroveň potřebné pro pohon motoru. Drivery umožňují ovládat různé parametry motoru, jako jsou směr otáčení, rychlost, zrychlení a brzdění. (Dury, 2001)

### **Princip činnosti:**

Motorové drivery přijímají signály z řídicího systému a na základě těchto vstupů regulují napětí a proud dodávaný do motoru. Toho dosahují prostřednictvím různých technik, jako je pulzně šířková modulace (PWM), která umožňuje plynulou regulaci výkonu dodávaného do motoru. Drivery mohou být navrženy pro různé typy motorů, včetně stejnosměrných (DC) motorů, krokových motorů a střídavých (AC) motorů. (Tilšer, 2009)

### **Motorové drivery nacházejí široké uplatnění v různých oblastech, jako jsou:**

- Robotika: Pro přesné ovládání pohybů robotických ramen a mobilních platforem.

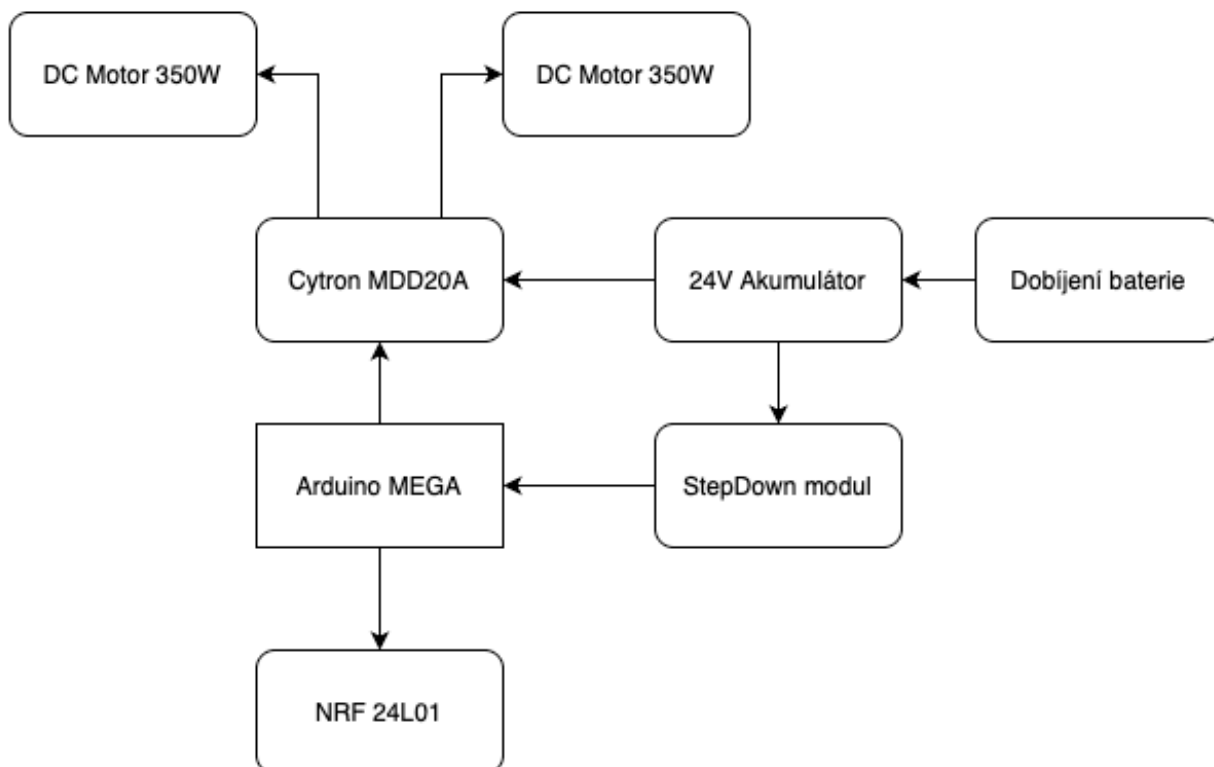
- Automatizace: V průmyslových systémech pro řízení dopravníků, ventilátorů a čerpadel.
- Automobilový průmysl: V elektrických vozidlech pro řízení trakčních motorů.
- Domácí spotřebiče: V pračkách, klimatizacích a dalších zařízeních vyžadujících řízení motorů.

## 2 PRAKTICKÁ ČÁST

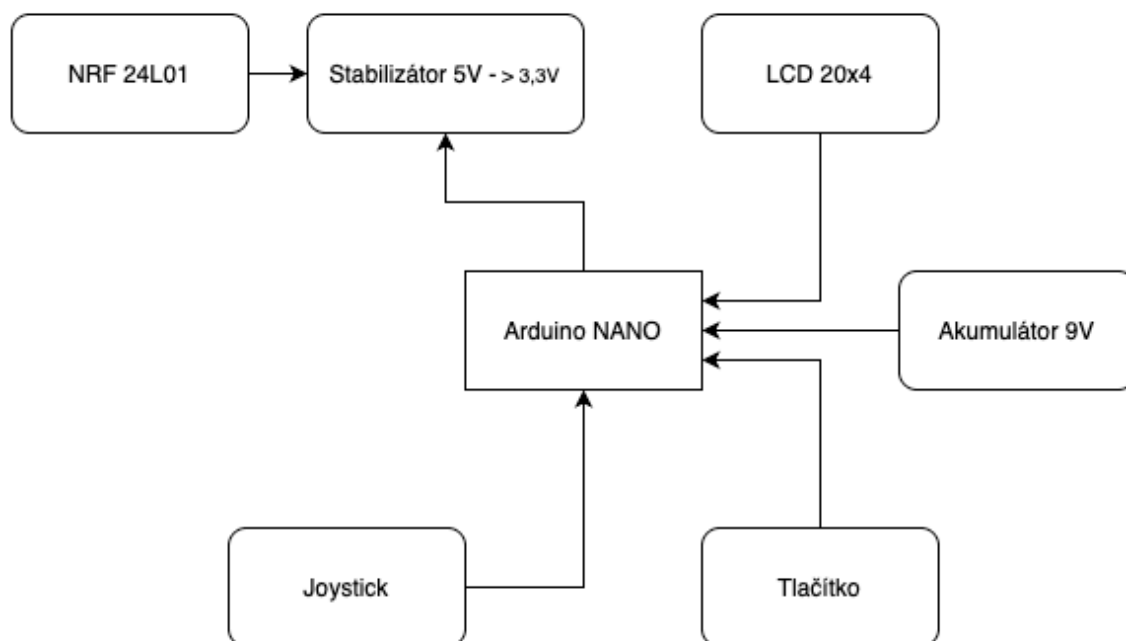
Praktická část se věnuje realizaci funkčního zařízení na základě požadavků stanovených v návrhové fázi. Cílem bylo přenést teoretický koncept do konkrétní podoby sestaveného manipulátoru, který bude funkční, stabilní a ovladatelný v reálných podmínkách. V této části je podrobně popsán postup sestavení systému, zapojení jednotlivých elektronických prvků, struktura programu řídicí jednotky a výsledky testování. Každý dílčí krok vývoje je doložen nejen technickým řešením, ale i praktickými poznatky získanými při montáži a zprovoznění.

### 2.1 Návrh elektroniky manipulátoru

Návrh elektronické části manipulátoru je klíčovou součástí celkové konstrukce, protože zajišťuje veškerou řídicí logiku, napájení komponent a vzájemnou komunikaci mezi pojezdovou jednotkou a ručním ovladačem. Elektronické řešení bylo navrženo s důrazem na spolehlivost, jednoduchou montáž a bezpečnost provozu.



Obrázek 13: Schéma elektroniky manipulátoru (VLASTNÍ, 2025)



Obrázek 14: Schéma elektroniky ovladače (VLASTNÍ, 2025)

### 2.1.1 Napájení manipulátoru a ovladače

#### Napájení manipulátoru

Hlavní část manipulátoru je napájena pomocí dvou 12 V trakčních olovených baterií s kapacitou 14 Ah, zapojených do série za účelem dosažení celkového napětí 24 V. Tyto trakční baterie jsou určeny pro hluboké vybíjení a dlouhodobé proudové zatížení, což je předurčuje k využití v pohonných jednotkách mobilních zařízení. Oproti běžným startovacím bateriím poskytují lepší výkonovou stabilitu a více cyklů při opakovaném vybíjení a nabíjení.

Z této bateriové sestavy jsou napájeny motorové drivery Cytron MDD20A, které řídí motory pomocí PWM signálu. Pro napájení řídicí elektroniky (Arduino Mega 2560 a modul NRF24L01+) je použito DC-DC step-down měniče, který snižuje napětí z 24 V na 9 V. Tímto oddělením jsou citlivé logické komponenty chráněny před kolísáním napětí způsobeným náhlou změnou zatížení motorů

#### Napájení ovladače

Ruční ovladač je napájen pomocí jedné 9 V baterie, která zajišťuje napájení Arduino Nano, bezdrátového modulu NRF24L01+ a také LCD displeje 20x4. Arduino Nano je napájeno přes VIN vstup a interně si stabilizuje napětí na 5 V, ze kterého jsou napájeny i ostatní komponenty.

Modul NRF24L01+ je napájen z 5 V výstupu Arduina přes externí LDO stabilizátor, který snižuje napětí na 3,3 V, čímž je zajištěn stabilní a bezchybný provoz modulu.

Joystick PS2 je napájen také z 5 V výstupu Arduina a vzhledem ke své minimální spotřebě neovlivňuje ostatní části.

LCD displej 20×4 s I2C rozhraním je napájen z Arduina 5 V. Napájení displeje včetně podsvícení je realizováno bez dodatečné regulace, protože komponenta bez problémů zvládá napětí z interního 5 V zdroje Arduina.

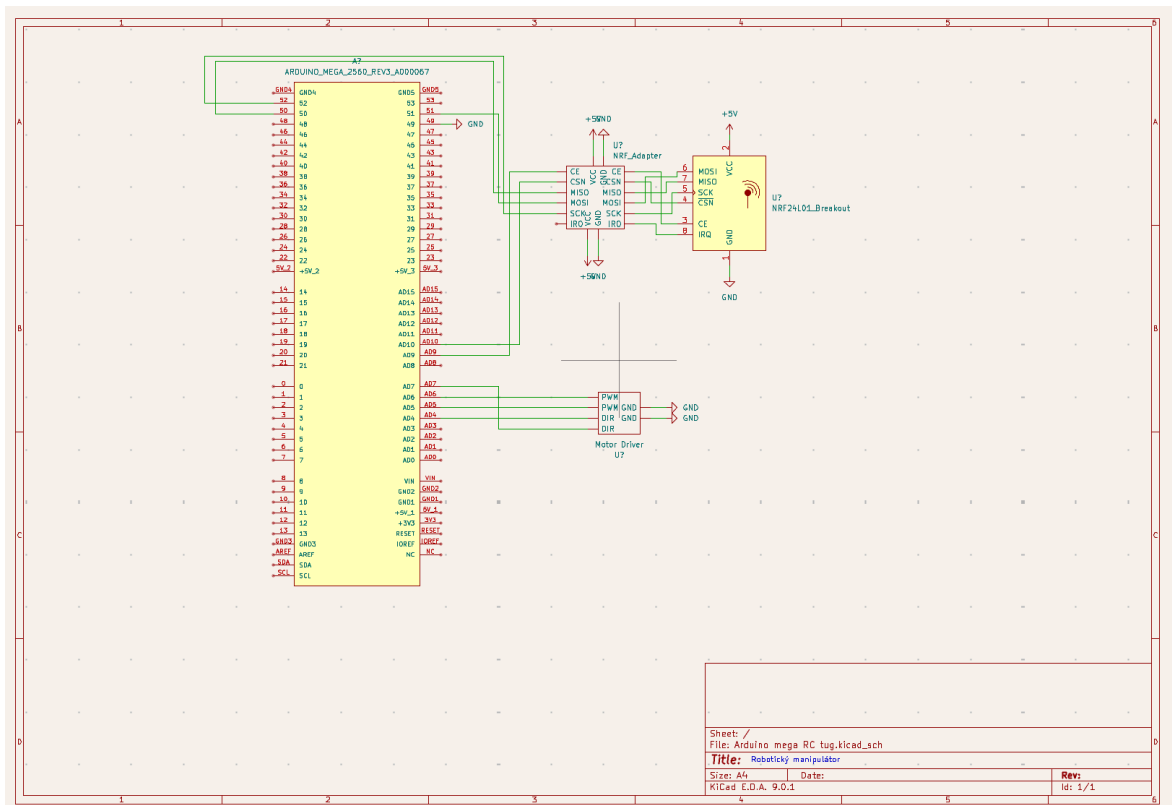
Napájecí část ovladače je navržena jako jednoduchá a spolehlivá. Baterie lze snadno vyměnit a vypínač zajišťuje okamžité odpojení napájení při nečinnosti. Celý napájecí systém byl navržen s ohledem na minimální spotřebu a jednoduchou obsluhu v terénu.

### **2.1.2 Řídicí jednotka manipulátoru**

Základem řízení celého systému je vývojová deska Arduino Mega 2560, která slouží jako centrální jednotka manipulátoru. Tento mikrokontrolér byl zvolen především pro svou vysokou kompatibilitu s externími moduly, velký počet digitálních i analogových vstupně-výstupních pinů, podporu více sériových rozhraní (UART) a také pro rozšířenou paměťovou kapacitu, která umožňuje provoz více funkcí najednou bez ohrožení stability. Díky rozměrové dostupnosti a široké komunitní podpoře bylo Arduino Mega ideálním řešením pro komplexní řízení mobilního manipulátoru. Zapojení je možné vidět na obrázku číslo 15

Arduino Mega je přímo propojeno s motorovými drivery Cytron MDD20A, přičemž každý driver je ovládán dvojicí signálů: PWM (pro regulaci otáček) a DIR (pro řízení směru otáčení). Levý a pravý motor jsou řízeny nezávisle, což umožňuje diferenční řízení celého vozíku. PWM výstupy jsou generovány ze softwarového řízení na základě přijatých dat z ovladače. Směrové piny (DIR) určují směr pohybu každého motoru zvlášť – vpřed nebo vzad.

Z hlediska komunikačních rozhraní je na desku připojen bezdrátový modul NRF24L01+, a to pomocí SPI sběrnice. Data přijímaná tímto modulem z ručního ovladače jsou dále zpracovávána řídicím programem, který na jejich základě vyhodnocuje rychlost i směr otáčení obou motorů. Při detekci výpadku komunikace nebo neplatných dat se aktivuje bezpečnostní režim, ve kterém jsou motory okamžitě zastaveny a systém přechází do klidového stavu.



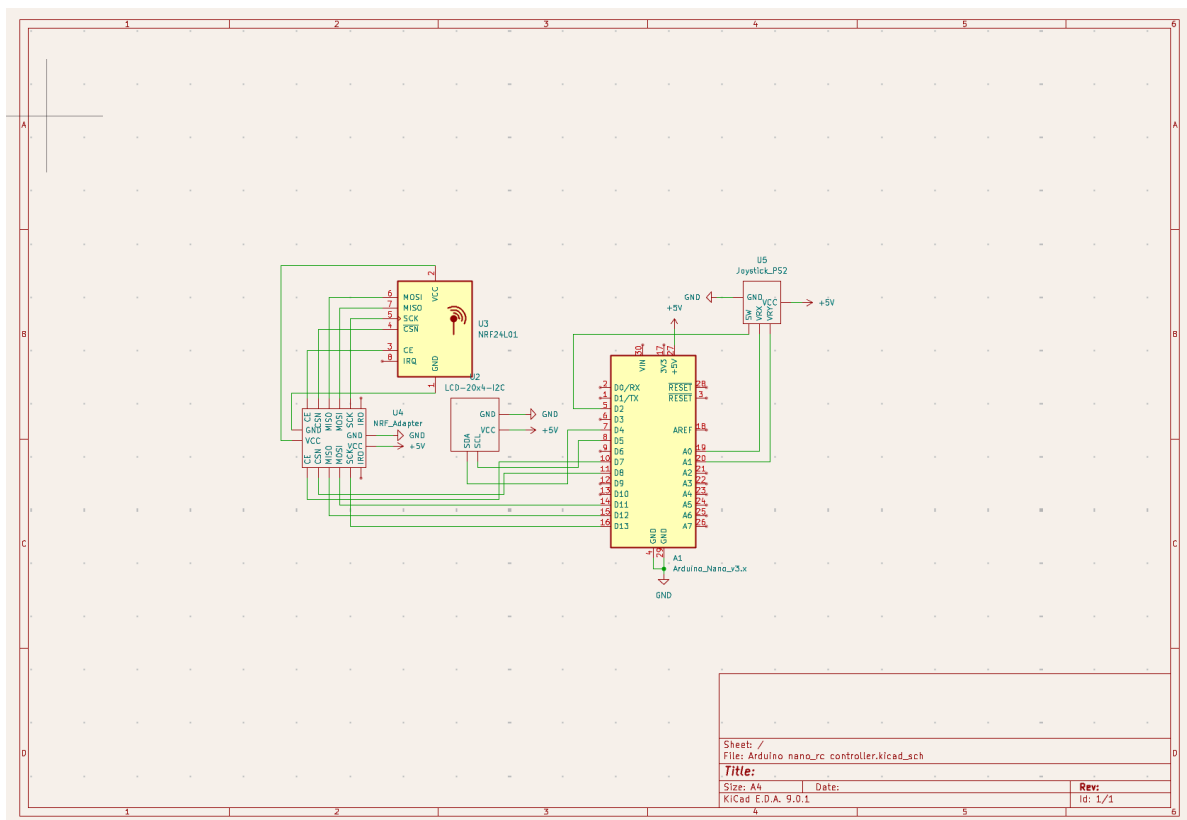
Obrázek 15: Zapojení elektroniky manipulátoru (VLASTNÍ, 2025)

Arduino Mega je umístěno v chráněné části rámu manipulátoru, připevněno na odizolovanou základovou desku a osazeno rozšiřujícím modulem typu terminal shield, který zajišťuje pevné uchycení vodičů pomocí šroubovacích svorek. Toto řešení významně přispívá ke spolehlivosti připojení během provozu a zabraňuje náhodnému vypadávání kabelů při vibracích nebo manipulaci se zařízením. a propojeno pomocí šroubovacích konektorů. Napájení je vedeno z 24 V větve přes step-down měnič, čímž je zajištěno stabilní 9 V napájení i při kolísání hlavního napětí.

### 2.1.3 Ovládací prvky a bezdrátový přenos

Ruční ovladač slouží jako hlavní vstupní zařízení obsluhy, které bezdrátově přenáší povely k manipulátoru. Základem této jednotky je vývojová deska Arduino Nano, která zajišťuje zpracování analogových vstupů z joysticku PS2 a následné odesílání dat pomocí modulu NRF24L01+.

Joystick PS2 je tvořen dvěma potenciometry (každý s odporem 10 k $\Omega$ ), které mění svůj odpor v závislosti na vychýlení páčky ve dvou osách: osa X (levý/pravý směr) a osa Y (vpřed/vzad). Napěťový dělič na každé ose generuje analogový signál v rozsahu přibližně 0 V až 5 V, který je přiveden na analogové vstupy A0 a A1 Arduino Nano. Ve středové poloze joysticku je výstupní napětí zhruba 2,5 V (hodnota kolem 512 při 10bitovém ADC), což je interpretováno jako „žádný pohyb“.



Obrázek 16: Zapojení elektroniky ovladače (VLASTNÍ, 2025)

Firmware na Arduino Nano provádí převod těchto hodnot na digitální čísla v rozsahu 0–1023 a následně je upravuje podle definovaných prahových hodnot. Pro eliminaci drobných výkyvů (šum v klidové poloze) je nastavena mrtvá zóna, typicky  $\pm 5\%$  okolo středu. Pokud je vychýlení joysticku mimo tuto oblast, hodnota je znormalizována do rozsahu 0–255 a rozdělena mezi levou a pravou pojezdovou větev. Na základě poměru hodnot osy X a Y je určeno směřování signálu pro každý motor (např. zatačení, otáčení na místě, jízda vpřed/vzad).

Výstupní data jsou před odesláním upravena podle nelineární převodní funkce, která zajišťuje exponenciální růst výstupní hodnoty PWM. To znamená, že při malém vychýlení joysticku se mění PWM velmi pomalu, čímž je dosaženo vysoké citlivosti při jemném manévrování. Naopak při plném vychýlení joysticku roste hodnota PWM rychleji a umožňuje dosažení plného výkonu. Tento přístup výrazně zvyšuje ovladatelnost zařízení zejména při pomalých, přesných manévrech v těsných prostorách, např. při zasouvání letadla do hangáru.

Po zpracování dat Arduino Nano sestaví datový paket obsahující výkon a směr pro levý i pravý motor a odešle jej pomocí modulu NRF24L01+. Tento bezdrátový modul komunikuje v pásmu 2,4 GHz a je připojen k Arduino přes SPI sběrnici (piny D10–D13). Pro stabilní napájení 3,3 V je mezi Arduino a modul zařazen LDO stabilizátor. Odesílání probíhá

periodicky v intervalu cca 20 ms, což zajišťuje nízkou latenci mezi akcí joysticku a reakcí manipulátoru.

Zvláštní důraz je kladen na okamžitou reakci systému při návratu joysticku do neutrální polohy. Pokud jsou hodnoty obou os v rozsahu mrtvé zóny, generuje Arduino nulový výkon pro oba motory a data s hodnotou STOP jsou odeslána bez zpoždění. Tímto způsobem je vozík schopen prakticky ihned zastavit, což je klíčové pro bezpečný provoz v omezených prostorách a při manévrování okolo drahého leteckého vybavení.

Součástí ovladače je také LCD displej 20×4 znaky, připojený pomocí I<sup>2</sup>C sběrnice (piny A4 a A5). Tato sběrnice umožňuje komunikaci po pouhých dvou vodičích – datové lince (SDA) a hodinové lince (SCL), což výrazně šetří počet použitých pinů na mikrokontroleru. Vzhledem k omezenému množství volných vstupně-výstupních pinů na Arduino Nano je použití I<sup>2</sup>C klíčové pro zachování jednoduchého a přehledného zapojení. Sběrnice I<sup>2</sup>C pracuje na principu adresování zařízení, přičemž každý připojený modul má přiřazenu unikátní adresu, díky čemuž lze provozovat více zařízení (např. displej, senzory) na stejné lince bez rušení.

Na displeji jsou zobrazovány informace o výkonu levého a pravého motoru, aktuálním směru pohybu a případné chybové stavy komunikace. Aktualizace displeje probíhá synchronně s odesíláním dat. Díky sběrnici I<sup>2</sup>C je komunikace s displejem rychlá, efektivní a nenáročná na implementaci. Displej poskytuje uživateli zpětnou vazbu a umožňuje rychlou orientaci při řízení manipulátoru.

#### **2.1.4 Řízení motoru**

K řízení pohybu manipulátoru slouží dvojice stejnosměrných motorů, připojených na výstupy dvoukanálového driveru Cytron MDD20A. Každý motor má vlastní řídicí kanál, který je ovládán ze strany Arduino Mega pomocí dvou signálů – PWM (Pulse Width Modulation) pro nastavení výkonu a DIR (Direction) pro určení směru otáčení. Výhodou tohoto řešení je vysoká jednoduchost, robustnost a plynulé řízení rychlosti bez nutnosti složitých regulačních obvodů.

Na základě dat přijatých přes modul NRF24L01+ (vysílaných joystickem) Arduino Mega okamžitě vypočítá výstupní hodnoty PWM pro levý i pravý motor. Hodnota PWM je v rozsahu 0–255 a určuje efektivní napětí přivedené na svorky motoru. Směr otáčení je řízen binárním stavem logické úrovně pinu DIR – stav HIGH odpovídá otáčení vpřed, stav LOW otáčení vzad.

Řízení pohybu probíhá ve diferenciálním režimu, což znamená, že každý motor je ovládán nezávisle. Pokud jsou hodnoty PWM shodné, pohybuje se manipulátor rovně. Pokud jedna hodnota je vyšší než druhá, dochází k zatáčení – při extrémním rozdílu (např. jeden motor stojí, druhý jede) se vozík otáčí na místě. Tato metoda řízení poskytuje vysokou manévrovatelnost bez potřeby mechanického natáčení kol nebo použití servopohonů.

PWM signály jsou generovány přímo z Arduina pomocí softwarové funkce `analogWrite()`. Výstupy jsou připojeny na digitální piny s podporou PWM a optimalizovány pro 8bitové rozlišení, což poskytuje dostatečnou citlivost pro řízení výkonu. Vzhledem ke konstrukci vozíku a jeho určení pro přesnou manipulaci byl kladen důraz na jemné ovládání při nízkých rychlostech – proto je výpočet PWM hodnoty založen na exponenciální převodní funkci. Tím je zajištěno, že v malém rozsahu pohybu joysticku dochází k pozvolnému nárůstu výkonu, zatímco při plném vychýlení páčky je dosaženo maximální rychlosti.

V systému je také implementováno logické ošetření výpadku dat – pokud Arduino nedostane během definovaného intervalu nový datový rámec, automaticky vynuluje PWM signály a deaktivuje směrové piny. Tím dojde k okamžitému zastavení motorů. Díky tomu je zajištěna bezpečnost provozu i v případě výpadku komunikace nebo poruchy ovladače.

Celkové řešení řízení motorů je navrženo tak, aby bylo jednoduché, modulární a snadno servisovatelné. Použití standardních signálů PWM a DIR umožňuje snadnou výměnu driveru nebo upgrade systému bez nutnosti přepisování řídicího kódu.

## 2.2 Návrh rámu a konstrukční uspořádání

Hlavní nosnou část manipulátoru tvoří rám sestavený z hliníkových profilů o průřezu 30×30 mm s drážkou 8 mm. Tento typ profilů byl zvolen s ohledem na jejich nízkou hmotnost, vysokou mechanickou pevnost, odolnost vůči korozi a modulární charakter, který umožňuje snadnou montáž, úpravy a servisní zásahy bez nutnosti svařování.

Konstrukce rámu má půdorysné rozměry 85 cm na délku a 50 cm na šířku. Výška rámu je navržena tak, aby byla dostatečně nízká pro zasunutí pod příďová kola menších letadel, přičemž zároveň poskytuje dostatečnou průchodnost terénem, jako je například práh hangáru.

Rám je sestaven z obvodových profilů a několika vnitřních příček, které zajišťují torzní tuhost konstrukce. Výztužná příčka je umístěna pod středem rámu, čímž je dosaženo rovnoměrného rozložení sil a minimalizace deformací při zatížení. Jednotlivé profily jsou spojeny pomocí T-matic a ocelových úhelníků, což umožňuje pevné a přesné spoje bez nutnosti navařování a zároveň poskytuje možnost demontáže nebo přestavby.

Manipulátor je opatřen třemi koly. V zadní části rámu jsou umístěna dvě pojezdová kola s rozetami, která jsou přímo poháněna stejnosměrnými motory. Motory jsou umístěny v přední části manipulátoru a jejich výkon je přenášěn na kola pomocí řetězového převodu. Třetí, přední kolo je otočné o 360 stupňů, čímž je umožněno snadné manévrování v omezených prostorech hangáru. Toto kolo zajišťuje stabilitu manipulátoru a zároveň podporuje změnu směru při zatáčení.

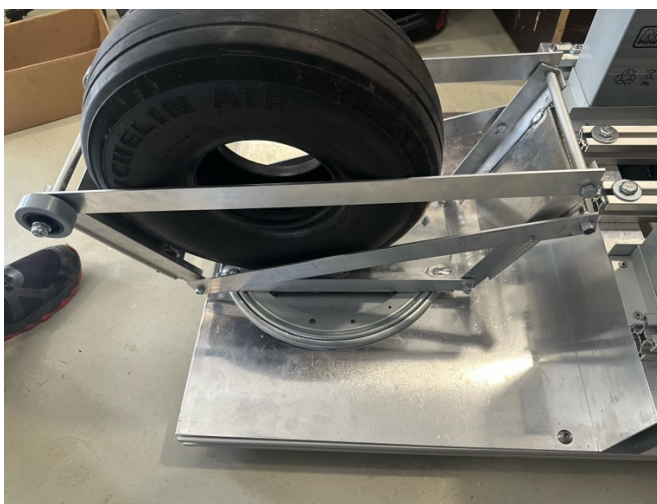


Obrázek 17: Uchycení předního kola manipulátoru (VLASTNÍ, 2025)



Obrázek 18: Uchycení zadního kola manipulátoru (VLASTNÍ, 2025)

Uprostřed rámu, spíše v zadní části, je umístěn otočný disk (točna), který slouží jako základ pro uchycení předového kola letadla. Točna umožňuje volné natáčení letadla při manipulaci, což výrazně usnadňuje přesné zasunutí letounu do požadované pozice. Umístění točny bylo zvoleno tak, aby byla zajištěna optimální rovnováha celého systému a minimální zatížení jednotlivých kol manipulátoru.



Obrázek 19: Točna na předové kolo letadla (VLASTNÍ, 2025)

Celkový návrh rámu klade důraz na nízkou hmotnost, vysokou stabilitu, odolnost vůči deformacím a snadnou montáž. Konstrukce také umožňuje jednoduchou výměnu nebo opravu jednotlivých komponent, což je důležité pro dlouhodobý provoz v běžném aeroklubovém prostředí.

### 2.2.1 Montáž a krytí elektroniky

Veškerá řídicí elektronika manipulátoru je soustředěna do plastové krabičky, která je pevně uchycena k hlavní konstrukci rámu v přední části manipulátoru. Tato krabička slouží k ochraně citlivých elektronických komponent před mechanickým poškozením, prachem a náhodným kontaktem s ostatními částmi zařízení.



Obrázek 20: Umístění elektroniky v přední části manipulátoru (VLASTNÍ, 2025)

Uvnitř krabičky je umístěna řídicí jednotka Arduino Mega 2560, rozšiřující terminal shield a dvojice motorových driverů Cytron MDD20A. Všechny prvky jsou upevněny tak, aby bylo minimalizováno jejich pohybování během provozu. Použití terminal shieldu zajišťuje pevné uchycení vodičů pomocí šroubovacích svorek, což eliminuje riziko vypadnutí spojů vlivem manipulace nebo vibrací během pohybu.

Také ruční ovladač, který obsahuje Arduino Nano, joystick PS2, modul NRF24L01+ a LCD displej 20×4, je instalován do samostatné plastové krabičky. Krabička zajišťuje ochranu před mechanickým poškozením, náhodným odpojením vodičů a také zpřehledňuje celkovou konstrukci ovladače. Všechny komponenty jsou uvnitř upevněny tak, aby nedocházelo k jejich pohybu při manipulaci.

Kabeláž u obou jednotek je vedena odděleně. Výkonová část (napájení motorů) je oddělena od signální části (vodiče k NRF24L01+, joysticku, LCD displeji), což přispívá ke snížení elektromagnetického rušení a ke zvýšení spolehlivosti a stability systému.

I když manipulátor není vybaven speciálními tlumiči vibrací (např. silentbloky), konstrukce rámu a samotné uložení krabičky jsou dimenzovány tak, aby bylo odolné vůči běžným provozním otřesům. Vzhledem k charakteru pohybu manipulátoru, kde nedochází k prudkým nárazům nebo velkým vibracím, je toto řešení plně dostačující a nehrozí uvolnění součástí ani vodičů během provozu.

Krabičky jsou navrženy tak, aby umožňovaly snadný servis – například při výměně Arduino desky nebo při potřebě odpojení driveru či ovladače. Přístup k jednotlivým součástem je umožněn odstraněním víka, aniž by bylo nutné demontovat celou konstrukci manipulátoru nebo ovladače.

### **2.2.3 Servisní přístup k zařízení**

Při návrhu manipulátoru byl kladen důraz nejen na funkčnost a robustnost konstrukce, ale také na její servisní přístupnost a jednoduchou údržbu. Všechny hlavní komponenty jsou umístěny tak, aby bylo možné jejich snadné odpojení, výměnu nebo kontrolu bez nutnosti rozebírat celou konstrukci.

Krabičky s elektronikou, obsahující Arduino Mega, driver Cytron MDD20A a další prvky, jsou pevně uchyceny k rámu pomocí šroubů. Tyto krabičky mají odnímatelná víka, což umožňuje přístup k vnitřním komponentám bez demontáže celého držáku. Kabely jsou připojeny pomocí šroubovacích svorek terminal shieldu, díky čemuž je možné jednotlivé vodiče snadno odpojit a opět připojit bez pájení nebo speciálního nářadí.

Motory a kola jsou přišroubovány přímo skrz hliníkový profil rámu. Hlavní šrouby, které zajišťují motorové jednotky a držáky kol, jsou dobře přístupné z boční strany rámu. Tím je zajištěna rychlá demontáž motoru nebo jeho výměna, například v případě mechanického poškození nebo potřeby servisu.

Trakční baterie jsou uchyceny pomocí páskového popruhu, který je pevně utažen kolem těla baterie a fixován k rámu. Toto řešení zajišťuje bezpečné držení během provozu a zároveň umožňuje velmi rychlou výměnu baterie bez nutnosti odpojování dalších částí konstrukce. Kabelové propojení baterie je řešeno přes odpojitelné konektory, které rovněž přispívají k jednoduchosti servisního zásahu.

Celá konstrukce rámu je navržena jako modulární, tedy složená z profilů spojených T-maticemi a ocelovými úhelníky. Díky tomu je možné jednotlivé části konstrukce snadno demontovat nebo upravit bez nutnosti svařování či broušení. Tato flexibilita je výhodná nejen při prototypování, ale i při případné modernizaci nebo opravách zařízení.

## 2.3 Program

Software použitý v projektu tvoří zásadní část celého systému, neboť zabezpečuje příjem dat od uživatele, jejich vyhodnocení a následné řízení pohybu manipulátoru. Programové vybavení bylo navrženo s důrazem na jednoduchost, spolehlivost, rychlou odezvu a bezpečnost provozu. Systém je rozdělen do dvou samostatných částí: program pro řídicí jednotku manipulátoru a program pro ruční ovladač.

Řídicí jednotka manipulátoru (Arduino Mega 2560) je zodpovědná za příjem dat o požadovaném směru a rychlosti jízdy, jejich interpretaci a následné řízení výkonu jednotlivých motorů pomocí PWM signálů. Kromě toho je implementována logika bezpečnostního zastavení v případě ztráty komunikace s ovladačem.

Ruční ovladač (Arduino Nano) slouží k čtení hodnot z joysticku, jejich předzpracování a bezdrátovému odesílání dat k manipulátoru prostřednictvím modulu NRF24L01+. Navíc poskytuje uživateli zpětnou vazbu o aktuálním stavu vysílaných hodnot prostřednictvím LCD displeje.

### 2.3.1 Program Arduino Mega 2560

Program běžící na Arduino Mega 2560 zajišťuje příjem bezdrátových dat o požadovaném směru a rychlosti od ovladače, jejich interpretaci a generování příslušných PWM a DIR signálů pro řízení motorů.

Po inicializaci vstupních/výstupních pinů a nastavení komunikace NRF24L01+ modul přechází do režimu poslouchání dat:

```
radio.begin();
radio.openReadingPipe(1, address);
radio.setPALevel(RF24_PA_MIN);
radio.startListening();
```

V hlavní smyčce programu loop() je neustále kontrolována dostupnost nových dat. Po přijetí paketu jsou hodnoty rozděleny pro levý a pravý motor. Na základě znaménka hodnoty se nastavuje směr motoru (DIR pin) a podle velikosti se generuje PWM signál:

```
if (radio.available()) {
    int8_t data[2];
    radio.read(&data, sizeof(data));

    int m1 = data[0];
    int m2 = data[1];

    int pwm1 = map(abs(m1), 0, 100, 0, 255);
    int pwm2 = map(abs(m2), 0, 100, 0, 255);

    digitalWrite(M1_DIR, m1 >= 0);
    analogWrite(M1_PWM, m1 != 0 ? pwm1 : 0);

    digitalWrite(M2_DIR, m2 >= 0);
    analogWrite(M2_PWM, m2 != 0 ? pwm2 : 0);
}
```

Důležitou součástí programu je implementovaná ochrana proti výpadku spojení. Pokud Arduino Mega během předem definovaného časového intervalu (300 ms) neobdrží nový datový paket, automaticky vynuluje PWM výstupy a tím zastaví motory:

```
if (now - lastReceive > timeout) {
    analogWrite(M1_PWM, 0);
    analogWrite(M2_PWM, 0);
}
```

Tato bezpečnostní funkce významně přispívá k ochraně obsluhy i samotného letadla při případném přerušení bezdrátové komunikace.



Obrázek 21: Vývojový diagram programu manipulátoru (VLASTNÍ, 2025)

### 2.3.2 Program Arduino NANO

Program na Arduino Nano slouží k načítání vstupních hodnot z joysticku, jejich zpracování a bezdrátovému odesílání řídicích dat k manipulátoru prostřednictvím NRF24L01+.

Po inicializaci displeje, modulu NRF24L01+ a analogových vstupů joysticku je v hlavní smyčce loop() prováděno pravidelné načítání dat každých 30 ms. Inicializace displeje a vysílače probíhá následovně:

```
lcd.init();  
lcd.backlight();  
  
radio.begin();  
radio.openWritingPipe(address);  
radio.setPALevel(RF24_PA_MIN);  
radio.stopListening();
```

Joystick je připojen na analogové vstupy A0 (osa X) a A1 (osa Y). Tyto hodnoty jsou přečteny a normalizovány do rozsahu -100 až 100:

```
int x = analogRead(JOY_X);  
int y = analogRead(JOY_Y);  
  
int xVal = map(x, 0, 1023, -100, 100);  
int yVal = map(y, 0, 1023, -100, 100);
```

Pro eliminaci drobných odchylek v klidové poloze je implementována mrtvá zóna  $\pm 5\%$ , která zamezuje nechtěnému spouštění motorů:

```
if (abs(xVal) < deadZone) xVal = 0;  
if (abs(yVal) < deadZone) yVal = 0;
```

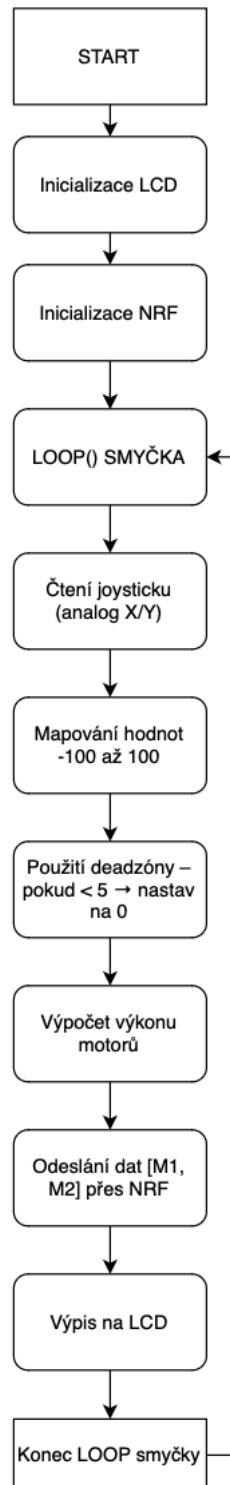
Výpočty hodnot pro jednotlivé motory jsou realizovány součtem a rozdílem hodnot z osy X a Y, čímž je umožněno plnohodnotné diferenciální řízení:

```
int8_t m1 = constrain(xVal + yVal, -100, 100);  
int8_t m2 = constrain(xVal - yVal, -100, 100);
```

Vypočítané hodnoty jsou následně odeslány pomocí NRF24L01+ k manipulátoru:

```
int8_t data[2] = {m1, m2};  
radio.write(&data, sizeof(data));
```

Pro zpětnou vazbu je využit LCD displej 20x4 znaky. Displej zobrazuje aktuální stav obou motorů, směr jízdy (vpřed, vzad, zastavení) a velikost výkonu v procentech. Aktualizace displeje probíhá současně s odesíláním dat, čímž je zajištěna synchronizace zobrazených a vysílaných informací.



Obrázek 22: Vývojový diagram ovladače (VLASTNÍ, 2025)

Při vychýlení joysticku roste hodnota PWM exponenciálně, což umožňuje jemné ovládání při malých výchylkách páčky a rychlý nárůst výkonu při plném vychýlení. Tento přístup zajišťuje přesné a plynulé řízení manipulátoru v různých provozních režimech.

## **2.4 Testování manipulátoru**

Tato kapitola se zaměřuje na ověření funkčnosti navrženého manipulátoru v reálném provozu. Cílem testování bylo prověřit reakce systému na ovládací povely, stabilitu konstrukce při jízdě, spolehlivost bezdrátové komunikace a výdrž napájecího systému. Dále byly sledovány vybrané technické parametry, jako je maximální rychlost, dosah spojení a reakční doba na pohyb joysticku. V závěru jsou jednotlivé poznatky vyhodnoceny a zhodnocena celková funkce zařízení z hlediska přesnosti, bezpečnosti a provozní spolehlivosti.

### **2.4.1 Průběh testování**

Testování funkčního prototypu manipulátoru probíhalo ve dvou hlavních fázích – v hale na pevném rovném povrchu a následně na travnaté ploše letiště. Cílem bylo ověřit všechny základní funkce zařízení v podmínkách, které odpovídají reálnému provozu v hangárech a jejich okolí.

V první fázi testování byl manipulátor provozován na betonu v uzavřeném prostoru, kde byly prověřeny základní jízdní režimy: přímá jízda vpřed, přímá jízda vzad, zatáčení a otáčení na místě. Při těchto zkouškách bylo sledováno, jak manipulátor reaguje na vychýlení joysticku, s jakou plynulostí a přesností mění směr jízdy a jaká je odezva systému na povely uživatele.

Druhá fáze testování probíhala venku na travnatém povrchu, který klade vyšší nároky na pohon a stabilitu podvozku. Cílem bylo zjistit, zda manipulátor zvládne pohyb na nerovném terénu bez ztráty kontroly nebo významného snížení ovladatelnosti. Testy zahrnovaly jak volnou jízdu po trávě, tak simulaci manipulace s připojenou zátěží.

Při testování nebyla na manipulátoru instalována reálná zátěž v podobě příďového kola letadla, ale byly ověřeny všechny mechanické a řídicí funkce v simulovaných podmínkách. Sledovány byly zejména rychlost odezvy systému na povely joysticku, plynulost jízdy, schopnost udržet směr i při mírném náklonu podvozku a stabilita při změně směru.

V rámci testování bylo rovněž pozorováno chování manipulátoru při ztrátě signálu – například umělým vypnutím ovladače. Ověřena byla správná funkce nouzového zastavení, kdy systém ihned vynuluje PWM signály a zastaví pohon obou motorů.

### **2.4.2 Výsledky testování**

Výsledky testování ukázaly, že manipulátor plně splňuje požadavky stanovené v návrhu a konstrukční části projektu.

Manipulátor vykazoval rychlou odezvu na povely joysticku. Při malém vychýlení páčky docházelo k jemnému a plynulému rozjezdu vozíku, zatímco při větším vychýlení joysticku byla patrná progresivní akcelerace, jak bylo zamýšleno díky implementované exponenciální charakteristice. Přesnost ovládání byla velmi dobrá, a to jak při přímé jízdě vpřed a vzad, tak při zatáčení nebo otáčení na místě.

Stabilita konstrukce během provozu byla výborná. Rám manipulátoru vykazoval dostatečnou tuhost i při prudších změnách směru a nebyly pozorovány žádné známky

deformace či nadměrného kroucení. Přední otočné kolo umožňovalo plynulé a snadné manévrování v omezeném prostoru, včetně provádění ostrých obrátů.

Bezdrátová komunikace pomocí modulu NRF24L01+ byla stabilní v celém testovaném dosahu. Při provozu v hale byl dosah bez problémů přes 50 metrů, na otevřeném travnatém prostranství dosahoval spojení vzdálenosti až přibližně 80–100 metrů bez ztráty signálu. Během testů nebyly zaznamenány žádné samovolné výpadky spojení.

Implementovaná bezpečnostní logika pro nouzové zastavení v případě ztráty komunikace fungovala správně. Při umělém přerušení spojení (vypnutí ovladače) vozík okamžitě zastavil a neprováděl žádné nevyžádané pohyby, což významně přispívá k bezpečnosti provozu manipulátoru.

Spotřeba energie během testování ukázala, že trakční baterie umožňují přibližně 1,5 až 2 hodiny souvislého provozu při běžném zatížení, což je plně dostačující pro potřeby manipulace letadel v běžném aeroklubovém prostředí.

Na travnatém povrchu byl pohyb manipulátoru mírně omezen vyšším odporem terénu, což je očekávané vzhledem k charakteru vozíku. Přesto manipulátor zachoval dostatečnou ovladatelnost a nebylo nutné provádět žádné zásadní úpravy pohonu.

Celkově bylo potvrzeno, že manipulátor je schopen bezpečně a efektivně plnit svou funkci a reaguje spolehlivě na uživatelské pokyny.

### **2.4.3 Sledované hodnoty manipulátoru**

Během testování manipulátoru byla provedena i orientační měření některých klíčových provozních parametrů, které charakterizují funkčnost a výkonnost systému v reálném provozu.

#### **Maximální rychlost manipulátoru**

Při plném vychýlení joysticku v ose vpřed/vzad a při provozu na rovném pevném povrchu (beton) dosahoval manipulátor maximální rychlosti pohybu přibližně 1,5 metru za sekundu. Tato hodnota je vzhledem k účelu zařízení více než dostatečná a umožňuje bezpečné manévrování v omezených prostorách hangáru.

#### **Reakční doba systému**

Reakční doba od vychýlení joysticku po rozjezd manipulátoru byla prakticky okamžitá – do 30 ms, což je na úrovni lidského vnímání prakticky nepostřehnutelné zpoždění. Také při návratu joysticku do neutrální polohy došlo k okamžitému zastavení manipulátoru, což výrazně zvyšuje bezpečnost provozu.

### **Dosah bezdrátové komunikace**

Bezdrátová komunikace mezi ovladačem a manipulátorem, realizovaná pomocí modulu nRF24L01+ PA + LNA s externí anténou, umožňovala velmi vysoký dosah. V otevřeném prostoru bez překážek byl odhadovaný maximální dosah komunikace až 1000 metrů.

Při provozu v běžném letištním prostředí (např. v hangáru nebo na přilehlém prostranství s částečnými překážkami) byla stabilní komunikace spolehlivá na vzdálenost 200 až 250 metrů, což je pro manipulaci v hangárech a na stojánkách plně dostačující.

### **Výdrž bateriového systému**

Trakční baterie o kapacitě 14 Ah umožnily provoz manipulátoru v délce přibližně 1,5 až 2 hodin nepřetržitého provozu při běžném režimu (časté změny směru, částečné zatížení). Tato hodnota odpovídá předpokladům a poskytuje dostatek provozního času pro manipulaci více letadel bez nutnosti dobíjení či výměny baterie.

#### 2.4.4 Vyhodnocení testování

Na základě provedeného testování lze konstatovat, že manipulátor splnil všechna stanovená kritéria a očekávání. Systém vykazuje vysokou spolehlivost, stabilní bezdrátovou komunikaci a dostatečný výkon pro manipulaci s menšími letadly v hangárových a letištních podmínkách.

Ovládání manipulátoru prostřednictvím ručního ovladače je intuitivní a přesné. Reakce systému na pohyby joysticku jsou okamžité a odpovídají očekávanému chování. Implementovaná exponenciální charakteristika růstu výkonu umožňuje jemné manévrování v malých rychlostech, zatímco při plném vychýlení joysticku dochází k rychlému dosažení maximální rychlosti manipulátoru.

Konstrukce rámu manipulátoru zajišťuje dostatečnou pevnost a odolnost vůči zatížení i při jízdě na nerovném povrchu. Díky použití otočného kola v přední části manipulátoru je možné snadné otáčení a manévrování i v omezených prostorech. Elektronické komponenty jsou vhodně chráněny a umístěny tak, aby bylo možné rychlé servisní zásahy a výměnu jednotlivých částí.

Bezdrátová komunikace využívající moduly nRF24L01+ PA + LNA s externí anténou umožňuje spolehlivý přenos řídicích dat na vzdálenosti odpovídající požadavkům pro provoz na letišti, s maximálním dosahem až 1000 metrů ve volném prostoru.

Bezpečnostní prvky implementované v softwaru, jako je nouzové zastavení při ztrátě komunikace, významně přispívají k bezpečnému provozu manipulátoru. Celý systém tak vykazuje vysokou míru spolehlivosti, a to i při simulaci různých krizových situací.

Výsledky testování potvrzují, že navržený a realizovaný manipulátor je plně funkční, splňuje zadané požadavky a představuje efektivní řešení pro bezpečnou manipulaci s menšími letadly v podmínkách aeroklubů a malých letišť.

Tabulka 6: Souhrn parametrů manipulátoru (VLASTNÍ, 2025)

Parametr	Hodnota / Popis
Maximální hmotnost letadla	do 1000 kg
Typ pohonu	Elektrický, 2× DC motor 24 V / 350 W
Převodovka	Planetová, výstup 120 ot/min
Točivý moment na výstupu	cca 320 Nm (špičkově)
Počet kol	3 (2 zadní poháněná, 1 přední otočné)
Ovládání	Bezdrátové (joystick + NRF24L01)
Displej	LCD 20x4 s I2C převodníkem
Řídicí jednotka	Arduino Mega 2560 (vozik), Arduino Nano (ovladač)
Napájení pohonu	2× 12 V trakční baterie, 14 Ah (celkem 24 V)
Napájení ovladače	9 V akumulátor
Maximální rychlost pohybu	5 km/h
Materiál rámu	Hliníkové profily 30×30 mm
Rozměry zařízení	75 cm × 50 cm
Přibližná hmotnost manipulátoru	30kg
Způsob uchycení letadla	Otočný disk + výškové nastavení
Dosah komunikace	až 1000 m (ve volném prostranství)



Obrázek 23: Funkční prototyp manipulátoru (VLASTNÍ, 2025)

### 3 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout, realizovat a ověřit funkční model dálkově ovládaného manipulátoru určeného pro manipulaci s malými letadly o hmotnosti do 1000 kg. Hlavním požadavkem bylo vytvořit zařízení, které umožní bezpečný, plynulý a přesný pohyb letadel v omezených prostorách hangárů, přičemž důraz byl kladen na jednoduchost konstrukce, dostupnost použitých komponent a nízké náklady.

V teoretické části práce byly popsány základní principy manipulace s letadly, existující typy manipulátorů a jejich hmotnostní rozdělení. Dále byly analyzovány dostupné technologie, které byly následně využity při konstrukci a řízení manipulátoru. Tím byly zvoleny vhodné motory, elektronické komponenty, řídicí jednotky a komunikační moduly tak, aby celek splňoval požadavky na výkon, spolehlivost a ekonomickou dostupnost.

V praktické části byla provedena konstrukce rámu manipulátoru z hliníkových profilů, které zajistily dostatečnou pevnost a zároveň nízkou hmotnost. Byl vyvinut systém řízení pohybu pomocí dvojice stejnosměrných motorů a diferenciálního řízení, který umožňuje jízdu vpřed, vzad, zatáčení i otáčení na místě, jakož i okamžité zastavení. Elektronika byla navržena s důrazem na bezpečné a stabilní napájení.

Řídicí část manipulátoru byla realizována pomocí vývojové desky Arduino Mega 2560, která přijímá data z ručního ovladače prostřednictvím bezdrátového modulu NRF24L01+. Ovladač, postavený na Arduino Nano, snímá hodnoty z analogového joysticku a zobrazuje aktuální stav systému na LCD displeji. V obou programech byla implementována bezpečnostní logika, která zajišťuje okamžité zastavení manipulátoru při výpadku komunikace nebo návratu joysticku do neutrální polohy.

Testováním zařízení bylo ověřeno, že manipulátor splňuje všechny stanovené požadavky. Systém vykazuje rychlou odezvu na ovládací pokyny, plynulé řízení výkonu motorů a stabilní chování při jízdě i zatáčení. Dále bylo potvrzeno, že konstrukce manipulátoru je dostatečně robustní a elektronika spolehlivě funguje i při delším provozu. Díky modulární konstrukci je zařízení snadno servisovatelné a umožňuje budoucí rozšíření o další funkce, například automatické režimy pohybu nebo přídavné senzory.

Tento projekt přinesl nejen praktické řešení konkrétní potřeby v oblasti manipulace s letadly, ale také cenné zkušenosti v oblasti konstrukce, elektroniky, programování a systémového návrhu. V budoucnu by bylo možné manipulátor dále zdokonalit například implementací zpětné vazby z motorů, vylepšením bezdrátové komunikace nebo rozšířením o autonomní navigaci pomocí GPS a senzorů překážek.

## POUŽITÁ LITERATURA

- ARDUINO. Arduino Mega 2560 Rev3. [online]. Arduino AG, 2023 [cit. 2025-03-28]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>.
- PAJTECH. Arduino Mega 2560 – dokumentace. [online]. 2024 [cit. 2025-03-28]. Dostupné z: <https://www.pajtech.cz/arduino-mega-2560>.
- ARDUINO. Arduino Nano. [online]. Arduino AG, 2024 [cit. 2025-03-28]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>.
- LASKAKIT. Arduino Nano – technické parametry. [online]. 2025 [cit. 2025-03-28]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/arduino-nano/>.
- DRURY, Bill. *The Control Techniques Drives and Controls Handbook*. London: The Institution of Electrical Engineers, 2001. ISBN 0852967934.
- TILŠER, Ivo. *Elektronika – výkonová elektronika, spínané zdroje a motorové pohony*. 2. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2009. ISBN 978-80-7300-242-5.
- KLEMENT, Petr. *Základy letectví pro piloty ULL*. 2. vyd. Plzeň: Fraus, 2021. ISBN 978-80-7489-570-5.
- ÚŘAD PRO CIVILNÍ LETECTVÍ. *Předpis L1 – Pravidla létání v ČR*. Praha: ÚCL, 2023.
- EASA. *Acceptable Means of Compliance to Part-FCL*. European Union Aviation Safety Agency, 2022.
- FAA. *Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge*. FAA-H-8083-25B. U.S. Department of Transportation, 2016.
- AZ-DELIVERY. LCD Display 20x4 mit I2C-Modul. [online]. 2023 [cit. 2025-03-28]. Dostupné z: <https://www.az-delivery.de/products/lcd-20x4-display-i2c>.
- NXP SEMICONDUCTORS. *PCF8574 Remote 8-bit I/O expander for I<sup>2</sup>C-bus with interrupt*. Rev. 6, 2016 [cit. 2025-03-28]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCF8574.pdf>.
- NORDIC SEMICONDUCTOR. *nRF24L01+ Single Chip 2.4GHz Transceiver Product Specification*. [online]. [cit. 2025-03-28]. Dostupné z: [https://cdn.sparkfun.com/assets/3/d/8/5/1/nRF24L01P\\_Product\\_Specification\\_1\\_0.pdf](https://cdn.sparkfun.com/assets/3/d/8/5/1/nRF24L01P_Product_Specification_1_0.pdf).
- HANDSON TECH. nRF24L01+PA+LNA 2.4GHz RF Transceiver Module. [online]. [cit. 2025-03-28]. Dostupné z: <https://www.handsontec.com/dataspecs/module/NRF24L01%2BPA.pdf>.
- MARGOLIS, Michael. *Arduino Cookbook: Recipes to Begin, Expand, and Enhance Your Projects*. 2. vyd. Sebastopol: O'Reilly Media, 2012. ISBN 978-1449313876.
- GEDDES, Mark. *Arduino Project Handbook: 25 Practical Projects to Get You Started*. San Francisco: No Starch Press, 2016. ISBN 978-1593276904.

VSK-Profilý. Hliníkový profil BH 30×30 s drážkou 8 mm. [online]. [cit. 2025-03-28]. Dostupné z: <https://www.vsk-profilý.cz/hlinikovy-profil-bh-30-8-30x30/>.

KULIČKOVÁ LOŽISKA s.r.o. Otočná ložiska s přírubou – katalog výrobků. [online]. [cit. 2025-03-28]. Dostupné z: <https://www.kulickovaloziska.cz>.

BOGERT AVIATION, 2022. Aircraft tug. Online. In: Bogert Aviation. Dostupné z: [https://bogertaviation.com/cdn/shop/products/Fullscreen\\_capture\\_4202015\\_24924\\_PM.bmp\\_1024x1024.jpg?v=1664574450](https://bogertaviation.com/cdn/shop/products/Fullscreen_capture_4202015_24924_PM.bmp_1024x1024.jpg?v=1664574450). [cit. 2025-03-28].

KITPLANES, 2019. TugPlane. Online. In: Kitplanes. Dostupné z: <http://www.kitplanes.com/wp-content/uploads/2019/05/TugPlane.jpg>. [cit. 2025-03-28].

KITPLANES, 2024. Electric Tug\_03. Online. In: Kitplanes. Dostupné z: [https://www.kitplanes.com/uploads/2024/03/Electric-Tug\\_03.jpg](https://www.kitplanes.com/uploads/2024/03/Electric-Tug_03.jpg). [cit. 2025-03-28].

UPGATES, 2023. Elektrický posuv letadla. Online. In: UPGATES. Dostupné z: [https://neven.s6.cdn-upgates.com/\\_cache/e/c/ec4e25ddd1b2a0e90c0882ee2c85070a-28001773.jpg](https://neven.s6.cdn-upgates.com/_cache/e/c/ec4e25ddd1b2a0e90c0882ee2c85070a-28001773.jpg). [cit. 2025-03-28].

PAJTECH, 2024. Miniaturní převodový mechanismus. Online. In: Pajtech. Dostupné z: [https://pajtech.cz/images/mini/600px\\_00038768\\_2.webp](https://pajtech.cz/images/mini/600px_00038768_2.webp). [cit. 2025-03-28].

LASKAKIT, 2023. Arduino Nano R3 (klon). Online. In: Laskakit.cz. Dostupné z: [https://cdn.myshoptet.com/usr/www.laskakit.cz/user/shop/big/65-2\\_laskakit-arduino-nano-r3-atmega328p-klon-ms.jpg?67b2edb9](https://cdn.myshoptet.com/usr/www.laskakit.cz/user/shop/big/65-2_laskakit-arduino-nano-r3-atmega328p-klon-ms.jpg?67b2edb9). [cit. 2025-03-28].

DRÁTEK.CZ, 2022. Arduino Leonardo Micro. Online. In: Dratek.cz. Dostupné z: <https://dratek.cz/photos/produkty/d/0/882.jpg?m=1644906787>. [cit. 2025-03-28].

WHADDA, 2023. VMA450 joystick shield. Online. In: Whadda.com. Dostupné z: <https://cdn.whadda.com/wp-content/uploads/2023/03/29091419/vma450.jpg>. [cit. 2025-03-28].

DRÁTEK.CZ, 2022. PS2 joystick. Online. In: Návodý Drátek.cz. Dostupné z: [https://navody.dratek.cz/images/obr\\_clanky/39\\_joystick\\_ps2/5610-thickbox.jpg](https://navody.dratek.cz/images/obr_clanky/39_joystick_ps2/5610-thickbox.jpg). [cit. 2025-03-28].

KOLA PIRKL, 2023. Nábytkové otočné ložisko. Online. In: Kolapirkl.cz. Dostupné z: [https://www.kolapirkl.cz/products\\_images/thumbs/autox320/d81.jpg](https://www.kolapirkl.cz/products_images/thumbs/autox320/d81.jpg). [cit. 2025-03-28].

MAREK.EU, 2023. Ložisko s přírubou. Online. In: Marek.eu. Dostupné z: <https://www.marek.eu/katalog-obrazku/produkt-37496/nahled.jpg?t=1678968810>. [cit. 2025-03-28].

# **PŘÍLOHY**

**A – CD**

**Příloha k bakalářské práci**  
Mobilní parkovací robotický manipulátor  
Jan Teplý

**CD**

## **OBSAH**

- 1 Text bakalářské práce ve formátu PDF
- 2 Zdrojový kód Arduino MEGA
- 3 Zdrojový kód Arduino NANO
- 4 Schémata zapojení
- 5 Fotodokumentace