



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

PÁSOVÉ DÁLKOVĚ ŘÍZENÉ ROBOTICKÉ VOZIDLO

CRAWLER RC ROBOTIC VEHICLE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Filip Daneš

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kašpárek, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Filip Daneš
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce:	Ing. Jaroslav Kašpárek, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

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

Pásové dálkově řízené robotické vozidlo

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Koncepce dálkově řízeného pásového vozidla pro jízdu v terénu s nestabilním podložím. Pásový podvozek zajišťuje trakční sílu a na horní straně rámu robotický mechanismus pro manipulaci. Návrh zahrnuje pásové pojezdové ústrojí, trakční pohon s převody a pohon robotického mechanismu.

Technické parametry a požadavky:

Hmotnost pásového vozidla do 200 kg.

Svahová dostupnost do 100 % (cca 45 °) podélného i příčného sklonu.

Cíle bakalářské práce:

Rešeršní rozbor obdobných pásových vozidel.

Koncepční návrh pásového vozidla.

Rozměrové a výkonové výpočty.

Upřesnění konstrukce pásového vozidla s návrhem komponent.

Pevnostní výpočet vybraných konstrukčních uzlů.

Výkres sestavy pásového vozidla.

Podsestava pásového podvozku.

Dílenské výrobní výkresy.

Seznam doporučené literatury:

JEŘÁBEK, Karel. Stroje pro zemní práce: Silniční stroje. 1. vyd. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1996. ISBN 8070783893.

VLK, František. Dynamika motorových vozidel. 2. vyd. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 8023900242.

BAUER, František. Traktory a jejich využití. 2. vyd. Praha: Profi Press, 2013. ISBN9788086726526.

LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření. 1. vyd. Úvaly: Albra, 2003. ISBN 8086490742.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce zpracovává návrh pásového dálkově řízeného robotického vozidla. Koncept vychází z kritické rešerše obdobných vozidel a stanovených požadavků ze zadání. Po návrhu základní koncepce byly provedeny rozměrové a výkonové výpočty, které byly podkladem pro vznik výsledného 3D modelu vozidla. Práce detailně popisuje jednotlivé součásti, jejich konstrukční řešení a také obsahuje kontrolní pevnostní výpočet vybraných uzlů. Výsledný model odpovídá zadaným parametrům.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pásový podvozek, pásové vozidlo, rám, trakční pohon, robotický mechanismus, robotický manipulátor, pás, hnací kolo, vodící kolo, elektromotor, koncepční návrh

ABSTRACT

The bachelor's Thesis deals with a design of a crawler remote controlled robotic vehicle. The conception is based on a critical research and set pre-stated parameters. The basic conception design was followed up by dimensions and performance calculations creating a foundation for the ultimate 3D model of the crawler vehicle. The thesis describes individual parts and their design solution in detail as well as selected check strength calculations. Designed model meets the pre-set parameters.

KEYWORDS

Tracked chassis, crawler vehicle, frame, traction propulsion, robotic mechanism, robotic manipulator, rubber track, drive sprocket, tension wheel, electric motor, concept design

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DANEŠ, F. *Pásové dálkově řízené robotické vozidlo*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Jaroslav Kašpárek. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/145617>.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jaroslava Kašpárka, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 22. května 2023

.....

Filip Daneš

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych touto cestou poděkoval především vedoucímu své bakalářské práce Ing. Jaroslavu Kašpárkovi, Ph.D. za ochotné rady, tipy a podnětné připomínky. Dále bych rád poděkoval své rodině za kontinuální podporu při studiu.

OBSAH

Úvod	10
1 Rešeršní rozbor RC vozidel s pásovým podvozkem	11
1.1 Vozidla pro hobby účely	11
1.2 Vozidla s praktickým využitím	12
2 Koncepční návrh	16
2.1 Volba pásu	16
3 Rozměrové, výkonové a dodatkové výpočty	18
3.1 Rozměrové výpočty	18
3.2 Výkonové výpočty	19
3.2.1 Silové řešení	20
3.2.2 Výkonová charakteristika	21
3.3 Dodatkové výpočty	24
4 Upřesnění konstrukce s návrhem komponent	25
4.1 Rám	26
4.1.1 Upevnění komponent	27
4.1.2 Poklop a dno	27
4.2 Trakční pohon	27
4.2.1 Elektromotor	28
4.2.2 Převodové ústrojí	29
4.3 Pásové pojezdové ústrojí	29
4.3.1 Hřídele a ložiska	30
4.3.2 Hnací a vodící kola	31
4.3.3 Napínání a nasazování pásu	32
4.4 Elektronické vybavení	32
4.4.1 Baterie	32
4.4.2 Dálkové ovládání	33
4.5 Robotický mechanismus	33
5 Pevnostní výpočty	35
5.1 Kontrola rámu na ohyb	35
Závěr	39
Použité informační zdroje	40
Seznam použitých zkratk a symbolů	43
Seznam příloh	45

ÚVOD

Pásové podvozky umožňují vozidlům provozovat pohyb v terénu, kde musí překonávat příkrá stoupání, zvládnout velké boční sklony či manévrovat ve stěsnaných podmínkách. Vyznačují se malými hodnotami tlaků na stykové ploše pásu a podložky a mají velký záběrný účinek [1]. Jejich hlavní předností je tedy pohyb na kluzkých, hliněných, bahnitých, sypaných či zasněžených podložích a můžeme je vidět u převážně velkých, těžkých strojů pro pozemní práce, zemědělských strojů, sněžných skútrů atd.

V současné době se používá dvou koncepcí pásového podvozku se dvěma nebo čtyřmi pásovými jednotkami. Pásová jednotka přenáší hnací sílu motoru na podložku. Skládá se obvykle z centrálního nosníku, hnacího a napínacího kola, středové vodící kladky, napínacího mechanismu a pásu. Hnací síla motoru je přivedena na hnací kolo, odtud se přenáší na pás. Pásové jsou poháněny pomocí zubů (pryžových bloků) zapadajících do výřezů ve tvarovaném hnacím kole [2].

Námětem této bakalářské práce jsou malá dálkově ovládaná vozidla, která nejsou z hlediska četnosti využití na rozdíl od strojů pro pozemní práce zatím tolik rozšířena, nicméně také velice dobře zužitkují pásový podvozek. Jejich rešerší a využitím bude věnována celá následující kapitola, nicméně obecnými společnými znaky je pohyb takového vozidla do míst těžko přístupných člověku či vozidlu s běžným kolovým podvozkem nebo prostředí člověku nebezpečnému za účelem vykonání specifické práce.

Obvyklou nevýhodou pásových podvozků bývají vyšší pořizovací náklady, náklady na údržbu a hmotnost [1]. Tyto nevýhody jsou ovšem v případě jednoduchých malých vozidel v porovnání s jejich přednostmi poměrně zanedbatelné. Cenově vysoce nákladnou položkou je individuální doplňkové vybavení (kamery, sensory, robotické manipulátory, ...) pro konkrétní účely vozidla, a i proto je pásový podvozek zajišťující vysokou míru podélné a příčné stability vhodnou bezpečnou variantou.

Cílem této bakalářské práce je návrh pásového dálkově řízeného robotického vozidla o hmotnosti do 200 kg, které bude obsahovat robotický mechanismus pro manipulaci s materiálem. Směr koncepce bude určen na základě kritické rešerše obdobných vozidel, přičemž základním prvkem bude zvolení typu pásové jednotky a výběr konkrétního modelu pásu. Následně budou provedeny rozměrové a výkonové výpočty, které budou podkladem pro návrh pásových jednotek, rámu a trakčního pohonu. Jednotlivé komponenty budou podrobně popsány. Robotický mechanismus bude zvolen na základě finálních rozměrů vozidla, především, aby jeho rameno zajišťovalo dostatečný dosah a byl vhodný pro montáž do navržené koncepce.

1 REŠERŠNÍ ROZBOR RC VOZIDEL S PÁSOVÝM PODVOZKEM

Dálkově řízená robotická vozidla s pásovým podvozkem lze z hlediska využitelnosti rozřadit do dvou hlavních kategorií. Těmto kategoriím je následně přizpůsoben design, kvalita zpracování, technické požadavky i doplňková výbava.

1.1 VOZIDLA PRO HOBBY ÚČELY

První a poměrně širokou kategorií jsou modely stavěné pro nadšence, modeláře či obecně pro zábavu a volnočasové aktivity. Nejsou určeny k jinému využití než pro pobavení a často tedy bývají po designové stránce zpracovány jako tank (Obr 1, Obr 3) či jiné atraktivní pásové bojové vozidlo (Obr 2), přičemž spadají pod rozsáhlou škálu ceny i kvality dle přání zákazníka.



Obr 1 Military police pásové vozidlo [6]



Obr 2 GAZ-71 [7]



Obr 3 RC Tank Tiger 1 [8]

Základní technické parametry uvedených modelů jsou pro srovnání uvedeny v (Tabulka 1) níže.

Tabulka 1 Základní technické parametry vozidel pro hobby účely [6][7][8]

Model	Délka [mm]	Šířka [mm]	Výška [mm]	Hmotnost [kg]	Max. Rychlost [km·h ⁻¹]
S-Idee - Military Police	343	174	145	1,3	12
GAZ-71	290	140	105	0,6	5
RC Tank Tiger 1	520	240	200	4,5	5

1.2 VOZIDLA S PRAKTICKÝM VYUŽITÍM

Druhou kategorií jsou dálkově řízená vozidla s pásovým podvozkem cíleně určena k praktickému využití. Na jejich výrobu se specializují profesionální firmy a dle zaměření jsou tato vozidla doplněna o patřičnou výbavu potřebnou k plnění konkrétních úkolů. Především se jedná kamery a sensory pro stroje sloužící jako analytické a průzkumné jednotky v těžko přístupných lokalitách, náročném, nerovném či obecně neznámém terénu, tj. staveniště, potrubí, lesy, doly, zasněžený terén a jiné. Konstrukce těchto vozidel spadá do škály od těžkých a robustních po malé až miniaturní do velice omezených prostorů. Uvedenými zástupci jsou vozidla výrobců Axilex Robotics (Obr 4), Super Droid (Obr 5) a The Machine Lab (Obr 6).



Obr 4 Axilex Robotics: Bunker [9]



Obr 5 Super Droid: MLT-42-W [10]



Obr 6 TML: Glimpse Remote Inspection Robot [11]

Další možným využitím je například udržování a sekání trávy v zahradnictví a zemědělství, shrabování či shromažďování materiálu (listí, sněh), anebo přepravní kapacity pro přepravu materiálu v patřičně nedostupném terénu. Zástupcem jsou například stroje výrobců RoboTech Vision (Obr 7), Spacepac ELK (Obr 8) a Alittrak (Obr 9).



Obr 7 RoboTech: Vision Crawler [12]



Obr 8 Spacepac: ELK-T800RC [13]



Obr 9 Alitrak: DCT-450 [14]

Praktické využití naleznou též roboti vybaveni robotickým mechanismem pro manipulaci s materiálem, umožňující například odběr vzorků, pro člověka potenciálně nebezpečnou manipulaci s nebezpečným materiálem, záchranné či vojenské nasazení nebo desinfekce prostředí. Na roboty zaměřené na taktické využití se zaměřuje již zmíněný výrobce Super Droid (Obr 10), The Machine Lab (Obr 11) nebo Dr Robot (Obr 12).



Obr 10 Super Droid: HD2-S Mastiff Tactical Robot [15]



Obr 11 TML: MMP-30-EOD [16]



Obr 12 Dr Robot: Jaguar V4 [17]

Konstrukce všech zástupců zmíněných či uvedených v rešerši se obecně shodují v tom, že podvozky jsou tvořeny dvěma pásovými jednotkami a pro trakční pohon je volen elektromotor. Pásové jednotky bývají převážně rovné, v menším počtu případů konstrukce delta. Kompletní přehled základních technických parametrů vybraných modelů je uveden pro srovnání níže v Tabulka 2.

Tabulka 2 Základní technické parametry vozidel s praktickým využitím

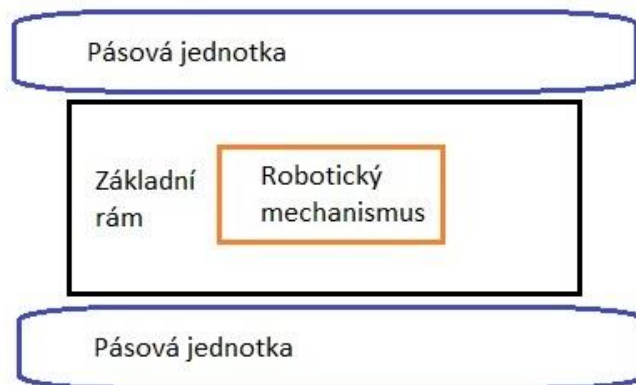
Model	Délka [mm]	Šířka [mm]	Výška [mm]	Hmotnost [kg]	Pohon	Max. Rychlost [km·h ⁻¹]	Zátěž [kg]
Axilex Robotics: Bunker	1023	778	400	150	2x DC 24V/600W	5	80
Super Droid: MLT-42-W	406	330	305	11	-	1,8	-
TML: Glimpse Remote Inspection Robot	390	305	160	7	-	3,5	
RoboTech: Vision Crawler	1000	600	370	70	2x DC 24V/500W	4	80
Spacepac: ELK-T800RC	1385	1031	544	-	2x DC 24V/1500W	3,2	800
Alitrak: DCT-450	1462	824	621	463	2x AC 48V/1500W	3,2	450
Super Droid: HD2-S Mastiff Tactical Robot	965	508	660	68	-	2,2	80
TML: MMP-30-EOD	584	508	350	21	-	5	7
Dr Robot: Jaguar V4	980	700	400	41	4x DC 24V/80W	4,5	10

2 KONCEPČNÍ NÁVRH

Cílem práce je návrh pásového dálkově řízeného robotického vozidla o celkové hmotnosti do 200 kg a svahové dostupnosti do 100 % podélného i příčného sklonu.

Na základě rešeršního rozboru první kapitoly této práce byla vybrána konstrukce skládající se ze dvou rovných pásových jednotek spojených pevnými bočními nápravami s rámem.

Rám představuje nosnou konstrukci pro jednotlivé komponenty trakčního pohonu, pojezdového ústrojí, baterií, řídicího panelu a přenosu signálu. Střední část rámu disponuje prostorem pro umístění volitelné vybavení, pro účely této práce se bude jednat o robotický mechanismus umožňující manipulaci s materiálem. Blokové schéma koncepčního návrhu je možné vidět na Obr 13. Vozidlo i robotický mechanismus budou řízeny dálkově.



Obr 13 Blokové schéma konstrukčního řešení

Je počítáno s celkovou maximální hmotností vozidla cca 80 kg včetně užitečného zatížení robotickým mechanismem a volitelným vybavením, pro tuto hmotnost a požadavek na dosažení maximální svahové dostupnosti byl zvolen a dimenzován trakční pohon v rámci výpočtů následující kapitoly. V návrhu byl kladen důraz na jednoduchost provedení a všestrannost použití v různém terénu.

Pro trakční pohon je zvolen elektromotor s převodovým zařízením, přičemž každé z hnacích kol obou pásových jednotek bude poháněno vlastním. Elektromotory pohání zadní hnací kola a vozidlo bude řízeno smykem. Elektromotory i robotický mechanismus budou napájeny bateriemi.

2.1 VOLBA PÁSU

Základním parametrem pro koncepci, rozměrové a výkonové výpočty vozidla byla správná volba pojezdového pásu. Požadavkem byla šířka okolo 100 mm, dostatečný vzorek pro provoz a práci v náročném kluzkém terénu a přijatelná cena.

Z několika dostupných variant na trhu byl zvolen pryžový pás Robot Track 100/40/50 výrobce VercoTrack určen pro robotická vozidla. [18]

Jeho rozměrové parametry, uvedeny v tabulce níže v Tabulce 3 dostatečně odpovídají plánovaným charakteristikám a proporcím vozidla dle rešerše, zároveň je dle výrobce přímo vhodný pro roboty se celkovým zatížením do 200 kg.

Tabulka 3 Technické parametry pásu Robot Track 100/40/50 [18]

Délka pásu	L_p [mm]	2000
Šířka pásu	B_p [mm]	100
Rozteč zubů	t_{zp} [mm]	40
Počet zubů	n	50

Pás na vnitřní straně obsahuje zuby (pryžové bloky), skrze které je na něj převáděna hnací síla pohonu přes tvarované hnací kolo. Je lehké hmotnosti 4 kg a jeho dostatečně hluboký vzorek umožňuje všestranné použití. Obrázek pásu je možné vidět na Obr 14.



Obr 14 Robot Track 100/40/50 [18]

3 ROZMĚROVÉ, VÝKONOVÉ A DODATKOVÉ VÝPOČTY

Dle koncepčního návrhu a parametrů zvoleného pásu byly provedeny rozměrové, výkonové a dodatkové výpočty umožňující upřesnění konstrukce navrhovaného vozidla dle cílů práce.

3.1 ROZMĚROVÉ VÝPOČTY

Rozměrové výpočty byly provedeny pro zjištění vhodných charakteristik pásových jednotek, rámu i celkových rozměrů navrhovaného vozidla. Jelikož v koncepčním návrhu byly zvoleny rovné pásové jednotky, tak hnací i napínací kola budou stejných rozměrů. Nejprve byl dle koncepčních rozměrů vozidla určen návrhový průměr hnacího kola, který byl následně dle výpočtů upraven tak, aby počet jeho obvodových drážek odpovídal roztečí zubů pásu [4].

$$O_n = \pi \cdot D_n \text{ [mm]} \quad (1)$$

$$O_n = \pi \cdot 230 = 722,566 \text{ mm}$$

$$O_n = 722,6 \text{ mm}$$

$$n_{nt} = \frac{O_n}{t_{zp}} \text{ [-]} \quad (2)$$

$$n_{nt} = \frac{722,6}{40} = 18,065$$

$$n_t = 18$$

$$O_t = t_{zp} \cdot n_t \text{ [mm]} \quad (3)$$

$$O_t = 40 \cdot 18 = 720 \text{ mm}$$

$$O_t = 720 \text{ mm}$$

$$D_t = \frac{O_t}{\pi} \text{ [mm]} \quad (4)$$

$$D_t = \frac{720}{\pi} = 229,183 \text{ mm}$$

$$D_t = 229,2 \text{ mm}$$

Kde O_n – Návrhový obvod hnacího kola

O_t – Vypočtený obvod hnacího kola

D_n – Návrhový průměr hnacího kola

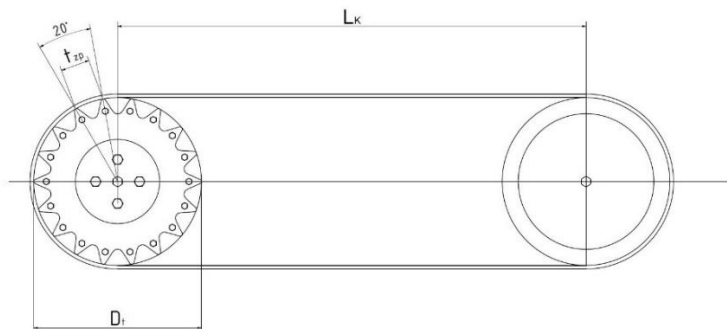
D_t – Vypočtený průměr hnacího kola

n_{nt} – Návrhový počet drážek pro zuby hnacího kola

n_t – Vypočtený počet drážek pro zuby hnacího kola

t_{zp} – Rozteč zubů

Následně byl proveden výpočet osové vzdálenosti hnacího a napínacího kola, znázorněné na schématu (Obr 15), dle průměru vypočteného rovnicí (4). Vzhledem k identickým úhlům opásání obou kol byla sestavena rovnice (5) [4] popisující osovou vzdálenost jako rozměr poloviny délky pásu méně polovina obvodů obou kol.



Obr 15 Schéma rozměrových výpočtů

$$L_K = \frac{1}{2} \left[L_P - \pi \left(\frac{D_{t1}}{2} + \frac{D_{t2}}{2} \right) \right] \quad [mm] \quad (5)$$

$$L_K = \frac{1}{2} \left[2000 - \pi \left(\frac{229,2}{2} + \frac{229,2}{2} \right) \right] = 639,973 \text{ mm}$$

$$L_K = 640 \text{ mm}$$

Kde D_t – Vypočtený průměr hnacího kola

L_P – Délka pásu

L_K – Osová vzdálenost kol

3.2 VÝKONOVÉ VÝPOČTY

Pro výkonové výpočty navrhovaného pádového vozidla bylo využito rovnic, tabulek a postupů z doporučených odborných literatur [1] [2] [3]. Výkonové výpočty dle zadaných parametrů vozidla umožnily výběr adekvátního trakčního pohonu. Vycházelo se z několika klíčových parametrů a koncepčních předpokladů.

Maximální hmotnost vozidla včetně užitečného zatížení je $m = 80 \text{ kg}$.

Dosažení maximální svahové dostupnosti 45° podélného i příčného sklonu.

Maximální rychlost pojezdu je $v_{max} = 3,6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Maximální zrychlení je $a_{max} = 0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

Nejprve bylo provedeno silové řešení pro určení velikosti potřebné hnací síly trakčního pohonu vozidla, na základě které bylo možné určit jeho potřebný točivý moment, hnací výkon a efektivní výkon pohonu.

3.2.1 SILOVÉ ŘEŠENÍ

Potřebná hnací síla F_h je u pásového podvozku určena jako součet jízdních odporů vozidla viz rovnice (6) [2].

$$F_h = F_v + F_w + F_s + F_a + F_{vn} \quad [N] \quad (6)$$

Kde F_h – Hnací síla

F_v – Síla valivého odporu

F_w – Síla odporu vzduchu

F_s – Síla odporu stoupání

F_a – Síla setrvačného odporu při rozjezdu

F_{vn} – Vnitřní pasivní odpory mechanismu pojezdového ústrojí

Na základě koncepčních předpokladů můžeme vycházet z toho, že vozidlo se bude pohybovat rychlostí nižší než $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Pro rychlosti nižší $9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ může být síla odporu vzduchu zanedbána.

$$F_w = 0 \text{ N}$$

Síla valivého odporu F_v bude vypočítána v rovnici (7) [2] pro nejhorší možný scénář součinitele odporu valení f uvedeného v následující Tabulka 4, tj. pro zorané pole. [2] Str 129.

Tabulka 4 Součinitel odporu valení na různých podložkách

Druh a stav podložky	Součinitel odporu valení f (-) pro pásový podvozek
Asfalt	-
Suchá polní cesta	0,05-0,07
Strniště	0,07-0,08
Poorané pole	0,08-0,12
Posečená louka	0,08

(7)

$$F_v = G_t \cdot f = m \cdot g \cdot f \quad [N]$$

$$F_v = 80 \cdot 9,81 \cdot 0,12 = 94,176 \text{ N}$$

$$F_v = 94,2 \text{ N}$$

Dle technických požadavků na svahovou dostupnost vozidla do 100 % (cca 45°) podélného i příčného sklonu byla pro výpočet odporu stoupání bude použita tato maximální hodnota. Síla na překonání stoupání F_s je dána složkou tíhy vozidla, rovnoběžnou s povrchem podložky [2] Str 148.

$$F_s = G \cdot \sin \alpha = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad [N] \quad (8)$$

$$F_s = 80 \cdot 9,81 \cdot \sin 45 = 554,937 \text{ N}$$

$$F_s = 554,9 \text{ N}$$

Kde g – Tíhové zrychlení

Setrvačná síla F_a je vyjádřena součinem zrychlení s celkovou hmotností traktoru, které je nutné dodat kinetickou energii pro změnu rovnovážného stavu [2] Str. 148. Pro účely práce bylo zvoleno maximální zrychlení $a_{max} = 0,5 \text{ m/s}$.

$$F_a = m \cdot a_{max} \quad [N] \quad (9)$$

$$F_a = 80 \cdot 0,5 = 40 \text{ N}$$

$$F_a = 40 \text{ N}$$

Vnitřní pasivní odpory mechanismu pojezdového ústrojí F_{vn} jsou z hlediska zadání práce obtížné určit, a proto budou zohledněny až ve výkonových ztrátách.

$$F_{vn} = 0 \text{ N}$$

Finální výpočet potřebné hnací síly navrhovaného vozidlo dle již uvedené rovnice (6) je tedy následující.

$$F_h = F_v + F_w + F_s + F_a + F_{vn} \quad [N] \quad (6)$$

$$F_h = 94,2 + 0 + 554,9 + 40 + 0 = 689,1$$

$$F_h = 689 \text{ N}$$

3.2.2 VÝKONOVÁ CHARAKTERISTIKA

Pro výkonové výpočty byla užitá stejná kritéria jako pro silový rozbor. Důležitou hodnotou pro výkon je maximální rychlost vozidla při dosažení maximální svahové dostupnosti. Na základě rešerše se maximální rychlost obdobných modelů pohybovala průměrně kolem hodnoty 3 až 4 hm/h, a tudíž byla zvolena hodnota 3,6 km/h (převedená a zaokrouhlena na 1 m/s) použita i pro výkonové výpočty navrhovaného vozidla.

Výkon, který musí být přiváděn na hnací kola vozidla k překonání jízdních odporů neboli hnací výkon vozidla P_h , je vypočten jako velikost hnací síly závislá na určené rychlosti vozidla (10) [3] Str 35.

$$P_h = F_h \cdot v_{max} [W] \quad (10)$$

$$P_h = 689 \cdot 1 = 689 W$$

$$P_h = 689 W$$

Kde P_h - potřebný hnací výkon vozidla

v_{max} – maximální navrhovaná rychlost vozidla

Potřebný točivý moment M_k pohonu, který je přiveden na hnací kola navrhovaného vozidla je vyjádřen a vypočten v následující rovnici (11) [3].

$$M_k = F_h \cdot \frac{D_t}{2} [Nm] \quad (11)$$

$$M_k = 689 \cdot \frac{0,2037}{2} = 70,175 Nm$$

$$M_k = 70,2 Nm$$

Kde M_k – potřebný točivý moment pohonu

Efektivní výkon pohonu nelze beze zbytku přeměnit na výkon tahový nebo na výkon přenášený přes vývodový hřídel. Proces této změny je doprovázen ztrátami. Část výkonu motoru je zmařena při mechanických ztrátách, část ve styku pojezdového ústrojí s podložkou (ztráty prokluzem a valením) a část vlivem jízdních podmínek (stoupání a zrychlení) [2] Str 161.

Se zavedenými podmínkami pro účely a charakteristiky této práce nebyly pro výkonovou bilanci zohledněny ztrátové výkony pro překonání odporu vzduchu a užitečné výkony. Matematické vyjádření efektivního výkonu motoru bylo upraveno jako součet výkonu ztraceném v převodovém ústrojí, výkonu ztraceném prokluzem, výkonu ztraceném valením, výkonu potřebném k překonání stoupání a výkonu potřebným ke zrychlení (12) [2].

$$P_e = P_m + P_\delta + P_v + P_s + P_a [W] \quad (12)$$

Kde P_e – efektivní výkon pohonu

P_m – výkon ztracený v převodovém ústrojí

P_δ – výkon ztracený prokluzem

P_v – výkon ztracený valením

P_s – výkon potřebný na překonání stoupání

P_a – výkon potřebný pro zrychlení

Výkon ztracený v převodovém ústrojí P_m je pro účely práce pouze přibližná hodnota, jelikož přesná mechanická účinnost převodů není známá. Pro účely práce byla zvolena doporučená hodnota z literatury a aplikována v rovnici (13) [2].

$$P_m = \frac{P_h}{\eta_m} (1 - \eta_m) [W] \quad (13)$$

$$P_m = \frac{689}{0,95} (1 - 0,95) = 36,263 W$$

$$P_m = 36,3 W$$

Kde η_m – součinitel účinnosti převodu

Při odběru výkonu pojezdovým ústrojím (hnací kola, pásy) vznikají prokluzem pojezdového ústrojí ztráty přenášeného výkonu [2] Str 140. Výkon ztracený prokluzem byl vypočten dle vztahu (14). Dle literatury byla zvolena maximální hodnota prokluzu $\delta = 20 \% = 0,2$, čili hodnota prokluzové účinnosti η_δ použita ve výpočtu je $\eta_\delta = 0,8$. [2]

$$P_\delta = P_h (1 - \eta_\delta) [W] \quad (14)$$

$$P_\delta = 689 (1 - 0,8) = 137,8 W$$

$$P_\delta = 137,8 W$$

Kde η_δ – součinitel účinnosti prokluzu

Výkon ztracený valením byl určen vztahem (15) je vypočten jako závislost síly valivého odporu na zvolené maximální rychlosti navrhovaného vozidla [2].

$$P_v = F_v \cdot v_{max} [W] \quad (15)$$

$$P_v = 94,2 \cdot 1 = 94,2 W$$

$$P_v = 94,2 W$$

Výkon potřebný na překonání svahové dostupnosti dle zadaných parametrů vozidla je vypočten jako závislost síly odporu stoupání na zvolené maximální rychlosti navrhovaného vozidla dle rovnice (16) [2].

$$P_s = F_s \cdot v_{max} [W] \quad (16)$$

$$P_s = 554,9 \cdot 1 = 554,9 W$$

$$P_s = 554,9 W$$

Výkon potřebný pro zrychlení je vypočten jako závislost setrvačného odporu při rozjezdu na zvolené maximální rychlosti navrhovaného vozidla dle rovnice 17) [2].

$$P_a = F_a \cdot v_{max} [W] \quad (17)$$

$$P_a = 40 \cdot 1 = 40 W$$

$$P_a = 40 W$$

Celková hodnota efektivního výkonu pohonu dle vypočtených dílčích částí pro pohyb navrhovaného pásového vozidla je vypočtena dosazením do již uvedeného vztahu.

$$P_e = P_m + P_\delta + P_v + P_s + P_a [W] \quad (12)$$

$$P_e = 36,3 + 137,8 + 94,2 + 554,9 + 40 = 863,2 W$$

$$P_e = 863 W$$

3.3 DODATKOVÉ VÝPOČTY

Jednou ze zadaných hodnot pro charakteristiky navrhovaného vozidla je svahová dostupnost do 100 % (45°) příčného sklonu. Obecně lze říci, že se vozidlo nachází na mezi stability, prochází-li výslednice vnějších sil hranou podstavu (přímkou procházející stykovými body předního a zadního kola podložkou) [2] Str 157. Z doporučené literatury získáváme vztah (18) [2] pro stanovení mezního úhlu svah.

$$\operatorname{tg} \alpha_{lim} = \frac{c_b}{h_T} [-] \quad (18)$$

Kde α_{lim} – velikost limitního úhlu svahu

c_b – příčná vzdálenost středu kola/pásu od těžiště vozidla

h_T – výška těžiště vozidla

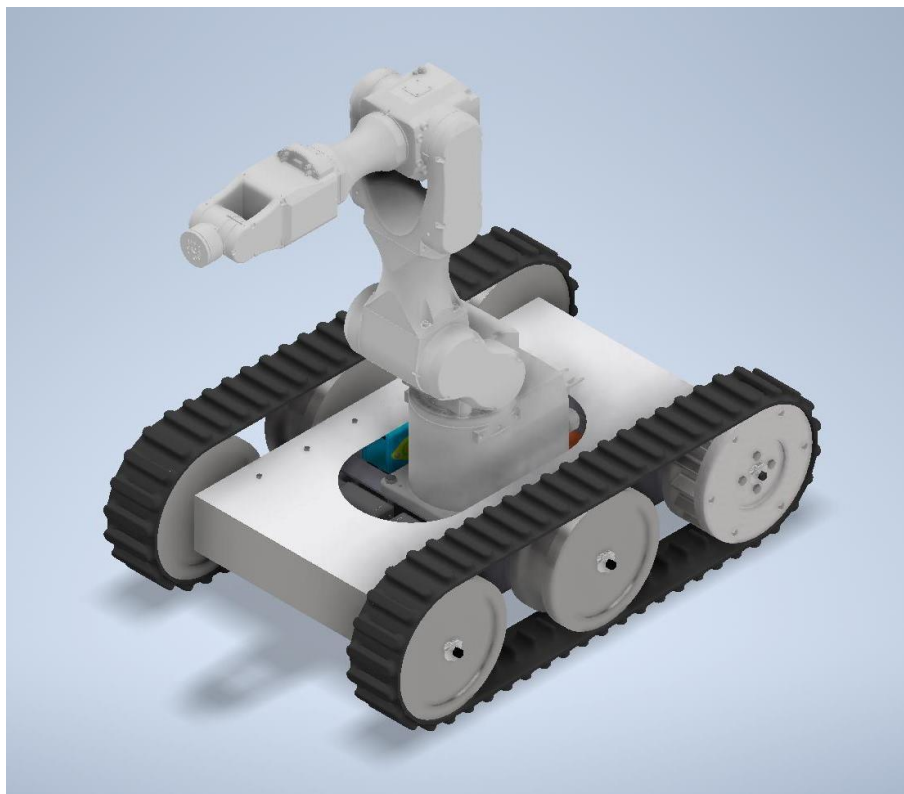
Jelikož svahová dostupnost byla určena jako $\alpha_{lim} = 45^\circ$, přičemž $\operatorname{tg} 45 = 1$, rovnice mohla být upravena na tvar srovnávající c_b a h_T .

$$h_T = c_b$$

Z uvedeného vyplývá, že aby byla zachována příčná stabilita v mezích bezpečnosti, výška těžiště h_T musí být menší než příčný rozměr středu kola/pásu od těžiště. Tento parametr je důležitý pro upřesnění konstrukčního návrhu.

4 UPŘESNĚNÍ KONSTRUKCE S NÁVRHEM KOMPONENT

Do základního koncepčního návrhu byly implementovány rozměrové, výkonové a dodatkové výpočty předchozí kapitoly, které umožnily volbu a návrh vhodných komponentů pro vznik 3D modelu. Model slouží jako podklad pro výkresovou dokumentaci.



Obr 16 Model pásového vozidla

Pro vozidlo byly v rámci této práce navrženy veškeré komponenty rámu (základní rám, dno a poklop), hnací a vodící kola pojezdového ústrojí a ložiskové upevňovací domečky a rámečky hnacích i vodících kol.

Komponenty pohonu (elektromotory, převodovky, hřídele, ložiska, jejich vnější upevňovací rámečky, distanční podložky, upínací kroužky, ...), pásy, baterie, elektronické komponenty (ovladač motoru, vysílač pro přenos signálu, rozvodová stanice, ovladač), spojovací materiál a robotický manipulátor byly katalogově vybrány a dodány od externích výrobců.

Jednotlivé komponenty jsou podrobněji popsány v následujících podkapitolách. Finální rozměry vozidla bez instalovaného robotického manipulátoru jsou uvedeny v Tabulce 5.

Tabulka 5 Rozměry vozidla

Délka vozidla	X [mm]	907
Šířka vozidla	Y [mm]	633
Výška vozidla (bez manipulátoru)	Z [mm]	269

4.1 RÁM

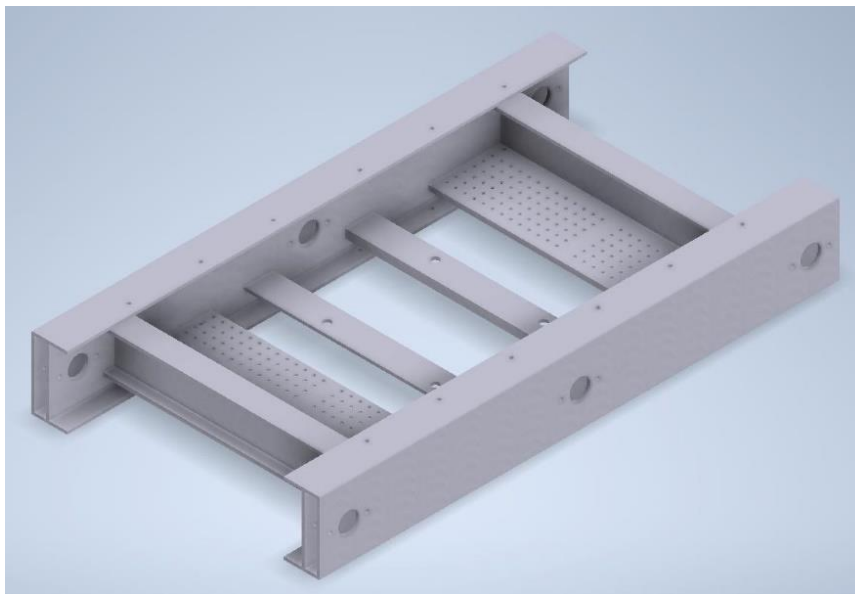
Základní rám je konstrukčně tvořen z ocelových svařených plechů třídy 11 375 dle ČSN [22]. Je složen ze dvou podélných nosných bloků a dvě osově souměrných dvojic příčných bloků [28].

Podélné bloky jsou ve tvaru tenkostěnných rovnoramenných U profilů dle ČSN EN 10162 a pro lepší upevnování komponent a větší tuhost jsou vyztuženy plechem, který je svařen k horní i spodní desce profilu.

Vnější dvojice příčných bloků jsou svařené plechy (dvě desky a výztuha) do tvaru zmenšených IPE profilů. Ve spodní části svařením přechází v plošiny s děrnými otvory pro upevnění instalačních rámečků baterií a dalšího elektronického vybavení.

Vnitřní dvojice příčných bloků, tvořena zkrácenými L profily dle ČSN EN 10056, ve středové části rámu slouží především k montáži robotického manipulátoru. [28]

Všechny příčné bloky jsou navrženy, aby umožňovaly vedení a průchod veškeré kabeláže jednotlivých elektrických komponentů v prostoru pod nimi ve spodu rámu.



Obr 17 Základní konstrukční rám

Rozměry rámu jsou navrženy tak, aby se při smontované podobě s podvozkem jeho spodní část nacházela 84 mm od země a vozidlo mělo dostatečnou prostorovou vůli pro pohyb i v náročném terénu s nerovnostmi. Má také dostatečnou šířku, aby zajišťoval příčnou stabilitu vypočtenou v Kapitole 3.3.

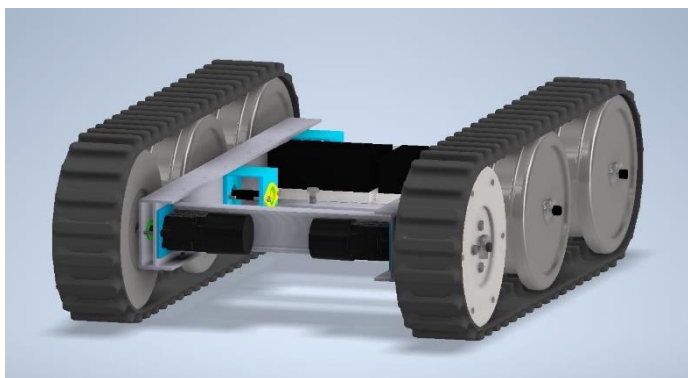
Těžiště kompletní sestavy vozidla bylo graficky určeno v programu Autodesk Inventor a hodnoty c_b a h_T byly následně srovnány a uznány za vhodné.

4.1.1 UPEVNĚNÍ KOMPONENT

Rám představuje základní centrální nosnou konstrukci, ke které jsou uchyceny veškeré další součásti. Je tedy navržen tak, aby rozměrově, pevnostně i polohově vyhovoval potřebám vozidla.

Komponenty trakčního pohonu, tj. elektromotory s převodovkami jsou k rámu pevně uchyceny v zadní části podélných bloků rámu přes ložiskové rámečky. Hřídele podélnými nosnými bloky rámu prochází. Tyto průchody, stejně jako průchody hřídelí vodících kol jsou rozměrově navrženy tak, aby umožňovaly zasunutí vnějších párů ložisek do rámu a jejich uchycení instalačními rámečky.

Další komponenty a jejich upevnění bude podrobněji rozebráno v následujících podkapitolách. Základní ilustrační obrázek upevněných komponent v rámu je možné vidět na Obr 18.



Obr 18 Upevnění komponent v rámu

4.1.2 POKLOP A DNO

Pro ochranu elektromotoru, převodovky a dalších elektrických komponentů od okolního prostředí je úložný prostor rámu ze všech stran uzavřen. Je tak učiněno plechovým poklopem a dnem.

Poklop má ve středové části vyříznutý otvor k zajištění dostatečného prostoru robotickému manipulátoru a také pro možnost ruční manipulace s bateriemi, tj. jejich vyjmutí pro dobíjení, a dalšími elektrickými komponenty bez nutnosti poklop odmontovat. Navíc se skládá ze dvou protilehlých částí a lze tedy případně odmontovat pouze jednu část či obě zároveň bez toho, aniž by byla potřeba nejprve odstranit robotický manipulátor.

Dno je tvořeno ohýbaným plechem tvaru místy, zajišťuje ochranu rámu zespodu, stejně jako přední i zadní části rámu. Zároveň je podporou pro vedenou kabeláž.

4.2 TRAKČNÍ POHON

Pro trakční pohon byly zvažovány dvě varianty od různých výrobců. Jednalo se o model CIM Motor výrobce Vex Robotics a model NEO Motor výrobce Rev Robotics. V obou případech

se jednalo o 12 V DC elektromotory podobných charakteristik a technických parametrů s převodovým zařízením [19][26]. Srovnání parametrů je uvedeno v Tabulce 6 níže.

Tabulka 6 Technické parametry vybraných elektromotorů [19][26]

	Vex Robotics: CIM Motor	Rev Robotics: NEO 1.1 Motor
Max. výkon [W]	337 W	406 W
Max. kroutící moment [Nm]	2,41 Nm	2,6 Nm
Max. proud [A]	131 A	105 A
Nominální napětí [V]	12 V	12 V
Rychlost [ot·min ⁻¹]	5330 ot·min ⁻¹	5676 ot·min ⁻¹
Průměr válcového těla [mm]	64 mm	60 mm
Hmotnost [kg]	1,27 kg	0,425 kg
Pořizovací cena (včetně převodovky) [USD]	127.93 USD	140.00 USD

4.2.1 ELEKTROMOTOR

Dle srovnání obou modelů byl jako finální varianta vybrán Rev Robotics NEO 1.1 Motor. Jeho cena je sice nákladnější, ovšem dosahuje vyšších maximálních výkonů včetně výrobcem uvedeného maximálního teoretického výkonu až 540 W. Tyto výkony jsou vhodnější pro požadované vypočtené výkonové charakteristiky navrhovaného vozidla dle předchozí kapitoly.

Při instalaci 2 ks elektromotoru je sice celkový efektivní výkon obou pohonů (812 W) nižší než výsledná hodnota výkonových výpočtů, nicméně pro praktické použití vozidla není nezbytné, aby při maximální svahové dostupnosti 45° dosahovalo i maximální rychlosti a maximálního zrychlení. Při provozu je tedy celkový efektivní výkon zvolených pohonů dostatečný.



Obr 19 Rev Robotics NEO 1.1 Motor [19]

Ovládání motorů zajišťují jednotky SPARK MAX Motor Controller od stejného výrobce Rev Robotics [20].



Obrázek 20 SPARK MAX Motor Controller [20]

4.2.2 PŘEVODOVÉ ÚSTROJÍ

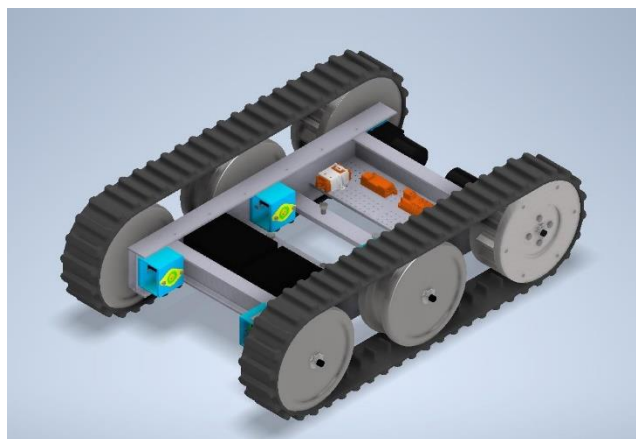
Elektromotor bude připojen s planetovým převodovým ústrojím MAXPlanetary system stejného výrobce a bude mu umožněn převodový stupeň 16:1 [21]. Každá tato sestava pohání jedno vodící kolo v zadní části základního rámu. Díky malým rozměrům je možné bezproblémové umístění sestav naproti sobě.



Obr 21 Rev Robotics MAXPlanetary System Gearbox [21]

4.3 PÁSOVÉ POJEZDOVÉ ÚSTROJÍ

Pásové pojezdové ústrojí se skládá ze dvou pásů, páru hnacích kol, dvou párů vodících kol, třech párů hřídelí, ložisek, ložiskových domečků, rámečků a materiálu pro upevnění a uložení. Detail je zobrazen na Obr 22.



Obr 22 Detail pásového pojezdového ústrojí

Vše tvoří dvě rovné protilehlé pásové jednotky pevně spojenými bočními nápravami s rámem. Každá jednotka obsahuje hnací kolo uložené vzadu, vodící kolo uložené vpředu pro napínání pásu a vodící kolo ve středu sloužící jako středová vodící kladka pro rozložení hmotnostního zatížení vozidla na pás a rozložení trakce pásu s povrchem.

4.3.1 HŘÍDELE A LOŽISKA

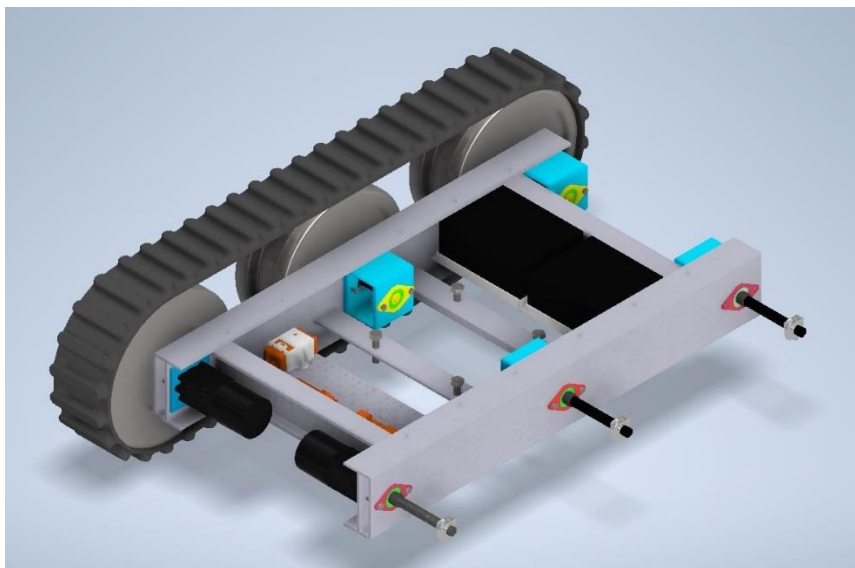
Hřídele jsou stejné kompatibilní modelové řady jako trakční pohon a byly dodány od stejného výrobce. Jsou hexagonální a dle toho jsou hexagonálně navrženy také nasazovací otvory ve hnacích i vodících kolech. Točivý moment je přenášen na hnací kola tvarem hřídele bez nutnosti pera dle manuálu výrobce [27].

Hřídele prochází skrze rám a jsou otočné vždy na dvojici přírubových ložisek dodávaných výrobcem trakčního pohonu a jejich konstrukční upevnění je provedeno na základě výrobcova doporučení [27].

Ložiska jsou radiální kuličková. Jedno přírubové ložisko je vždy zasunuto do rámu z jeho vnější strany a upevněno vlastním rámečkem dodávaným výrobcem. Druhé přírubové ložisko je v případě vodících kol na vnitřní straně rámu zasazeno do navrhnutého ložiskového domečku a opět upevněno vlastním rámečkem. Ložiskový domeček je pevně upevněn k rámu. Hřídele jsou axiálně upnuty výrobcem dodávanými koncovkami a upínacími kroužky.

Hřídele hnacích kol prochází na vnitřní straně rámu navrhnutým ložiskovým rámečkem, které je rozměrově navrženo tak, aby umožňovalo vsunutí přírubového ložiska a jeho upevnění přitlačeným elektromotorem. Elektromotory jsou i s ložiskovými rámečky pevně přichyceny k rámu.

Detail je možné vidět níže na Obr 23.

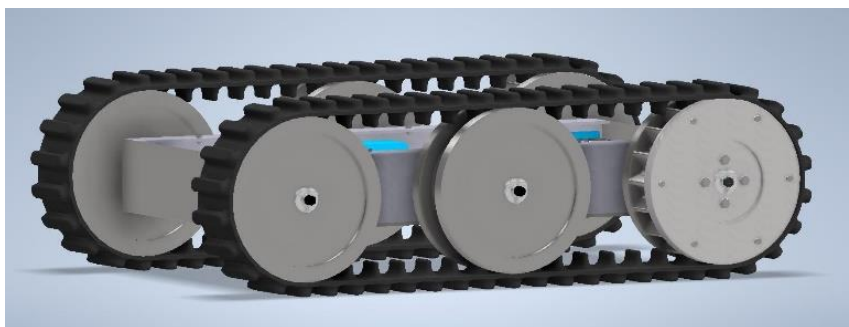


Obr 23 Uložení pojezdového ústrojí v rámu

4.3.2 HNACÍ A VODÍCÍ KOLA

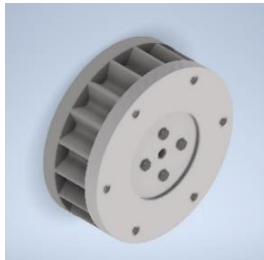
Pro návrh tvaru ozubení hnacího kola byl použit model, parametry a nákres hnacích kol poskytnutých a doporučených výrobcem pásu VercoTrack pro konkrétní zvolený pás [29].

Na základě toho byl dle potřebných rozměrů pryžových bloků na vnitřní straně pásu a rozměrových výpočtů provedených v kapitole 3.1 vytvořen vlastní 3D model hnacího kola s potřebným počtem, tvarem a rozměrů výřezů (zubů), celkovou šířkou a také průměrem a tvarem otvoru pro hřídel.



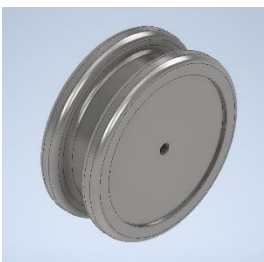
Obr 24 Detail pásové jednotky

Centrální část hnacího kola tvoří ozubení, zadní část je rovná a určena k rozložení tlaku na pás. Pro snadné nasazování napnutého pásu je přední část hnacího kola tvořena odmontovatelnou přírubou.



Obr 25 Hnací kolo

Vodící kola jsou stejného průměru jako hnací, v centrální části nemají ozubení, ale menší průměr pro zajištění pásu. Středový pár vodících kol bývá v pásových podvozcích obvykle v podobě středové vodící kladky, ovšem pro toto vozidlo byl z konstrukčních charakteristik pásových jednotek zvolen stejný průměr jako hlavní vodící kola. Jak hnací, tak vodící kola mají šířku menší než šířka pásu.



Obr 26 Vodící kolo

Jako materiál hnacích kol, jejich přírub a vodících kol byl vybrán polyetylen UHMW – PE 1000, jakožto konstrukční materiál s vysokou odolností vůči otěru a opotřebením, vysokou rázovou a vrubovou houževnatostí a nízkou hmotností [34].

4.3.3 NAPÍNÁNÍ A NASAZOVÁNÍ PÁSU

Pás a jeho technické parametry byly již podrobněji popsány v kapitole 2.1 Volba pásu. Každý z pásů je držen v napnuté poloze na své pásové jednotce jeho pevnou polohou na hnacích a vodících kolech pevně uložených na hřídelích s vypočtenou osovou vzdáleností. Je tak realizováno systémem jeho nasazení na pásovou jednotku.

Nasazování pásu se provádí tak, že je pás nejprve zasazen do drážky centrální části vodícího kola o nižším průměru a dále zuby nasazen na tvarovanou středovou část hnacího kola. Na hnacím kole je napnutý pás uzamčen odmontovatelnou přírubou a tím je na pojezdovém ústrojí pevně držen v napnuté poloze.

4.4 ELEKTRONICKÉ VYBAVENÍ

Pro umístění elektronického vybavení slouží vodorovné upevňovací plošiny rozšiřující se ze spodní části příčných bloků základního rámu. Elektronika je vybrána převážně z katalogu modelové výrobce RevRobotics. Jedná se o ovladače motorů, rozvodovou stanici a vysílač pro přenos signálu, přičemž jejich umístění je koncipováno na zadní upevňovací plošinu. Vysílač umožňuje přenos signálu a dálkové ovládání vozidla. Dále obsahuje akumulátory a dálkové ovládání, které budou popsány v podkapitolách níže.

Elektronika může být doplněna o širokou škálu volitelného vybavení dle nabídky výrobce či jiných kompatibilních robotických systémů, například o kamery či sensory.

4.4.1 BATERIE

Pro napájení trakčního pohonu a elektronického vybavení byla vybrána dvojice 12 V olověných akumulátorů ES10-12S výrobce MK Powered [31]. Každý z akumulátorů má kapacitu 10 Ah a hmotnost 3,29 kg. Dle grafů technické specifikace budou dohromady zásobovat vozidlo elektrickou energií pro více než 40 minut pojezdu.

Pro lepší hmotnostní vyváženost a stabilitu vozidla je jejich umístění koncipováno na přední plošině ve vlastních instalačních rámečcích. K plošině je v otvoru poklopu dostatečný přístup a baterie je tedy možné lehce z instalačních rámečků pomocí nabíječky dobít. V případě potřeby je možné do vymezeného prostoru instalovat jiné modely.



Obr 27 MK Powered ES10-12S [31]

4.4.2 DÁLKOVÉ OVLÁDÁNÍ

Pro dálkové ovládání byl zvolen model V5 Controller výrobce VexRobotics, který využívá přenos signálu Bluetooth a rádio. Má dva analogové joysticky, 12 programovatelných tlačítek a LCD obrazovku pro zobrazení odezvy a dat v reálném čase. Je bezdrátový a napájený vlastní baterií [33]. Zobrazen je níže na Obr 28.



Obr 28 Dálkové ovládání V5 [33]

4.5 ROBOTICKÝ MECHANISMUS

Jako robotický mechanismus byl pro účely této práce vybrán model C4L výrobce Epson Robot viz Obr 29. Je 6-osý s dosahem ramene až 900 mm pro užitečné zatížení až 4 kg [32].



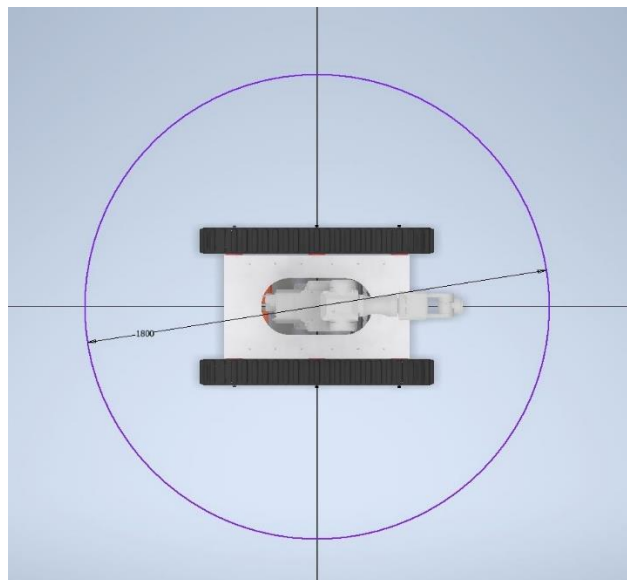
Obr 29 Robotický manipulátor Epson C4L [32]

Robot Epson C4L je vhodný svými rozměry k finálním rozměrům navrhnutého vozidla, relativně nízkou váhou, ideálním dosahem ramene a schopností vykonávat nejrůznější činnosti, převážně manipulaci s materiálem a montáž. Technické parametry jsou uvedeny v následující Tabulce 7. Jeho nevýhodou je kvalita značky a vysoká cena, proto může být dle potřeb nahrazen obdobnými modely levnějších výrobců.

Tabulka 7 Technické parametry robotického manipulátoru Epson C4L [32]

Hmotnost [kg]	29 kg
Počet os [-]	6
Max. užitečné zatížení [kg]	4 kg
Max. dosah [mm]	900 mm
Doba cyklu [s]	0,47 s
Opakovatelná přesnost [mm]	0,03 mm

Jeho umístění v modelu je pevné v centrální části na příčných blocích. Bloky jsou v rámu konstruovány tak, aby umožňovaly co nejnižší těžiště a zároveň dostatečný prostor pro průchod kabeláže podél dna. Umisťovací plocha je univerzální s možností případné výměny modelu za jiný dle pracovního nasazení a potřeb vozidla. Dosah robota vzhledem k rozměrům vozidla je za účelem přenosu materiálu je graficky zobrazen na Obr 30.



Obr 30 Dosah robotického mechanismu

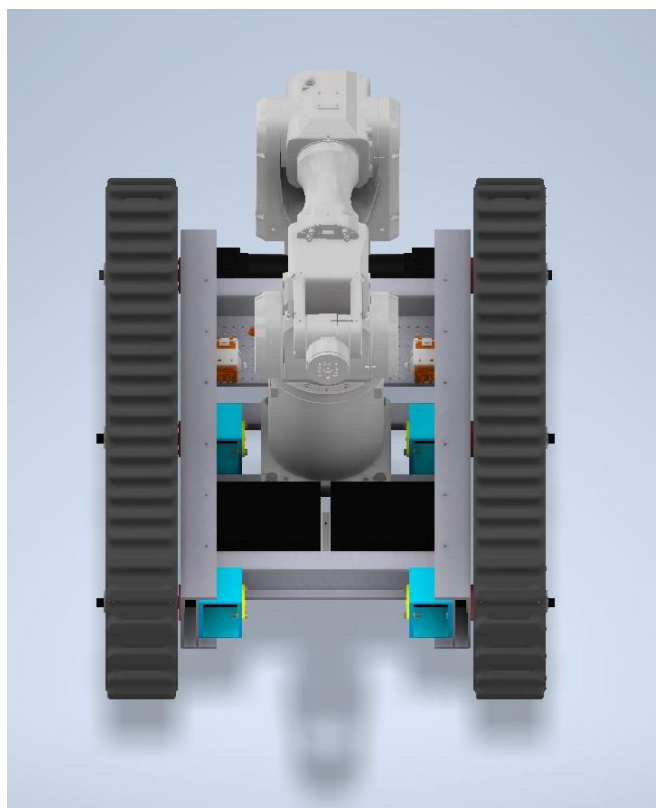
5 PEVNOSTNÍ VÝPOČTY

Jelikož nelze s jistotou určit přesnou váhu konceptu vozidla ani rozložení jednotlivých komponent, není stanovení pevnostních výpočtů jednoduché. Pro účely této práce bude provedena kontrola pevnosti rámu, přičemž za nejkritičtější místo je považována dvojice příčných bloků zatížených manipulačním zařízením. Jako materiál rámu byly vybrány ohýbané plechy oceli třídy 11 375 dle ČSN. [22][23]

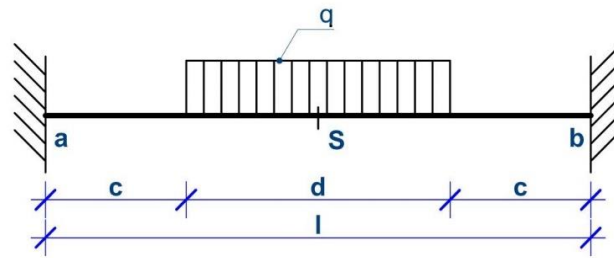
5.1 KONTROLA RÁMU NA OHYB

Je předpokládáno, že si dvojice příčných bloků rozdělí zatížení manipulačním zařízením v jeho statické základní poloze na polovinu. Z tohoto hlediska bude následující výpočet proveden pouze pro jeden příčný blok, a to s hodnotami zatížení odpovídajícímu poloviční hmotnosti robotického manipulátoru $m_{1/2} = 14,5 \text{ kg}$. Veškeré popisy hmotnosti či spojitého zatížení robotickým manipulátorem budou tuto s touto skutečností pracovat bez dalšího opakovaného vysvětlení.

Byly provedeny výpočty pro určení maximálního ohybového momentu, maximálního ohybového napětí, průhybu a stanovení koeficientu bezpečnosti. Na Obrázku 28 lze vidět příčný blok zatížen robotickým manipulátorem a na Obrázku 29 zjednodušené schéma pro výpočet.



Obr 31 Kontrola rámu v ohybu



Obr 32 Silový obrazec [24]

Spojité zatížení q představuje rovnoměrné symetrické spojitě zatížení robotického manipulátoru po délce $d = 180 \text{ mm}$. Příčný blok má délku $l = 350 \text{ mm}$, je to ohnutý plech do tvaru L, nicméně pro účely těchto výpočtů bude zohledněn pouze vodorovný obdélníkový průřez o šířce $b = 40 \text{ mm}$ a výšce $h = 4 \text{ mm}$. Modul pružnosti pro ocel 11 375 dle ČSN je stanovena jako $E = 210 \text{ GPa}$ a mez pružnosti $R_e = 235 \text{ MPa}$. [23]

Nejprve byla ze vztahu (19) [24] vypočteno spojitě zatížení q a ze vztahu (20) [24] hodnota maximálního ohybového momentu M_{Max} .

$$q = \frac{G}{d} = \frac{m_{1/2} \cdot g}{d} \quad [N \cdot m^{-1}] \quad (19)$$

$$q = \frac{14,5 \cdot 9,81}{0,18} = 790,25 \quad [N \cdot m^{-1}]$$

$$q = 790,3 \quad [N \cdot m^{-1}]$$

$$M_{Max} = \frac{q \cdot d}{24 \cdot l} (3 \cdot l^2 - d^2) \quad [N \cdot m] \quad (20)$$

$$M_{Max} = \frac{790,3 \cdot 0,18}{24 \cdot 0,35} (3 \cdot 0,35^2 - 0,18^2) = 5,674 \quad N \cdot m$$

$$M_{Max} = 5,7 \quad N \cdot m$$

Kde q – spojitě zatížení robotického manipulátoru na část příčného bloku

G – tíhové zatížení robotického manipulátoru

$m_{1/2}$ – Polovina hmotnosti robotického manipulátoru

M_{Max} – maximální ohybový moment

d – délka robotického manipulátoru

l – délka příčného bloku

Ze vztahu (21) [25] byl určen moment setrvačnosti J a ze vztahu (22) [25] průřezový modul v ohybu W_0 .

$$J = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad [mm^4] \quad (21)$$

$$J = \frac{40 \cdot 4^3}{12} = 213,3 \text{ mm}^4$$

$$J = 213,3 \text{ mm}^4$$

$$W_o = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad [m^3] \quad (22)$$

$$W_o = \frac{0,04 \cdot 0,004^2}{6} = 0,106 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$W_o = 0,106 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

Kde b – šířka průřezu příčného bloku

h – výška průřezu příčného bloku

J – moment setrvačnosti průřezu příčného bloku

W_o – modul v ohybu průřezu příčného bloku

Vypočtené hodnoty byly ve vztahu (23) [25] použity pro určení maximálního ohybového napětí σ_o a následně koeficientu bezpečnosti k z rovnice (24) [25].

$$\sigma_o = \frac{M_{Max}}{W_o} \quad [Mpa] \quad (23)$$

$$\sigma_o = \frac{5,7 \cdot 10^{-6}}{0,106 \cdot 10^{-6}} = 53,773 \text{ MPa}$$

$$\sigma_o = 53,8 \text{ MPa}$$

$$k = \frac{R_e}{\sigma_o} \quad [-] \quad (24)$$

$$k = \frac{235}{53,8} = 4,368$$

$$k = 4,4$$

Kde σ_o – maximální ohybové napětí působící na příčný blok

k – koeficient bezpečnosti mezního stavu pružnosti

R_e – mez kluzu materiálu příčného bloku

Posledním výpočtem bylo určení průhybu příčného bloku u v bodě S z rovnice (25) [24].

$$u = \frac{q \cdot l^3 \cdot d}{192 \cdot E \cdot J} \cdot \left[1 - \left(\frac{d}{l} \right)^2 + \left(\frac{d}{l} \right)^3 \right] \quad [mm] \quad (25)$$

$$u = \frac{0,7903 \cdot 10^{-3} \cdot 350^3 \cdot 180}{192 \cdot 210 \cdot 213,3} \cdot \left[1 - \left(\frac{180}{350} \right)^2 + \left(\frac{180}{350} \right)^3 \right] = 0,70918 \text{ mm}$$

$$u = 0,7 \text{ mm}$$

Kde u – maximální průhyb příčného bloku

Dle výsledků pevnostních výpočtů lze vyvodit závěr, že příčný blok je pro plánované zatížení dostatečně pevný. Velikost průhybu je nízká a koeficient bezpečnosti natolik velký, že zajišťuje dostatečnou bezpečnost i v případě plného vychýlení ramena robotického manipulátoru kolem vozidla při práci a tím přenesení větší zátěže na jeden individuální blok. Stejně tak umožňuje manipulátoru přesun užitečného zatížení.

Jelikož nebylo možné přesné zatížení robotického mechanismu pro účely této práce určit s jistotou a zároveň byla snaha o univerzálnost vozidla pro různá vybavení, je vyšší dosažený koeficient bezpečnosti příhodný.

ZÁVĚR

Výsledkem této práce je 3D model pásového dálkově řízeného robotického vozidla s robotickým mechanismem pro manipulaci s materiálem, který je schopen pojezdu a práce v náročném, těžko přístupném a příkrém terénu s kluzkým, sypkým či sněhovým podložím. Součástí je výkres sestavy pásového vozidla, výkres podsestavy pásového podvozku a dílenské výrobní výkresy.

Práce obsahuje vlastní konstrukční návrh základního nosného rámu, ložiskových domečků a rámečků z ohýbaných ocelových plechů a hnacích a vodících kol pásového podvozku. Dále byly vybrány komponenty trakčního pohonu, spojovací materiál, elektronické vybavení a robotický mechanismus. V rámci návrhu byla zohledněna cena jednotlivých komponentů počínaje pásem čínského výrobce. Nejdražší položkou je robotický mechanismus.

Zvolený robotický mechanismus je také hmotnostně nejtěžší komponentou vozidla, a proto byl pro příčné bloky rámu sloužící k jeho instalaci proveden pevnostní výpočet. Dle dosaženého koeficientu bezpečnosti bylo ověřeno, že vybraný materiál rámu, tloušťka i výška příčného bloku je pro potřeby vozidla dostatečná.

Vozidlo má dle automaticky vypočtených vlastností sestavy v programu Autodesk Inventor hmotnost do 80 kg, čímž vyhovuje předpokladům stanovených v Kapitole 3.2 pro výkonové výpočty. To zajišťuje, že volba trakčního pohonu je pro potřeby vozidla dostatečná. Zároveň je dle vlastností sestavy dle programu velikost výšky těžiště ($h_T = 244 \text{ mm}$) menší než příčná vzdálenost středu pásové jednotky od těžiště ($c_b = 254 \text{ mm}$), čímž je splněn požadavek pro podélnou i příčnou svahovou dostupnost 100 %.

Vozidlo má finální délku 907 mm, šířku 633 mm a výšku 269 mm bez instalovaného robotického mechanismu, čímž spadá do průměrných hodnot obdobných vozidel dle rešerše z Kapitoly 1.2. Stejně tak dosahuje obdobně průměrné maximální rychlosti a zrychlení, čímž se stává univerzálním vozidlem pro všeobecné využití. Na univerzálnost byl v koncepčním návrhu kladen veliký důraz, a proto je možné zvolený robotický mechanismus vyměnit v případě potřeby za jiné. Stejně tak úložné montážní plošiny rámu obsahují dostatek prostoru pro instalaci volitelného alternativního vybavení či větších baterií.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] JEŘÁBEK, Karel. Stroje pro zemní práce: Silniční stroje. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 1996. ISBN 80-7078-389-3.
- [2] BAUER, František. *Traktory a jejich využití*. 2. vyd. Praha: Profi Press, 2013. ISBN 978-80-86726-52-6.
- [3] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel*. 2. vyd. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-239-0024-2.
- [4] MASNICA, Daniel. *Koncepce autonomního pásového vozidla pro zemědělství*. Brno, 2020. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství.
- [5] RYZA, Vojtěch. *Autonomní vozidlo pro materiálový tok*. Brno, 2020. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství.
- [6] MILITARY POLICE pásové vozidlo. In: Rcobchod.cz [online]. 2023 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: https://www.rcobchod.cz/produkty/military-police-pasove-vozidlo-112-2-4-ghz-rtr-seda-P87538.html?utm_source=CJ&utm_medium=affiliate&utm_campaign=8280252&utm_content=15365736&cjevent=c57300d5e90c11ed80c432a20a18ba74&cjdata=MXxZfDB8WXww
- [7] RC tracked vehicle GAZ-71. In: Heng-long-panzer.de [online]. 2019 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://heng-long-panzer.de/en/RC-tracked-vehicle-GAZ-71-armoured-1-16-RTR-green.html>
- [8] RC Tank Tiger 1. In: Heng-long-panzer.de [online]. 2019 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://heng-long-panzer.de/en/rc-tank-tiger-1-heng-long-1-16-basis-shot-function.html>
- [9] BUNKER Pro. In: Agilex Robotics [online]. 2021 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://global.agilex.ai/products/bunker-pro>
- [10] Configurable - MLT-42-W Watertight Compact Tethered Inspection Robot with PTZ Camera. In: SuperDroid Robots [online]. 2023 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.superdroidrobots.com/store/Robots/professional-inspection-robots/product=2231>
- [11] Glimpse. In: The Machine Lab [online]. 2001 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.themachinelab.com/products/GLIMPSE.html>
- [12] Crawler. In: RoboTech Vision [online]. 2023 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://robotechvision.com/crawler/>
- [13] Electric Tracked unit with Remote Control. In: Emoveit [online]. 2023 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://emoveit.com.au/product/electric-tracked-unit-with-remote-control>



- [14] Alitrak-AU Carrier on Crawlers, 450kg Cap w Remote (DCT-450). In: Emoveit [online]. 2023 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://emoveit.com.au/product/alitrak-au-carrier-on-crawlers-1300watt-w-remote-dct-450>
- [15] Prebuilt HD2-S Mastiff. In: SuperDroid Robots [online]. 2023 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.superdroidrobots.com/store/Robots/prebuilt-robots/prebuilt-tactical-robots/product=3217>
- [16] MMP-30-EOD. In: The Machine Lab [online]. 2001 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://themachinelab.com/products/Tactical%20MMP%2030%20EOD.html>
- [17] Jaguar V4 with arm. In: Dr Robot [online]. 2001 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: http://jaguar.drrobot.com/specification_v4arm.asp
- [18] Robot Track 100x40x50. In: VercoTrack [online]. 2022 [cit. 2022-012-020]. Dostupné z: <https://vercotrack.com/robot-tracks/robot-track-100x40x50/>
- [19] NEO Brushless Motor V1.1. REV Robotics [online]. 2023 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: <https://www.revrobotics.com/rev-21-1650/>
- [20] SPARK MAX Motor Controller. REV Robotics [online]. 2023 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: <https://www.revrobotics.com/rev-11-2158/>
- [21] MAXPlanetary System Kit. REV Robotics [online]. 2023 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: <https://www.revrobotics.com/rev-21-2100/>
- [22] Jakosti ocelí. Feromat [online]. 2023 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: http://www.feromat.cz/jakosti_oceli
- [23] Přehled vlastností oceli S235JR. BBolzano ocel v pohybu [online]. 2023 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: <https://bbolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/nelegovane-konstrukcni-oceli-podle-en-10025/prehled-vlastnosti-oceli-s235jrdrive-s235jrg2>
- [24] Výpočet průhybu a ohybového momentu nosníku. Tzbinfo [online]. 2023 [cit. 2023-03-03]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/187-vypocet-pruhybu-a-ohyboveho-momentu-nosniku>
- [25] JANÍČEK, ONDRÁČEK, VRBKA a BURŠA. Mechanika těles: pružnost a pevnost I. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2592-X.
- [26] CIM Motor. Vex Robotics [online]. 2023 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: https://www.vexrobotics.com/217-2000.html#attr-vex_other_info
- [27] REV Ion Build System. REV Robotics: Documentation [online]. 2023 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: <https://docs.revrobotics.com/ion-build-system/>
- [28] Profily ocelové otevřené. Online Ferona [online]. 2023 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: <https://online.ferona.cz/vyhledavani/375>

- [29] Info Sheet for Track VTR-050,051,053, 067 & Wheels 2022.6. VercoTrack [online]. 2022 [cit. 2022-10-03]. Dostupné z: <https://vercotrack.com/>
- [30] REV Ion. Rev Robotics: Rev Documentation [online]. 2022 [cit. 2022-10-03]. Dostupné z: <https://docs.revrobotics.com/docs/rev-ion>
- [31] ES10-12S. MK Powered [online]. 2022 [cit. 2022-10-03]. Dostupné z: <https://mkbattery.com/application/files/9715/3308/8087/ES10-12S-1.pdf>
- [32] Epson C4L Long Reach 6-Axis Robots. Epson [online]. 2023 [cit. 2023-02-03]. Dostupné z: <https://epson.com/For-Work/Robots/6-Axis/Epson-C4L-Long-Reach-6-Axis-Robots/p/RC4-A901ST73-W>
- [33] V5 Controller. Vex Robotics [online]. 2023 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: <https://www.vexrobotics.com/276-4820.html>
- [34] PE1000 Polyetylen 1000. Tech Plasty [online]. 2023 [cit. 2023-01-03]. Dostupné z: <https://www.techplasty.cz/material/polyetylen/pe1000-polyetylen-1000>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

h_T	[mm]	Výška těžiště vozidla
B_p	[mm]	Šířka pásu
D_n	[mm]	Návrhový průměr hnacího kola
D_t	[mm]	Vypočtený průměr hnacího kola
F_h	[N]	Hnací síla
F_a	[N]	Síla setrvačného odporu při rozjezdu
F_s	[N]	Síla odporu stoupání
F_v	[N]	Síla valivého odporu
F_{vn}	[N]	Vnitřní pasivní odpory mechanismu pojezdového ústrojí
F_w	[N]	Síla odporu vzduchu
L_K	[mm]	Osová vzdálenost kol
L_p	[mm]	Délka pásu
M_{Max}	[Nm]	Maximální ohybový moment
M_k	[Nm]	Potřebný točivý moment pohonu
O_n	[mm]	Návrhový obvod hnacího kola
O_t	[mm]	Vypočtený obvod hnacího kola
P_h	[W]	Potřebný hnací výkon vozidla
P_a	[W]	Výkon potřebný pro zrychlení
P_e	[W]	Efektivní výkon pohonu
P_m	[W]	Výkon ztracený v převodovém ústrojí
P_s	[W]	Výkon potřebný na překonání stoupání
P_v	[W]	Výkon ztracený valením
P_δ	[W]	Výkon ztracený prokluzem
R_e	[MPa]	Mez kluzu materiálu příčného bloku
W_o	[m ³]	Modul v ohybu průřezu příčného bloku
a_{max}	[m·s ⁻²]	Maximální navrhované zrychlení vozidla
c_b	[mm]	Příčná vzdálenost středu kola/pásu od těžiště vozidla
n_{nt}	[-]	Návrhový počet drážek pro zuby hnacího kola
n_t	[-]	Vypočtený počet drážek pro zuby hnacího kola
t_{zp}	[mm]	Rozteč zubů
v_{max}	[m·s ⁻¹]	Maximální navrhovaná rychlost pojezdu vozidla
α_{lim}	[°]	Velikost limitního úhlu svahu

η_m	[-]	Součinitel účinnosti převodu
η_δ	[-]	Součinitel účinnosti prokluzu
σ_o	[MPa]	Maximální ohybové napětí působící na příčný blok
G	[N]	Tíhové zatížení robotického manipulátoru
h	[mm]	Výška průřezu příčného bloku
m	[kg]	Hmotnost
$m_{1/2}$	[kg]	Poloviční zatížení hmotnosti robotického manipulátoru
n	[-]	Počet zubů
X	[mm]	Délka vozidla
Y	[mm]	Šířka vozidla
Z	[mm]	Výška vozidla (bez robotického manipulátoru)
J	[mm ⁴]	Moment setrvačnosti průřezu příčného bloku
b	[mm]	Šířka průřezu příčného bloku
d	[mm]	Délka robotického manipulátoru
g	[m·s ⁻²]	Tíhové zrychlení
k	[-]	Koeficient bezpečnosti mezního stavu pružnosti
l	[mm]	Délka příčného bloku
q	[N·m ⁻¹]	Spojité zatížení robotického manipulátoru na část příčného bloku
u	[mm]	Maximální průhyb příčného bloku

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: 23-01-A1-00 Pásové vozidlo (výkres sestavení)

Příloha 2: 23-01-A2-100 Pásový podvozek (výkres sestavení)

Příloha 3: 23-01-A0-01 Rám (výrobní výkres)

Příloha 4: 23-01-A3-03 Hnací kolo (výrobní výkres)

Příloha 5: 23-01-A3-04 Vodící kolo (výrobní výkres)

Příloha 6: 23-01-A3-05 Ložiskový domeček (výrobní výkres)

Příloha 7: 23-01-A3-06 Ložiskový rámeček (výrobní výkres)

Příloha 8: 23-01-A3-15 Dno (výrobní výkres)

Příloha 9: 23-01-A4-16 Poklop (výrobní výkres)

Příloha 10: 23-01-A3-17 Příruba (výrobní výkres)