

VYSOKÁ ŠKOLA POLYTECHNICKÁ JIHLAVA

Aplikované strojírenství

VÝVOJ EXPERIMENTÁLNÍHO STANDU PRO
PREDIKTIVNÍ ÚDRŽBU PŘEVODOVEK

Bakalářská práce

Autor práce: Peštál Petr

Vedoucí práce: Ing. Martin Marek, Ph.D.

Jihlava 2025

Vysoká škola polytechnická Jihlava

Tolstého 16, 586 01 Jihlava

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Autor práce: **Petr Peštál**

Studijní program: Aplikované strojírenství

Garant studijního programu: Ing. Miloslav Vilímek, Ph.D.

Název práce: **Vývoj experimentálního standu pro prediktivní údržbu převodovek**

Vedoucí práce: Ing. Martin Marek, Ph.D.

Cíl práce: Teoretická část:1)Obecný rozbor mechanických převodovek, typy, členění, vlastnosti.2)Základní mechanický výpočet a související vztahy pro namáhání převodovek3)Převodovky v automatizaci a především robotických ramenech. Praktická část:1)Příprava měřicího pracoviště pro měření provozních parametrů typové mechanické převodovky2)Návrh a volba snímačů pro záznam zvolených fyzikálních veličin.3)Měření provozních stavů a veličin Zhodnocení a závěrCelkové zhodnocení dosažených teoretických i praktických poznatků a zjištění.

Abstrakt

Tato práce se zabývá rozbořem mechanických převodovek, jejich typovým členěním, vlastnostmi a základními výpočty převodů ozubenými koly. Důraz je kladen na jejich využití v oblasti automatizace, zejména v robotických ramenech. Popsány jsou běžně používané typy a jejich aplikace u výrobců.

Součástí práce je také praktická část, zaměřená na měření provozních veličin robotického ramene AUBO i5. Bylo provedeno přímé měření teploty pomocí termokamery a nepřímé měření elektrického příkonu prostřednictvím sledování napětí a proudu. Cílem experimentu je zhodnotit závislost zatížení a teploty ramene na elektrickém příkonu robotického ramene.

Klíčová slova

Mechanická převodovka; robotické rameno; teplotní zatížení; příkon

Abstract

This thesis deals with the analysis of mechanical gearboxes, their classification by type, properties, and basic calculations related to gear transmissions. Focus is placed on their use in the field of automation, particularly in robotic arms. There are described commonly used gearbox types and their applications by manufacturers are.

The thesis also includes a practical part focused on measuring the operating parameters of the AUBO i5 robotic arm. Direct temperature measurements were taken using a thermal camera, and indirect measurements of electric power input were carried out by monitoring voltage and current. The aim of the experiment is to evaluate the relationship between the load and temperature of the arm and the electric power consumption of the robotic arm.

Keywords

Mechanical gearbox; Robotic arm; Thermal load; Power input

Prohlašuji, že předložená bakalářská práce je původní a zpracoval/a jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil/a autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, v platném znění, dále též „AZ“).

Byl/a jsem seznámen/a s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje **AZ**, zejména § 60 (školní dílo).

Podle § 47b zákona o vysokých školách souhlasím se zveřejněním své práce podle Směrnice pro vedení, vypracování a zveřejňování závěrečných prací na VŠPJ, a to bez ohledu na výsledek obhajoby.

Beru na vědomí, že VŠPJ má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom/a toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠPJ, která má právo ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených vysokou školou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše), z výdělku dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence.

V Jihlavě dne 22. června 2025

.....

Podpis studenta

Poděkování

Děkuji panu Ing. Martinu Markovi, Ph.D. za odborné vedení práce, poskytování cenných rad a velmi užitečnou pomoc při zpracování řešené problematiky. Taktéž děkuji své rodině za trpělivost a velkou podporu během mého studia.

Obsah

Seznam obrázků.....	7
Seznam tabulek	8
Seznam zkratk.....	9
Úvod	11
1 Mechanické převodovky	12
1.1 Ozubené převody.....	13
1.2 Řemenové a lanové převody	14
1.3 Řetězové převody	16
1.4 Třecí převody	18
1.5 Variátory	20
2 Vztahy pro výpočet převodovky	22
2.1 Základní vztahy pro mechanické výpočty	22
2.2 Pevnostní výpočet.....	23
3 Převodovky v automatizaci	24
3.1 Převodovky v robotice	24
3.2 Robotická ramena.....	26
4 Praktická část	30
4.1 Přípravy pro měření.....	30
4.2 Měření teploty	32
4.3 Měření elektrického příkonu	35
4.4 Zhodnocení výsledků měření.....	36
5 Závěr.....	38
Seznam použité literatury	39

Seznam obrázků

Obrázek 1: Druhy mechanických převodů	12
Obrázek 2: Převod ozubenými koly.....	13
Obrázek 3: Řemenový převod	15
Obrázek 4: Řetězový převod	17
Obrázek 5: Třecí převod	18
Obrázek 6: Rozdělení třecích převodů	20
Obrázek 7: Schéma principu variátoru.....	20
Obrázek 8: Talířová konstrukce variátoru	21
Obrázek 9: Základní pojmy geometrie ozubení	22
Obrázek 10: Planetová převodovka	24
Obrázek 11: Harmonická převodovka.....	25
Obrázek 12: Cykloidní převodovka	26
Obrázek 13: Robotické Rameno FANUC M - 10iD/12	27
Obrázek 14: Robotické rameno ABB IRB 1200.....	28
Obrázek 15: Robotické rameno UR5e.....	28
Obrázek 16: Robotické rameno AUBO i5	29
Obrázek 17: Zapojení robota pro měření elektrických veličin	30
Obrázek 18: Snímání Ramene pomocí termokamery	31
Obrázek 19: Rozhraní programu pro ovládání ramene.....	32
Obrázek 20: Počátek měření v nezatíženém stavu	32
Obrázek 21: Konec měření v nezatíženém stavu	33
Obrázek 22: Vývoj teploty při nezatíženém stavu	33
Obrázek 23: Počátek měření v zatíženém stavu	34
Obrázek 24: Konec měření v zatíženém stavu	34
Obrázek 26: Vývoj teploty při zatíženém stavu.....	35

Seznam tabulek

Tabulka 1: Měření elektrického příkonu v nezatíženém stavu	36
Tabulka 2: Měření elektrického příkonu v zatíženém stavu	36

Seznam zkratek

i	Převodový poměr
D	Průměr roztečné kružnice
n	Počet otáček
z	Počet zubů ozubeného kola
η	Účinnost
P	Výkon
m	Modul ozubení
c_a	Hlavová vůle
a	Osová vzdálenost
p	Rozteč zubů
s	Tloušťka zubu
h_a	Výška hlavy zubu
h_f	Výška paty zubu
D_a	Průměr hlavové kružnice
D_f	Průměr patní kružnice
h	Výška zubu
ω	Úhlová rychlost
M_k	Krouticí moment
W_k	Průřezový modul v krutu
d	Průměr hřídele
τ_k	Napětí v krutu
τ_{Dk}	Dovolené napětí v krutu
σ_O	Napětí v ohybu
b	Šířka zubu
r	Poloměr roztečné kružnice
s_f	Tloušťka paty zubu
I	Elektrický proud
U	Elektrické napětí
mm	Milimetr

kg	Kilogram
°C	Stupeň Celsia
A	Ampér
V	Volt
W	Watt

Úvod

Mechanické převodovky tvoří nedílnou součást většiny pohonných systémů, kde slouží k úpravě otáček a točivého momentu mezi pohonem a hnaným členem. Jejich správný návrh a volba mají zásadní vliv na účinnost, přesnost i životnost celého zařízení. V oblasti automatizace, a především v moderní robotice, je využití převodových mechanismů zvlášť důležité.

Robotická ramena využívají různé typy převodovek od klasických planetových převodů až po specializované mechanismy. Každý typ má své specifické výhody, volba se tak přímo promítá do provozních parametrů robotu, včetně jeho energetické náročnosti a tepelného chování.

Teoretická část se proto zabývá obecným rozбором mechanických převodovek a jejich klasifikací. Pozornost je také věnována na jejich roli v automatizovaných systémech, zejména použití v robotice.

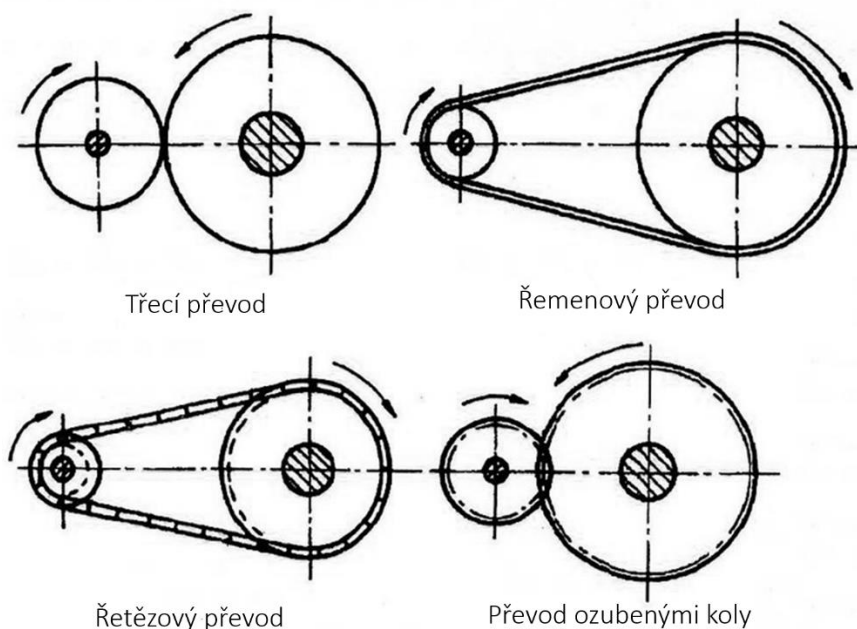
Praktická část se věnuje měření elektrického příkonu a teploty robotického ramene při různých zátěžových stavech. Cílem je vyhodnotit, jakým způsobem se mění elektrická spotřeba v závislosti na mechanickém zatížení a jak se tyto změny promítají do teplotního profilu převodového systému. Výsledky měření pak mohou sloužit k optimalizaci provozních režimů robotických systémů s ohledem na energetickou účinnost a životnost mechanických součástí.

1 Mechanické převodovky

Mechanické převodovky jsou zařízení, zahrnující různé mechanismy a součásti, pomocí kterých dochází k přenosu síly nebo výkonu mezi pohyblivými částmi zařízení. Pro dosažení tohoto výsledku využívají změnu otáček nebo kroutícího momentu, využitím mechanických převodů a změnou převodového čísla. Výstupní modifikovaný parametr je ovlivněn konstrukcí a účelem převodovky. (Kocman,2020)

Převodovky proto dělíme dle:

- Druhu převodu
 - Ozubené převody
 - Řemenové a lanové převody
 - Řetězové převody
 - Třecí převody
- Změny převodového poměru
 - S pevným převodem
 - S proměnným převodem
- Uspořádání ozubených kol
 - Jednostupňové
 - Vícestupňové
- Způsobu řízení
 - Manuální
 - Automatické



Obrázek 1: Druhy mechanických převodů

Zdroj: Mechanické převody

1.1 Ozubené převody

Nejpoužívanějšími mechanickými převody jsou převody ozubenými koly. Slouží k přenosu rotačního pohybu a kroutícího momentu mezi hřídeli. Jejich principem je vzájemné odvalování přesně vyrobených zubů, což umožňuje přenos velké síly s vysokou účinností a přesností. Dvě ozubená kola tvořící převod nazýváme soukolí. Tvar zubu musí být speciálně volen, aby splňoval základní podmínku odvalování. Tuto podmínku splňují pouze cykloidní a evolventní tvary boku zubu. (Kříž a kol,1974)



Obrázek 2: Převod ozubenými koly

Zdroj: (Kříž a kol,1974)

1.1.1 Výhody a nevýhody ozubených převodů

Výhody:

- Zajišťují konstantní převodový poměr bez prokluzu.
- Dosahují vysoké účinnosti přenosu.
- Při správné údržbě a mazání mají dlouhou životnost a vysokou spolehlivost.
- Díky malé osové vzdálenosti umožňují kompaktní uspořádání mechanismů.

(Kříž a kol,1974)

Nevýhody:

- Výroba vyžaduje využití speciálních nástrojů a technologií.
- Některé typy mohou být při vyšších otáčkách hlučné.
- Pro předejití opotřebení zubů je třeba pravidelné údržby a mazání.

(Kříž a kol,1974)

1.1.2 Rozdělení Ozubených soukolí

Různé využití ozubených kol vyžaduje používání jiné vzájemné polohy os (např.: rovnoběžné, různoběžné), různých tvarů kol (válnové a kuželové). Změnou tvaru zubu můžeme dosáhnout lepších vlastností odvalování a menšího počtu zubů. (Kříž a kol, 1974)

Proto se ozubená kola dělí podle vzájemné polohy os, tvaru kol a jejich zubů:

- Čelní soukolí s přímými zuby

Nejjednodušší a nejlevnější typ soukolí z hlediska výroby. Používají ve složených soukolích, čímž dosahují větších redukci otáček. Při provozu u nich nevznikají axiální síly. Narážení zubů při zabírání způsobuje hluk a vibrace proto se nehodí pro použití v osobních automobilech.

- Čelní soukolí se šikmými zuby

Je nejčastěji používané soukolí v převodech ozubenými koly. Chod čelních soukolí se šikmými zuby mají tišší a plynulejší chod. Vzájemná poloha os může být rovnoběžná i kolmá. Vytvářejí axiální síly působící na ložiska.

- Soukolí s přímým vnitřním ozubením

Má stejné vlastnosti jako čelní soukolí. Oproti čelním soukolím se liší v menší osové vzdálenosti, proto se využívá v hodně rozměrově omezených prostorech. (Vejrek, 2008)

- Kuželová soukolí

Používá se pro změnu směru osy, vytváří tedy různoběžnou polohu os. Nejčastější využití je pro kolmý úhel. Využívají se přímé, šikmé a zakřivené zuby. Přímé mají levnější výrobu, ale dochází u nich k vyšší hlučnosti a neklidnému chodu. Šikmé a zakřivené zuby mají vyšší citlivost na nepřesnosti výroby, s tím souvisí vyšší náklady. Jejich výhodou je klidnější a tišší chod. (Vejrek, 2008)

- Šroubové soukolí

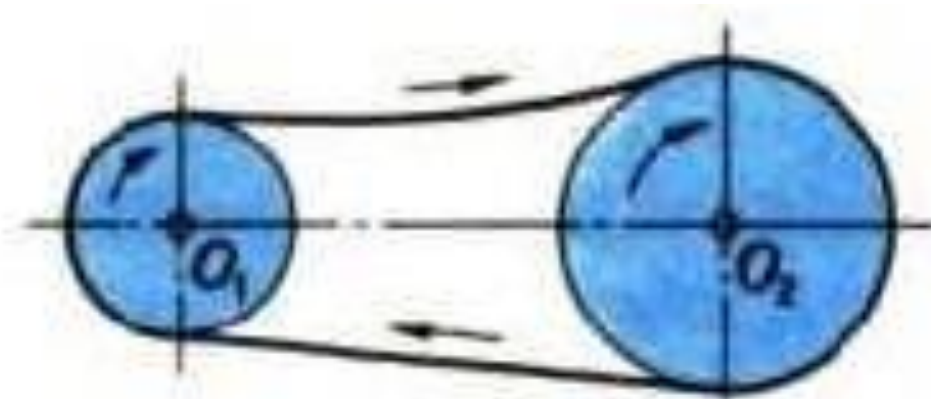
Používá se pro převod s mimoběžnými hřídeli soukolí. Mezi šroubovými ozubenými koly nedochází k odvalování, ale ke smýkání. Tím u nich vzniká tření, které snižuje účinnost, a je třeba více mazat. (Vejrek, 2008)

- Šnekové soukolí

Jeho využití je pro převod s mimoběžnými hřídeli s úhlem 90° . Většinou je soukolí samosvorné, proto nemůže být použito šnekové kolo jako hnané. Umožňuje přenášet vysoké výkony a kroutící momenty. (Vejrek, 2008)

1.2 Řemenové a lanové převody

Řemenové a lanové převody jsou mechanické systémy určené k přenosu rotačního pohybu a kroutícího momentu pomocí pružných prvků. Využívají třecí sílu, která vzniká mezi povrchem řemene či lana a řemenicí, k přenosu rotačního pohybu. Klasifikují se jako opásané převody se silovým stykem. (Kříž a kol, 1974)



Obrázek 3: Řemenový převod

Zdroj: (Kříž a kol, 1974)

Mezi základní části řemenových a lanových převodů patří:

- Řemenová a lanová kola

Řemenice jsou kola upevněná na hřídelích sloužící k vedení a přenosu síly prostřednictvím tažného elementu.

- Tažný element

Pružný prvek, který obepíná řemenice a přenáší mezi nimi mechanickou energii. Jako tažné elementy se používají lana a řemeny.

- Napínací kladka

V některých případech se součástí systému používá napínací kladka, která má za úkol zajištění správného napnutí řemene a optimalizaci úhlu opásání.

1.2.1 Typy tažných elementů

Tažné elementy jsou části převodových mechanismů, které přenášejí sílu mezi hnacím a hnaným členem. Hrají klíčovou roli v pružnosti, životnosti a účinnosti přenosu. Pro přenos se proto používají tyto tažné elementy:

- Ploché řemeny

Vyrábějí se z pružných materiálů, jako je kůže, pryž, nebo speciální tkanina. Mohou pracovat oboustranně, což umožňuje změnu smyslu otáčení.

- Klínové řemeny

Díky většímu tření v klínové drážce mohou přenášet větší kroutící moment. Pro jejich vysokou účinnost jsou nejpoužívanějším tažným členem.

- Lana

Lana bývají vyrobená z ocelových drátů spletených do pramenů, čímž dosahují velké pevnosti a nosnosti. Lana mohou být využita pro převod mezi řemenicemi vzdálených i několik kilometrů. Proto se typicky používají na lanové dráhy a lyžařské vleky.

1.2.2 Faktory ovlivňující přenos točivého momentu

Opásané převody pro přenos točivého momentu mezi hnacím a hnaným prvkem zohledňují celou řadu konstrukčních, provozních a materiálových faktorů. Mezi klíčové z nich patří:

- Napínací síla

Pro efektivní přenos točivého momentu je správné předepnutí řemene. Pokud je řemen příliš volný, může docházet k prokluzu, což vede k neefektivnímu přenosu točivého momentu a ztrátám energie.

- Součinitel tření

Velký vliv na přenos točivého momentu má také součinitel tření. Čím vyšší je součinitel tření, tím je účinnost převodu větší. Tento faktor je závislý na materiálu řemenice a tažného elementu.

- Úhel opásání

Úhel, pod kterým řemen obepíná řemenici, přímo ovlivňuje plochu, kterou řemen kontaktuje s řemenicí, tedy i množství přenášené síly. Větší úhel opásání znamená, že řemen má větší plochu kontaktu s řemenicí, to zvyšuje účinnost přenosu točivého momentu.

1.2.3 Výhody a nevýhody řemenových a lanových převodů

Výhody:

- Tichý a hladký chod je zajištěn pružností tažného členu, zároveň tím tlumí rázy a vibrace.
- Mají možnost současně pohánět několik hřídelí.
- Pro svoji jednoduchou výrobu a snadnou údržbu nejsou cenově náročné.
- Při přetížení chrání stroje před poškozením prokluzem řemene.

(Kříž a kol,1974)

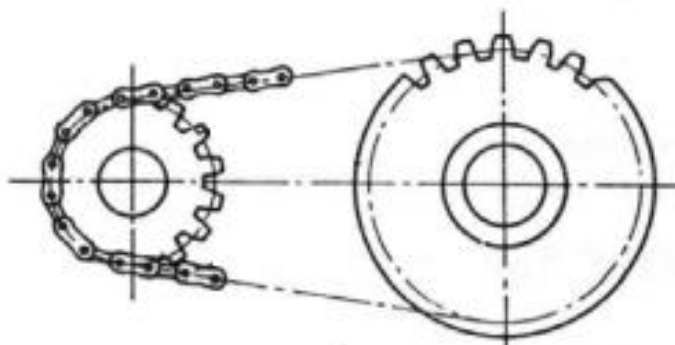
Nevýhody:

- Potřebují zařízení pro dodatečné napínání.
- Jsou náchylnější vůči vnějším vlivům (vysoké teploty, vlhkost, prach).
- Potřeba předpětí tažných elementů vytváří větší tlak na ložiska, která se více opotřebovávají.

(Kříž a kol,1974)

1.3 Řetězové převody

Řetězové převody jsou mechanické systémy určené k přenosu rotačního pohybu a kroutícího momentu mezi dvěma rovnoběžnými hřídelemi. Obvodová síla je přenášena pomocí tvarového styku řetězového kola a řetězu. Tento typ kombinuje vlastnosti řemenových a ozubených převodů. (Kříž a kol,1974)



Obrázek 4: Řetězový převod

Zdroj: (Kříž a kol,1974)

1.3.1 Výhody a nevýhody řetězových převodů

Výhody:

- Díky tvarovému styku mezi řetězem a řetězovým kolem nedochází k prokluzu.
- Při správné instalaci a údržbě dosahuje vysokých účinností a značných vzdáleností.
- Mají možnost současně pohánět několik hřídelí.
- Nevyžadují vysoké předpětí, nevytváří proto tak vysoké tlaky na ložiska jako řemenové převody

(Kříž a kol,1974)

Nevýhody:

- Při periodickém zabírání řetězu do řetězových kol dochází k hlučnosti vyšší než u ostatních převodů
- Výroba řemenic a řetězů má vyšší cenovou náročnost.
- Pro správnou funkci a minimalizaci opotřebení vyžaduje přesnou montáž.
- Nehodí se k periodickým změnám smyslu otáček.

(Kříž a kol,1974)

1.3.2 Druhy řetězových převodů

Hlavním kritériem rozdělení řetězových převodů je konstrukce řetězu, která ovlivňuje jeho pevnost, životnost a účinnost. Mezi základní typy řetězů patří:

- Válečkové řetězy

Nejpoužívanější typ řetězů. Je tvořen vnějšími a vnitřními články s válečky, snižujícími tření při záběru do řetězových kol. Nízké tření zvyšuje účinnost (až 98 %) a snižuje opotřebení. Vyžadují pravidelné mazání. (Březina, 2009)

- Pouzdrové řetězy

Konstrukčně se podobají válečkovým, ale kvůli absenci válečků vzniká tření mezi pouzdem a čepem. To vede k rychlejšímu opotřebení a nižší účinnosti. Výhodu mají v nižší ceně a jejich odolnosti vůči znečištění. (Březina, 2009)

- Gallovy řetězy

Jsou tvořeny čepy spojenými soustavou pásnic. To dodává řetězu extrémní pevnost a odolnost vůči přetížení. Dochází k vysokému tření, to způsobuje opotřebení. (Březina, 2009)

- Zubové řetězy

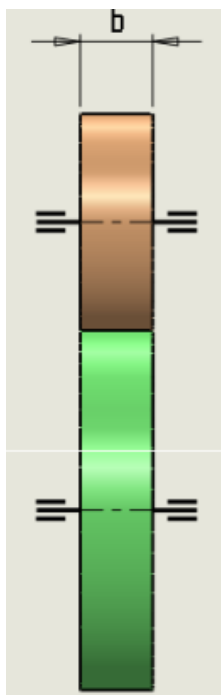
Mají speciální články se zuby, přesně zapadající do řetězových kol. Díky tomu dochází k téměř bezhlučnému provozu a vysoké účinnosti. Složitější výroba vyžaduje vyšší ceny. Pro provoz je důležité přesné seřízení. (Březina, 2009)

- Ewartovy řetězy

Jsou sestaveny z odlévaných článků, které lze snadno rozebrat a znovu sestavit. Díky tomu je snadná údržba a opravy. Dobře odolávají nečistotám a vlhkosti. Dochází u nich k nižší účinnosti než u válečkových řetězů. (Březina, 2009)

1.4 Třecí převody

Třecí převody jsou mechanické systémy, přenášející rotační pohyb a krouticí moment mezi dvěma prvky prostřednictvím třecí síly vznikající na jejich styčných plochách. Skládají se z hnacího a hnaného kola, která jsou pro zajištění potřebného přenosu síly vzájemně přitlačována. (Kříž a kol, 1974)



Obrázek 5: Třecí převod

Zdroj: Svobodová, 2013

1.4.1 Výhody a nevýhody třecích převodů

Výhody:

- Díky třecímu obložení mají tichý a klidný chod.
- Součásti jsou chráněny před přetížením pomocí prokluzu.
- Malá osová vzdálenost je závislá pouze na velikostech třecích kol.

(Kříž a kol,1974)

Nevýhody:

- Přítlačná síla vytváří značný tlak na hřídele a ložiska.
- Při nedostatečné přítlačné síle může docházet k nežádoucímu prokluzu.

(Kříž a kol,1974)

1.4.2 Druhy třecích převodů

Třecí převody lze rozdělit do skupin podle tvaru styčných ploch kotoučů. Díky jejich schopnosti měnit otáčky při zatížení stroje je dále dělíme na převody se stálým a s plynule měnitelným převodovým poměrem (variátory). (Kříž a kol,1974)

Proto je můžeme základně rozdělit na:

- Převody se stálým převodovým poměrem

Využívají dvě kola s hladkými povrchy válcového nebo kuželového tvaru. Převodový poměr je pevně dán průměrem těchto kol.

- Převody s plynule měnitelným převodovým poměrem

Změnou kontaktního bodu na styčných plochách lze změnit převodový poměr, bez potřeby zastavení stroje. Za tímto účelem se využívají například kuželová kola s posuvným třecím členem nebo lícnicí kol.

- Válcová kola

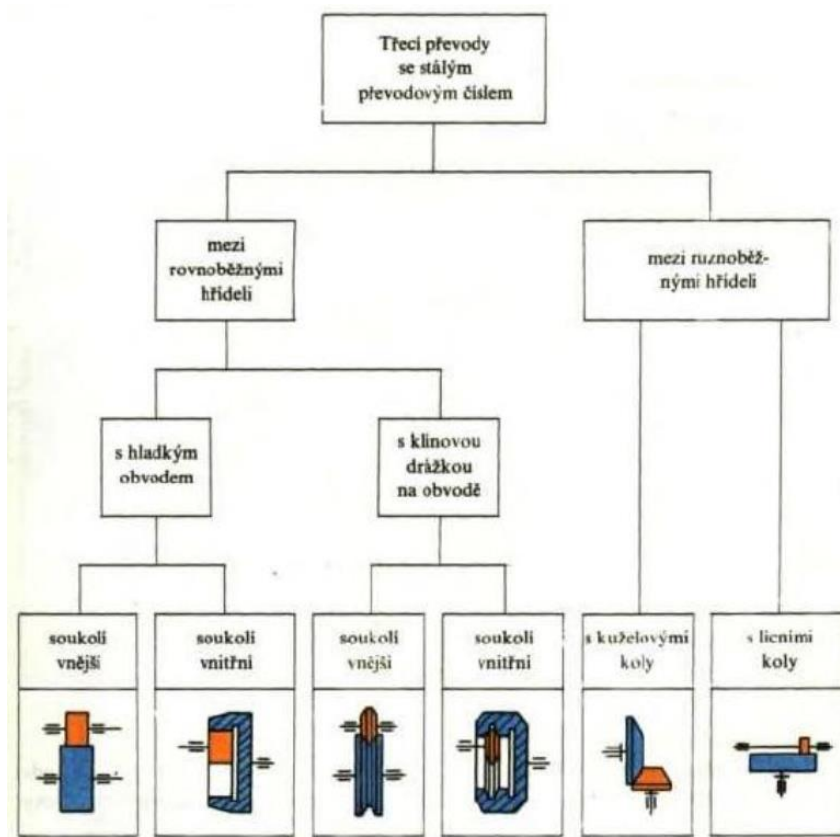
Jsou nejjednodušší konstrukcí třecích převodů. Jsou tvořeny dvěma válcovými koly. Pro zvýšení tření se může využívat drážek na obvodu kol.

- Kuželová kola

Pro přenos síly se používají kuželová kola, díky čemuž dochází k převodu pod určitým úhlem. Mají lepší přítlak než válcová kola.

- Lícnicí kola

Jejich největší výhodou je konstrukce, díky které přenáší kroutící moment do pravého úhlu a zároveň má možnost plynulého měnění převodového čísla. Nevýhodou je rozdílná rychlost na každém průměru lícnicího kola, tím se zvyšuje možnost prokluzu.

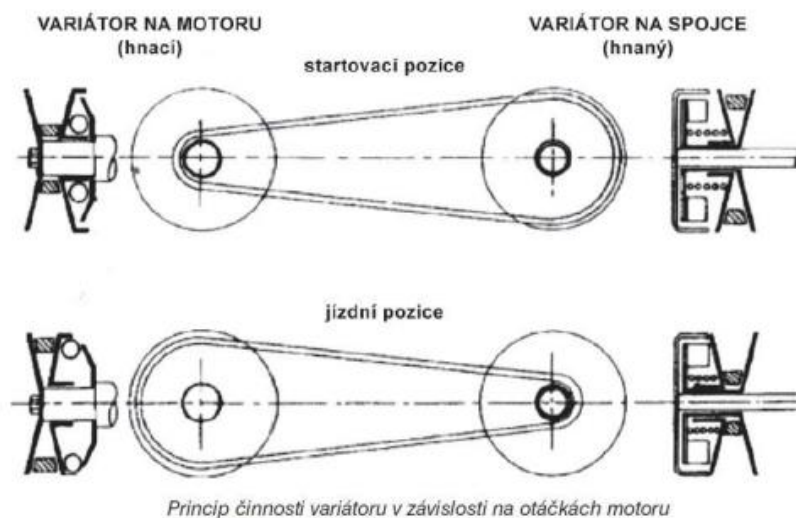


Obrázek 6: Rozdělení třecích převodů

Zdroj: Zdroj: (Kříž a kol, 1974)

1.5 Variátory

Variátory jsou převodové systémy, které umožňují plynulou změnu převodového poměru bez nutnosti pevně daných převodových stupňů. Mechanické variátory jsou nejčastěji realizovány pomocí třecích a řemenových převodů. V automobilovém průmyslu se používá i řetězový mechanismus. (Dvořák, 2019)



Princip činnosti variátoru v závislosti na otáčkách motoru

Obrázek 7: Schéma principu variátoru

Zdroj: Dvořák, 2019

Mechanické variátory se dělí dle konstrukce variátoru na:

- Variátory s párovými kuželovými koly

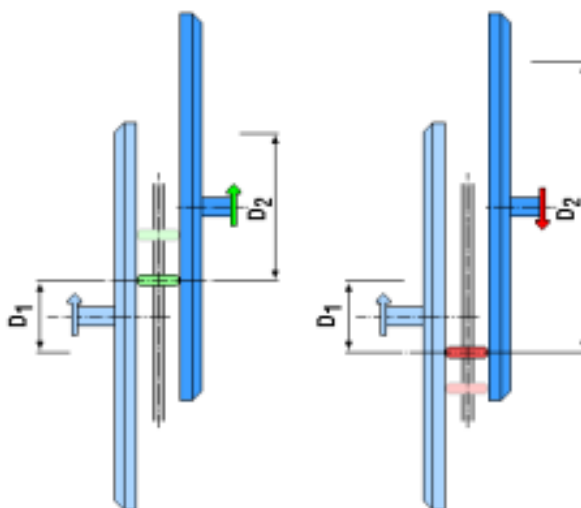
Přenos kroutícího momentu a otáček probíhá přes klínový pás na páru kuželových kol s proměnlivým průměrem. Kužely jsou vůči sobě nasazeny špičkami proti sobě, tím vytvářejí drážku pro pás a pohybem se mění průměr po kterém pás běží. (Dvořák, 2019)

- Variátor s protilehlými kuželovými koly

Dva kuželové kotouče jsou umístěny proti sobě na rovnoběžných osách. Převod se mění posunem pásu vodícími saněmi, nebo vloženým kolem, přesouvajícím se mezi kuželi. (Dvořák, 2019)

- Talířová konstrukce variátoru

Místo kuželů jsou dvě talířová kola, mezi nimi se posouvá menší třecí kolo. Posunem tohoto kola se mění převodový poměr a může se i změnit směr otáčení. (Dvořák, 2019)



Obrázek 8: Talířová konstrukce variátoru

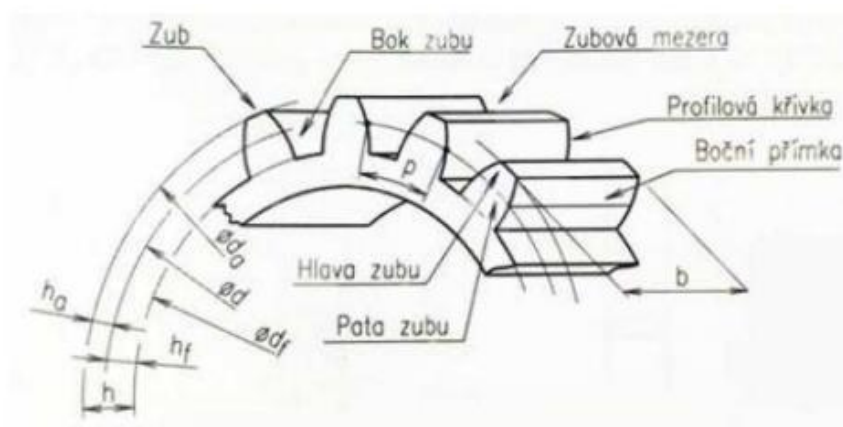
Zdroj: Dvořák, 2019

2 Vztahy pro výpočet převodovky

Převody ozubenými koly jsou nedílnou součástí robotických ramen. Aby bylo možné zaručit jejich spolehlivou a dlouhodobou funkci, je nezbytná správná konstrukce. Proto je nezbytné provést důkladný mechanický výpočet součástí mechanismu.

2.1 Základní vztahy pro mechanické výpočty

Při návrhu a výpočtu ozubených kol je klíčové porozumět základním geometrickým parametrům. Tyto parametry vstupují do výpočtů pevnosti, rozměrů a funkce ozubených kol.



Obrázek 9: Základní pojmy geometrie ozubení

Zdroj: Bělohav, 2017

- Převodový poměr

$$i = \frac{D_2}{D_1} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1} \quad (1)$$

- n – počet otáček

- Účinnost

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \quad (2)$$

- P_1, P_2 – výkon na vstupu a výstupu

- Modul ozubení

$$m = \frac{D}{z} \quad (3)$$

- D – průměr roztečné kružnice

- z – počet zubů

- Hlavová vůle

$$c_a = 0,25 * m \quad (4)$$

- Osová vzdálenost

$$a = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (5)$$

- Rozteč

$$p = \pi * m \quad (6)$$

- Tloušťka zubu

$$s = \frac{p}{2} \quad (7)$$

- Výška hlavy zubu

$$h_a = m \quad (8)$$

- Výška paty zubu

$$h_f = 1,25 * m \quad (9)$$

- Průměr hlavové kružnice

$$D_a = D + 2 * h_a \quad (10)$$

- Průměr patní kružnice

$$D_f = D - 2 * h_f \quad (11)$$

- Výška zubu

$$h = h_a + h_f \quad (12)$$

2.2 Pevnostní výpočet

- Úhlová rychlost

$$\omega = 2 * \pi * n \quad (13)$$

- Kroutící moment

$$M_k = \frac{P}{\omega} \quad (14)$$

- Průřezový modul v krutu

$$W_k = \frac{\pi * d^3}{16} \quad (15)$$

- d – nosný průměr hřídele

- Napětí v krutu

$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} \leq \tau_{Dk} \quad (16)$$

- τ_{Dk} – dovolené napětí v krutu

- Napětí v ohybu

$$\sigma_o \geq \frac{6 * M_k * h}{r * b * s_f^2} \quad (17)$$

- b – šířka zubu
- r – poloměr roztečné kružnice
- s_f – tloušťka paty zubu

3 Převodovky v automatizaci

V moderní automatizaci je kladen důraz na přesnost, spolehlivost a efektivní řízení pohybu. Převodovky proto představují nezbytný prvek pro zajištění optimálního chodu. Správná volba a návrh přímo ovlivňují výkon, účinnost a životnost zřízení. Požadavky na konstrukci se odvíjejí podle oblasti použití.

3.1 Převodovky v robotice

V oblasti robotiky hrají převodovky zásadní roli při zajištění přesného a plynulého řízení pohybu jednotlivých kloubů robotických ramen. Správná volba typu převodovky a její konstrukční řešení přímo ovlivňují klíčové parametry jako jsou přesnost polohování, rychlost reakce na povely a celková spolehlivost celého systému. Různé typy převodovek nabízejí různé vlastnosti, a proto výrobci robotických systémů volí převodovky podle konkrétních požadavků dané aplikace.

Mezi nejčastěji používané převodové mechanismy v robotice patří převody s ozubenými koly, zejména pak:

- Planetové převodovky
- Cykloidní převodovky
- Harmonické převodovky

3.1.1 Planetové převodovky

Planetová převodovka je specifický typ ozubeného soukolí. Principem planetového převodu je pohyb planetových kol mezi slunečním kolem a věncem. V závislosti na tom, která část je pevná a která poháněná, lze dosáhnout různých převodových poměrů a směrů otáčení.

Mezi největší výhody planetových převodovek patří:

- Vysoká účinnost
- Kompaktní rozměry
- Vyšší únosnost
- Možnost víceústupňového převodu



Obrázek 10: Planetová převodovka

Zdroj: Master CNC Machining for Planetary Gear: Design, Tools, and Applications

3.1.2 Harmonické převodovky

Harmonická převodovka je speciální typ převodovky, která umožňuje dosáhnout velmi vysokých převodových poměrů v kompaktním provedení. Otáčením vlnového generátoru dochází k deformaci pružného ozubení, které zapadá do pevného ozubení pouze ve dvou místech na opačných stranách. Díky rozdílu v počtu zubů mezi pružným a pevným ozubením dochází k relativnímu pomalému otáčení pružného ozubení vůči pevné části. (*Harmonic Drive® Strain Wave Gear Technology, 2022*)

Mezi hlavní výhody harmonických převodovek patří:

- Vysoký převodový poměr
- Kompaktní konstrukce
- Nízká nebo nulová vůle



Obrázek 11: Harmonická převodovka

Zdroj: Harmonické převodovky WSHD

3.1.3 Cykloidní převodovky

Cykloidní převodovka funguje na principu pohybu cykloidní křivky. Tento pohyb vzniká díky excentrickému otáčení disku. Když se tento disk otáčí, zároveň se mírně kýve. Díky tomu jeho ozubené hrany zapadají do pevného ozubeného věnce, který ho obklopuje. (Vejražka, 2021)

Mezi hlavní výhody patří:

- Vysoký převodový poměr
- Kompaktní rozměry
- Vysoká účinnost
- Vysoká torzní tuhost



Obrázek 12: Cykloidní převodovka

Zdroj: Vejražka, 2021

3.2 Robotická ramena

Robotická ramena jsou vysoce komplexní mechatronické systémy, které kombinují mechanické konstrukce, senzory, pohony a řídicí elektroniku. Jejich výkon a vhodnost pro konkrétní aplikace určují jak efektivně a přesně může robot plnit požadované úkoly. Mezi nejzásadnější parametry patří:

- Počet stupňů volnosti
- Dosah ramene
- Rychlost pohybu
- Nosnost
- Opakovatelnost pohybů

Tyto technické vlastnosti společně ovlivňují nejen schopnost robota manipulovat s objekty, ale také celkovou efektivitu jeho nastavení v automatizovaných procesech. Jejich optimalizace je nezbytná pro dosažení maximální produktivity, spolehlivosti a bezpečnosti v různých průmyslových aplikacích.

Moderní robotická ramena jsou často vybavena pokročilým softwarem, umožňujícím učení trajektorií, kolaboraci s člověkem a integraci s vizuálními systémy. V souvislosti s rozvojem umělé inteligence se zvyšuje jejich schopnost samostatného rozhodování, optimalizace pohybů a zpracování velkého množství dat v reálném čase. (Paleit, 2025)

3.2.1 FANUC M – 10iD/12

Robotické rameno FANUC M-10iD/12 disponuje 6 osami pohybu. Má dosah až 1441 mm a nosnost do 12 kg. Pro pohon robotických kloubů využívá FANUC planetové a harmonické převody, které zajišťují vysokou přesnost, spolehlivost a hladký chod. (FANUC M-10iD/12, © 1987–2025)



Obrázek 13: Robotické Rameno FANUC M - 10iD/12

Zdroj: FANUC M-10iD/12, © 1987–2025

3.2.2 ABB IRB 1200

Robotické rameno IRB 1200 se vyrábí dvou verzích. Verze s kratším dosahem (do 703 mm) 0.7 má nosnost 7 kg. Verze s větším dosahem (do 901 mm) má nosnost do 5 kg. Obě tyto verze využívají 6 os pohybu. Firma ABB využívá ve svých ramenech harmonické a planetové převodovky. (IRB 1200, © 1995–2025)

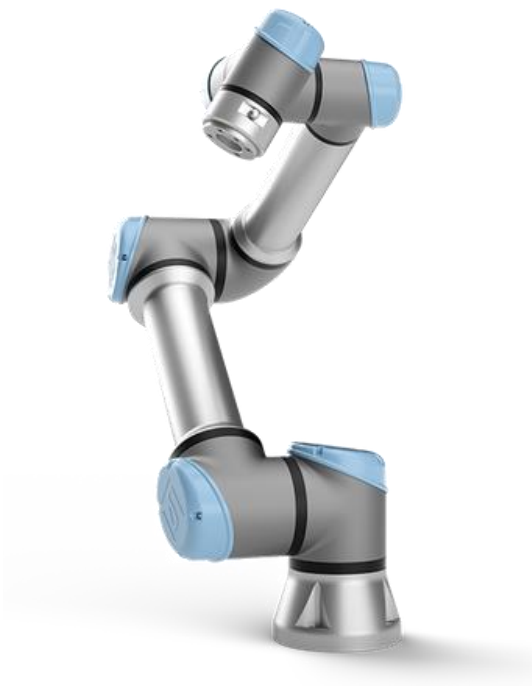


Obrázek 14: Robotické rameno ABB IRB 1200

Zdroj: IRB 1200, © 1995–2025

3.2.3 Universal Robots UR5e

Kompaktní robotické rameno UR5e od Universal robots má nosnost do 5 kg a dosah 850 mm. Díky svým rozměrům je ideální pro přesné manipulace v omezených prostorách. Pro pohon využívá harmonické převodovky, které zajišťují vysokou přesnost a hladký chod. (UR5e, © 2025)



Obrázek 15: Robotické rameno UR5e

Zdroj: UR5e, © 2025

3.2.4 AUBO i5

Robotické rameno AUBO i5 disponuje 6 osami pohybu, při nosnosti do 5 kg má dosah 886,5 mm. Pro pohon kloubů využívá společnost AUBO v tomto modelu harmonické převodovky zajišťující přesné a plynulé ovládání pohybu. (AUBO i5, b.r.)



Obrázek 16: Robotické rameno AUBO i5

Zdroj: AUBO i5, b.r.

4 Praktická část

Praktická část je zaměřena na experimentální měření a vyhodnocení provozních parametrů robotického ramene AUBO i5. Cílem měření je zjištění teplotních změn v převodovce robota a stanovení elektrického příkonu robota v průběhu provozu ve dvou režimech – bez zatížení a se zatížením vlastního běhu převodovky.

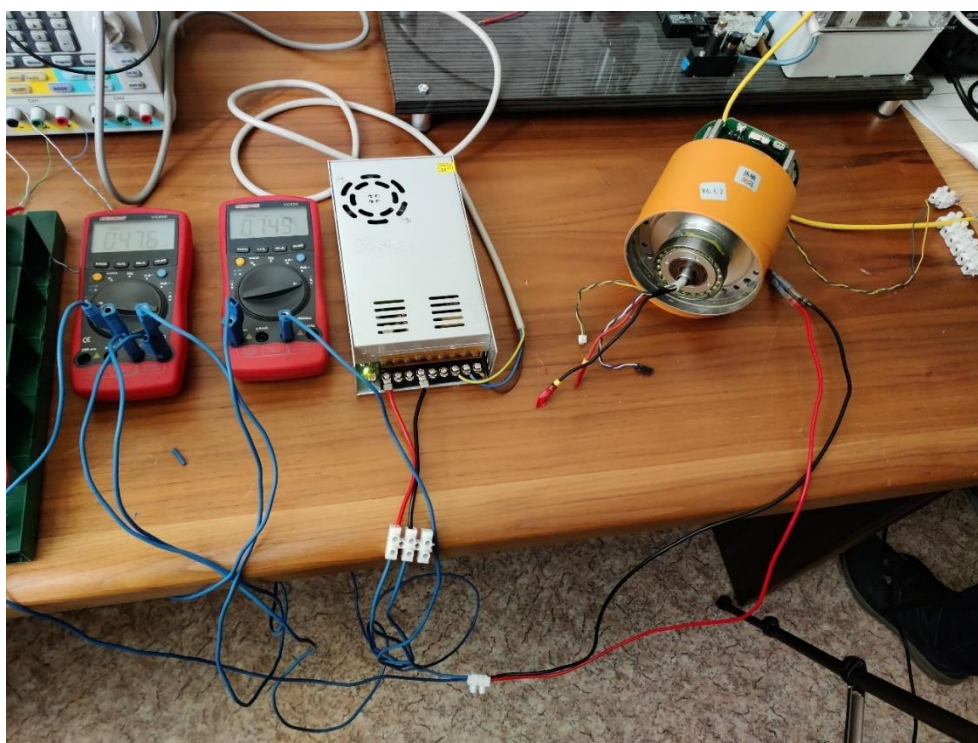
V rámci experimentu byla sledována teplota v klíčových částech robota s cílem posoudit vliv mechanického zatížení na tepelnou zátěž zařízení. Současně bylo měřeno napětí a proud odebíraný robotem ze sítě. Na základě těchto údajů byl následně vypočten okamžitý příkon.

Tato měření slouží k posouzení energetické náročnosti robotického ramene při různých typech mechanického a tepelného zatížení. Rovněž přispívají k celkovému porozumění jeho provozní efektivitě a možným dopadům dlouhodobého provozu na jeho životnost a stabilitu.

4.1 Přípravy pro měření

Pro přesné vyhodnocení elektrického příkonu robota během provozu v obou režimech bylo nezbytné připravit laboratorní zapojení, které umožní měřit základní elektrické veličiny. Robot byl připojen ke zdroji napájení tak, aby bylo možné spolehlivě sledovat a zaznamenávat hodnoty napětí a proudu během jeho chodu.

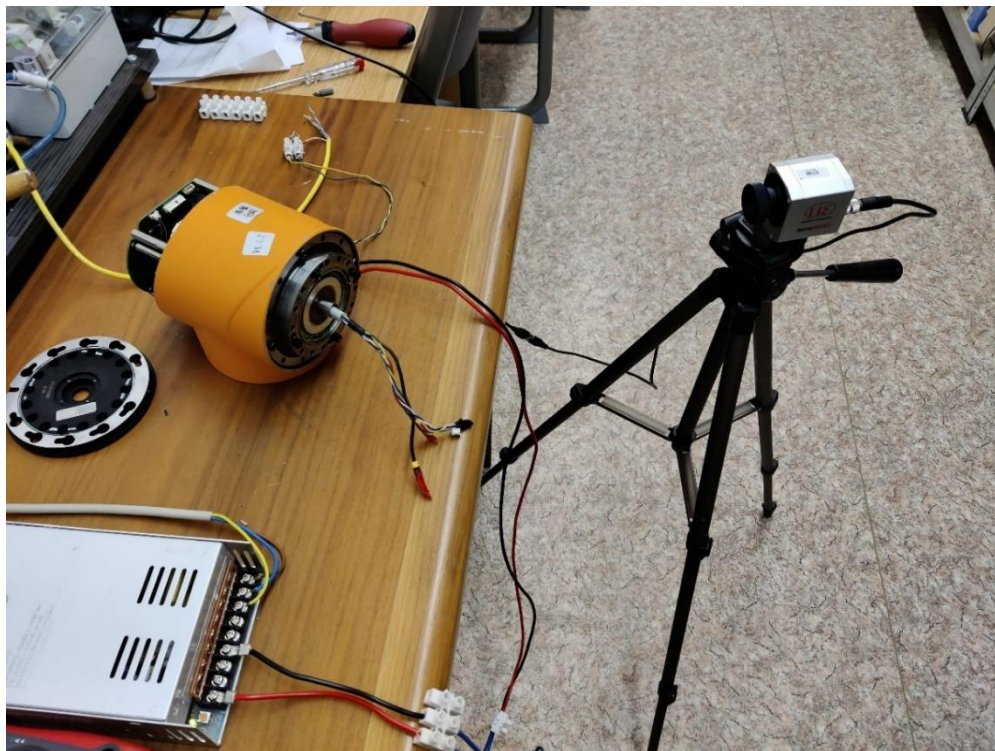
K tomuto účelu byl do elektrického obvodu zařazen voltmetr pro měření napětí dodávaného k robotu a ampérmetr pro sledování skutečného odebíraného proudu. Díky tomuto zapojení bylo možné kontinuálně monitorovat spotřebu elektrické energie a získat tak data o příkonu v různých provozních režimech.



Obrázek 17: Zapojení robota pro měření elektrických veličin

Zdroj: Vlastní

Následně bylo do měřicího uspořádání začleněno i měření teploty pomocí termokamery. Termokamera byla pečlivě nastavena tak, aby během provozu snímala klíčové části robotického ramene, zejména oblasti náchylné k přehřívání, jako jsou klouby a převodovky. Toto nastavení umožnilo sledovat tepelné změny v reálném čase při různých pracovních režimech robota. Díky tomu bylo možné identifikovat místa s nejvyšším tepelným zatížením a získat cenné informace pro vyhodnocení tepelné stability a plánování údržby.

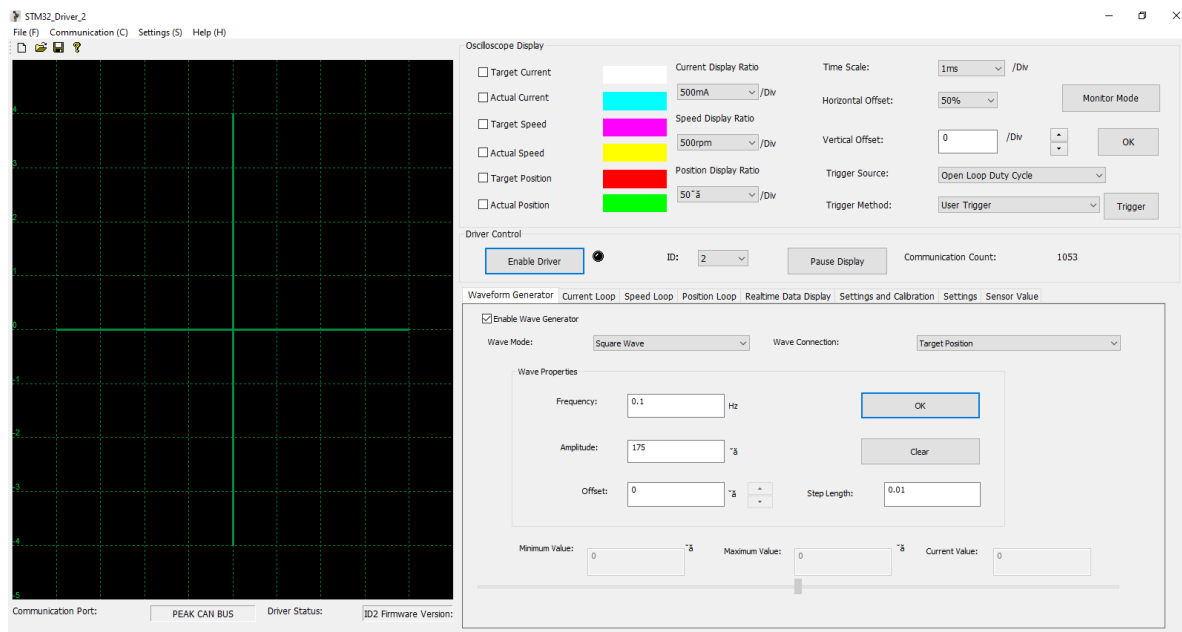


Obrázek 18: Snímání Ramene pomocí termokamery

Zdroj: Vlastní

Pro řízení robotického ramene byl použit program Waveform generator, ve kterém bylo nastaveno požadované ovládání. Pro experiment byl zvolen harmonický pohyb, který byl realizován pomocí čtvercových vln generovaných funkcí square wave. Pohyb měl amplitudu 175° a frekvenci 0,1 Hz, což znamená, že se rameno pravidelně a pomalu přepínalo mezi dvěma polohami.

Tento režim pohybu umožnil simulovat pravidelný cyklický zatěžovací režim ramene, který je ideální pro testování jeho chování a měření parametrů během opakovaných pohybů. Taková simulace pomáhá přesně vyhodnotit tepelnou zátěž při reálném provozu.



Obrázek 19: Rozhraní programu pro ovládání ramene

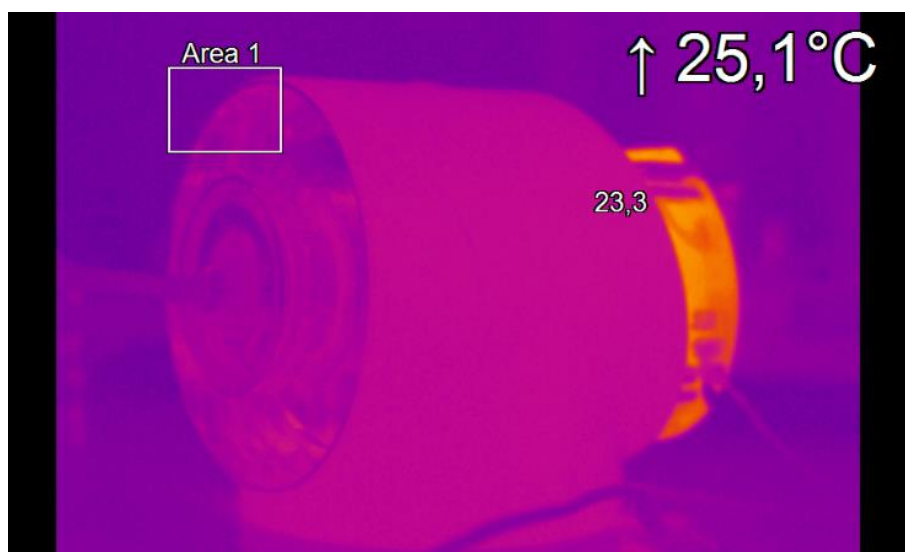
Zdroj: Vlastní

4.2 Měření teploty

Po nastavení a spuštění harmonického pohybu robotického ramene bylo zahájeno samotné měření. Po dobu jedné hodiny byl robot v provozu, přičemž každých deset minut byly provedeny systematické odpočty hodnot. Pomocí termo kamery byla zaznamenána teplota robotického ramene, což umožnilo sledovat tepelný vývoj během provozu.

4.2.1 Měření v nezatíženém stavu

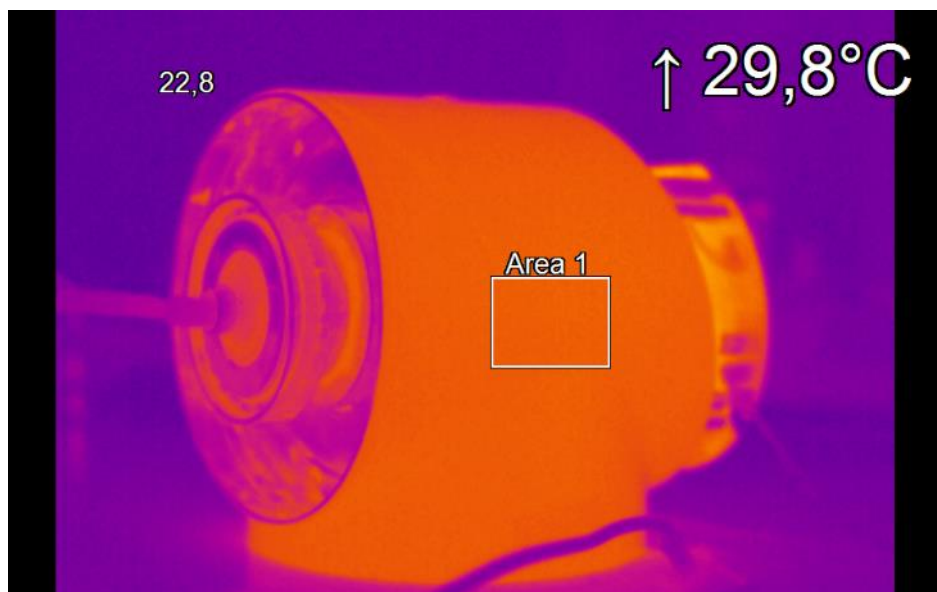
Na počátku měření pomocí termokamery byla zaznamenána teplota povrchu sledované části zařízení 25,1°C. Tato teplota odpovídá klidovému stavu robota před spuštěním.



Obrázek 20: Počátek měření v neztíženém stavu

Zdroj: Vlastní

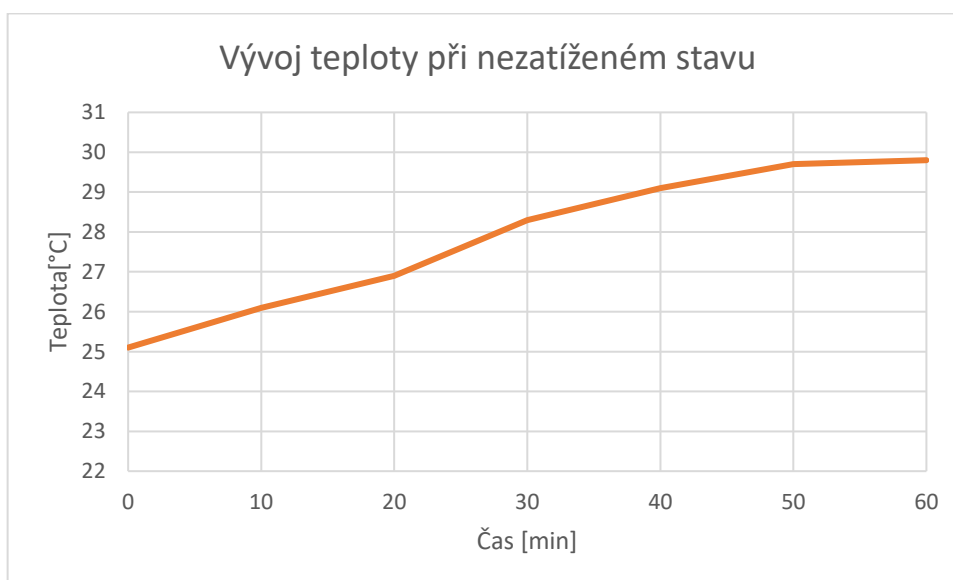
Po jedné hodině provozu termokamera naměřila maximální teplotu 29,8 °C, což ukazuje na nárůst tepla vznikající mechanickou činností robota. Největší zvýšení teploty bylo zaznamenáno v oblasti těla robota a ložiska převodovky, kde tření a zatížení způsobují zahřívání.



Obrázek 21: Konec měření v nezatíženém stavu

Zdroj: Vlastní

Na základě naměřených dat o vývoji teploty během neztíženého provozu robotického ramene byl vytvořen graf, znázorňující vzrůst teploty v průběhu jedné hodiny. Z grafu je patrné, že nejvýraznější nárůst teploty nastal během prvních 30 minut, kdy došlo k nejrychlejšímu zahřívání komponent. Po této době se nárůst teploty zpomalil, což naznačuje dosažení tepelné rovnováhy systému. Tento průběh odpovídá běžnému chování zařízení při provozu bez výraznější mechanické zátěže.

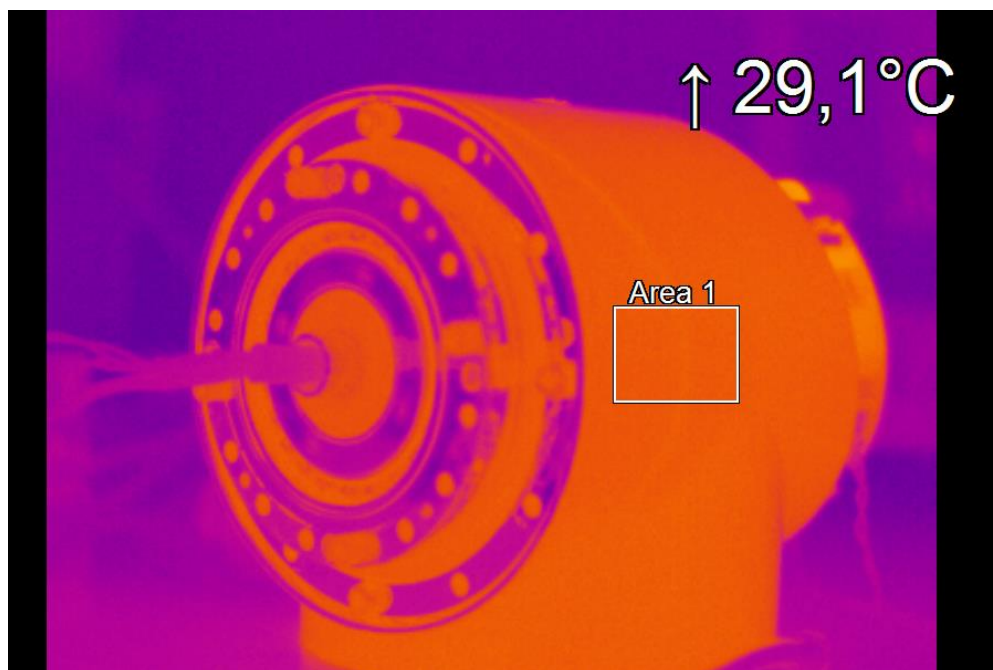


Obrázek 22: Vývoj teploty při nezatíženém stavu

Zdroj: Vlastní

4.2.2 Měření v zatíženém stavu

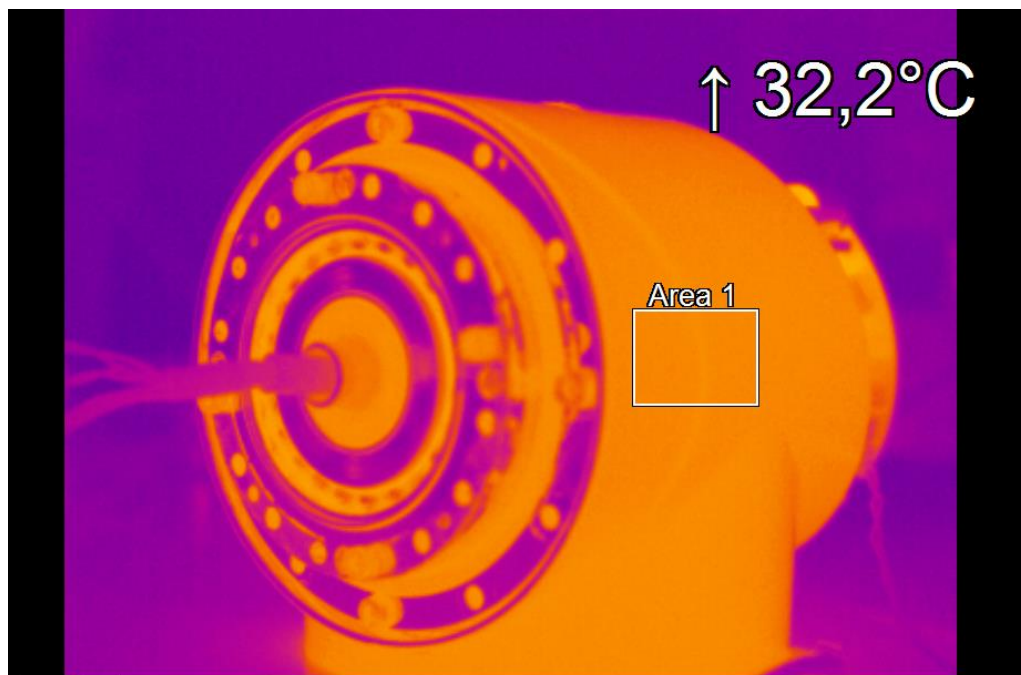
Počáteční teplotu ramene při měření v režimu zatížení termokamera zaznamenala 29,1 °C. Tato hodnota je vyšší než při předchozím měření, což je způsobeno předchozím provozem robota.



Obrázek 23: Počátek měření v zatíženém stavu

Zdroj: Vlastní

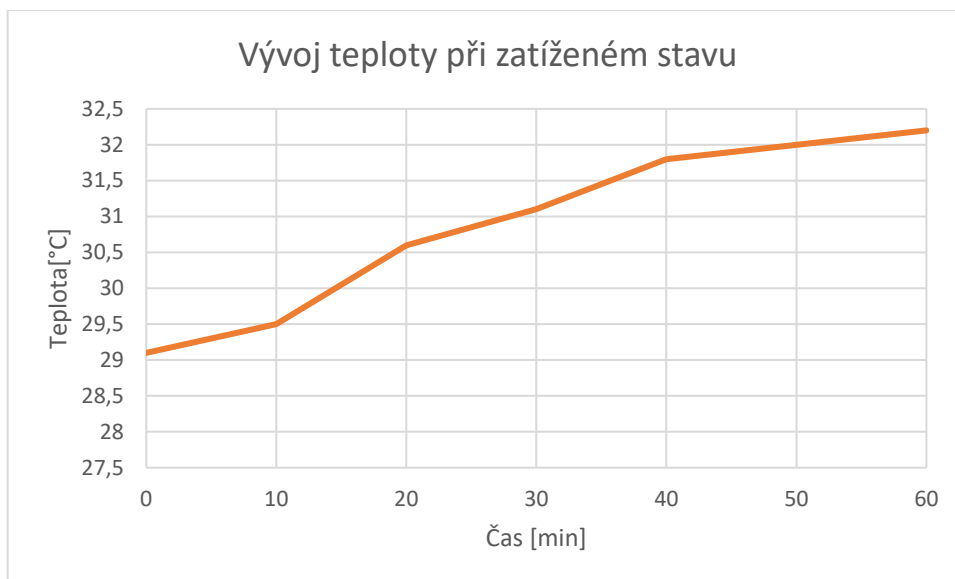
Po uplynutí jedné hodiny provozu při zatížení byla zaznamenána teplota 32,2 °C, to představuje patrný nárůst oproti počáteční hodnotě. Nejvyšší teplota byla opět naměřena v oblasti těla robota a ložiska převodovky.



Obrázek 24: Konec měření v zatíženém stavu

Zdroj: Vlastní

Z naměřených hodnot robotického ramene v zatíženém režimu byl vytvořen graf, znázorňující průběh teplotního vzrůstu. Ve srovnání s nezatíženým stavem je zřejmé, že zatížení způsobilo vyšší konečné teploty. Nejvýraznější nárůst byl zaznamenán mezi 10. a 40. minutou provozu. Tento vývoj potvrzuje, že mechanické zatížení má přímý vliv na zvýšení tepelné zátěže.



Obrázek 25: Vývoj teploty při zatíženém stavu

Zdroj: Vlastní

4.3 Měření elektrického příkonu

V průběhu tepelného sledování probíhalo nepřímé měření elektrického příkonu za pomoci odečítání napětí z voltmetru a proudu z ampérmetru. Tyto dvě veličiny byly zaznamenávány ve stejných desetiminutových intervalech jako měření teploty. Následně byl spočítán elektrický příkon pomocí vztahu pro jeho výpočet.

$$P = U * I \quad (18)$$

- U – elektrické napětí
- I – elektrický proud

4.3.1 Elektrický příkon v nezatíženém stavu

Z naměřených hodnot se následně vytvořila tabulka ukazující nepatrné zvýšení napětí a proudu. Po vypočtení elektrického příkonu se ukazuje, že při zvýšení teploty robota v nezatíženém stavu se zanedbatelně zvýší.

Tabulka 1: Měření elektrického příkonu v nezatíženém stavu

Čas [min]	Napětí [V]	Proud [A]	Teplota [°C]	Příkon [W]
0	47,6	0,154	25,1	7,3304
10	47,6	0,154	26,1	7,3304
20	47,6	0,154	26,9	7,3304
30	47,6	0,154	28,3	7,3304
40	47,6	0,154	29,1	7,3304
50	47,7	0,155	29,7	7,3935
60	47,7	0,155	29,8	7,3935

Zdroj: Vlastní

4.3.2 Elektrický příkon v zatíženém stavu

V případě zatíženého provozu robotického ramene bylo zaznamenáno výraznější kolísání proudové zátěže, což se promítlo do postupného nárůstu elektrického příkonu. Ve srovnání s nezatíženým stavem je patrný nárůst spotřeby elektrické energie.

Tabulka 2: Měření elektrického příkonu v zatíženém stavu

Čas [min]	Napětí [V]	Proud [A]	Teplota [°C]	Příkon [W]
0	47,7	0,17	29,1	8,1090
10	47,7	0,175	29,5	8,3475
20	47,7	0,181	30,6	8,6337
30	47,7	0,184	31,1	8,7768
40	47,7	0,186	31,8	8,8722
50	47,7	0,188	32	8,9676
60	47,7	0,191	32,2	9,1107

Zdroj: Vlastní

4.4 Zhodnocení výsledků měření

Porovnáním měření v nezatíženém a zatíženém režimu robota lze zjistit významné rozdíly jak v oblasti teplotního vývoje, tak v hodnotách elektrického příkonu. V nezatíženém stavu zůstával elektrický proud téměř konstantní stejně jako příkon, který se pohyboval kolem 7,33 W. Tomu odpovídal i mírný nárůst teploty během měřeného provozu.

Naopak při zatížení ramene došlo k výraznějším změnám spotřeby elektrického proudu, čímž se zvýšil i příkon. Teplotní zatížení zároveň vystoupalo do vyšších teplot než při nezatíženém. Z těchto údajů vyplývá jasná závislost mezi zatížením, spotřebou elektrické energie a nárůstem teploty. Při vyšším mechanickém zatížení musí robot vykonávat větší práci, což se projevuje zvýšenou spotřebou proudu, vyšším příkonem a následným zahříváním komponent.

Závislost příkonu na teplotě se tak projevuje přímo – zatížení zvyšuje spotřebu proudu a jeho příkon. Spotřeba proudu a příkon se dále postupně zvyšuje při zvyšování teploty zařízení. Tyto poznatky jsou důležité pro plánování pracovních cyklů, celkovou optimalizaci provozu robota a případného chlazení s ohledem na účinnost a životnost jeho komponent.

5 Závěr

Teoretická část bakalářská práce se zabývala problematikou mechanických převodovek se zaměřením na jejich využití v oblasti automatizace, především průmyslové robotiky. Byly zde popsány základní principy fungování převodových mechanismů, jejich klasifikace a charakteristické vlastnosti. Součástí této části byly rovněž uvedeny základní mechanické vztahy a výpočty související s dimenzováním a namáháním převodů ozubenými koly.

Praktická část se zaměřila na měření elektrického příkonu a vývoje teploty u robotického ramene ve dvou režimech – nezatíženém a zatíženém prací a vlastní vahou harmonické převodovky využívané robotickým ramenem AUBO i5. Výsledky měření ukázaly významné rozdíly v chování systému v závislosti na úrovni zatížení. V nezatíženém režimu byl elektrický proud i příkon stabilní, teplotní nárůst byl mírný. Naproti tomu při zatížení ramene docházelo k větší spotřebě elektrického proudu, vyšším hodnotám příkonu a zároveň k většímu ohřevu převodového systému.

Z těchto pozorování jasně vyplývá přímá závislost mezi mechanickým zatížením, spotřebou elektrické energie a nárůstem teploty. Při vyšším zatížení musí robot vykonávat větší práci, což vede ke zvýšení proudu a příkonu, a tím i k vyšší tepelné zátěži jednotlivých komponent. Tento vztah se projevuje také tak, že s rostoucí teplotou může docházet k dalšímu postupnému zvyšování příkonu, což je důležité z hlediska provozní efektivity.

Na příkon a teplotní zatížení má kromě mechanického zatížení významný vliv také rychlost otáčení. Vyšší rychlosti vedou k rychlejšímu zahřívání motorů a převodových částí, čímž dochází ke zvýšení energetických nároků a zátěže. Optimalizace rychlostního profilu pohybu je proto klíčová pro udržení energetické účinnosti a zabránění přehřívání.

Získané výsledky mají praktický význam při optimalizaci pracovních cyklů robotických systémů a při návrhu řízení chlazení. Přispívají rovněž k efektivnějšímu plánování údržby a prodloužení životnosti mechanických součástí, zejména převodových mechanismů.

Seznam použité literatury

KŘÍŽ, Rudolf a KOL. *Stavba a provoz strojů II: Převody*. Praha: SNTL – nakladatelství technické literatury, 1978. ISBN 04-223-28. [cit. 2025-06-01].

KOCMAN, František. *Vývoj převodového ústrojí*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 2020. [cit. 2025-06-01].

BĚLOHALV, Michal. *Konstrukce a výpočty mechanismů s ozubenými převody*. Bakalářská práce. České Budějovice: Vysoká škola technická a ekonomická v Českých Budějovicích, 2017. [cit. 2025-06-01].

BŘOUŠEK, Josef. *Model planetového soukolí*. Bakalářská práce. Liberec: Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra vozidel a motorů, 2011. [cit. 2025-06-01].

DVOŘÁK, Martin. *Návrh variátorové převodovky pro motorový skútr*. Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav konstruování a částí strojů, 2019. [cit. 2025-06-01].

BŘEZINA, Stanislav. *Analýza technologie výroby řetězových kol*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2009. [cit. 2025-06-01].

VEJREK, Tomáš. *Analýza moderních technologií výroby čelního ozubení*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, 2008. [cit. 2025-06-01].

VEJRAŽKA, Petr. *Modelování kinematických chyb pohonových řetězců*. Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav výrobních strojů a zařízení, 2021.

Harmonic Drive® Strain Wave Gear Technology. Online. Harmonic Drive®. 2022. Dostupné z: <https://www.harmonicdrive.net/technology/harmonicdrive>. [cit. 2025-06-01].

Master CNC Machining for Planetary Gear: Design, Tools, and Applications. Online. Want.net. 2025. Dostupné z: <https://www.want.net/master-cnc-machining-for-planetary-gear-design-tools-and-applications/>. [cit. 2025-06-01].

PALEIT, Andreas. *March of the cobots: the technology lowering the barrier to automation*. Online. FINANCIAL TIMES. 2025. Dostupné z: <https://www.ft.com/content/78c1d4e9-ad30-47f5-ab7b-390df5bc1f10>. [cit. 2025-06-01].

IRB 1200. Online. ABB. © 1995–2025. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/roboty/prumyslove-roboty/irb-1200>. [cit. 2025-06-01].

FANUC M-10iD/12. Online. FANUC. © 1987–2025. Dostupné z: <https://www.fanucamerica.com/products/robots/series/m-10/m-10id-12>. [cit. 2025-06-01].

UR5e. Online. UNIVERSAL ROBOTS. © 2025. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/products/ur5e/>. [cit. 2025-06-01].

AUBO i5. Online. AUBO Robotics USA. Dostupné z: <https://aubo-usa.com/aubo-i5/#Innovation>. [cit. 2025-06-01].

Harmonické převodovky WSHD. Online. In: OPIS Engineering k.s. Dostupné z: https://opis.cz/harmonicke_pohony//WSHD.html. [cit. 2025-06-01].

Mechanické převody. Online. ELUC. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/lekce/mechanicke-prevody>. [cit. 2025-06-01].

SVOBODOVÁ, Magdalena. *Převody a mechanismy.* Online. 2013. Dostupné z: https://www.sokolska.cz/DUMy/SPS,%20MEC,%20CAD/VY_32_INOVACE_15-08.pdf. [cit. 2025-06-01].