

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE

STROJNÍCKA FAKULTA

ÚSTAV APLIKOVANEJ MECHANIKY A MECHATRONIKY

**Návrh a realizácia mechanickej konštrukcie  
robotického vozidla**

Práca Študentskej vedeckej konferencie SjF v sekcii:  
Aplikovaná mechanika

**Autor práce:**

Ľubomír Maľuga (IŠ 2. ročník)

**Študijný odbor:**

Aplikovaná mechanika

**Študijný program:**

Aplikovaná mechanika a mechatronika

**Školiteľ práce:**

doc. Ing. Vladimír Chmelko, PhD.

Bratislava, 2. apríl 2019

# OBSAH:

1. ÚVOD	3
1.1. Popis projektu	3
1.2. Poďakovanie	4
1.3. Riešená časť projektu	5
2. HLAVNÁ ČASŤ	5
2.1. Návrh mechanických prvkov vozidla	5
2.1.1. Návrh podvozku	6
A. Rocker-bogie system	7
B. Diferenciálny prevodový mechanizmus	10
Prvotný návrh centrálného prevodu	11
Modifikovaný návrh centrálného prevodu	12
C. Dimenzovanie centrálnych hriadeľov podvozku	17
2.1.2. Návrh uloženia pohonu	20
Dimenzovanie prvkov v zostave osadenia kolies	24
2.1.3. Návrh skrine	27
2.1.4. Návrh mechanizmu pohybu šošovky	28
2.1.5. Návrh uloženia solárnych panelov	30
2.2. Testovanie jednotlivých mechanických systémov	31
2.2.1. Test mobility podvozku vozidla	31
2.2.2. Test procesu bodového spekania materiálu	32
3. ZÁVER	33
Bibliografické odkazy	34
Prílohy	35

# 1. ÚVOD

## 1.1. Popis projektu

Zámerom študentského projektu je experimentálne overenie a realizácie 3D tlače vo vesmíre. Využíva sa pritom ľahko dostupný materiál na povrchu planét s pevným povrchom a solárna energia zo Slnka.

Projekt realizuje návrh a konštrukciu mobilného zariadenia (vozidla) schopného autonómnej stavby pevných štruktúr z voľne dostupného materiálu na povrchu Mesiaca. Vznik štruktúr je realizovaný natavením materiálu solárnou energiou sústredenou Fresnelovou šošovkou. Tento spôsob umožňuje prakticky bezplatnú tvorbu stavebných dielcov prípadne jednoduchých konštrukcií aj na nedostupných miestach, čo by bol významný technologický prielom. Navrhované vozidlo musí byť schopné vykonávať zložité technické aj technologické procesy na výrobu štruktúr ako aj autonómne ovládanie a reagovanie systému na kritické situácie v prostredí mimo ľudského dosahu. Podobné systémy sa už nachádzajú vo vesmírnych podmienkach, ako napríklad vozidlá vyslané v rámci vesmírnych misií práve na Mesiac či Mars.

Tvorba štruktúr vyžaduje materiál a energiu, ktoré sa musia do vesmíru dopravovať raketami. Táto metóda by v budúcnosti stála vesmírne agentúry ohromné financie a úsilie. Dané riešenie využíva materiál voľne dostupný na povrchu vesmírneho telesa. Tento fakt pomôže značne ušetriť náklady na tvorbu základov pre obytné, priemyselné či iné konštrukcie, pri ktorých sa výrazne eliminuje dovoz stavebného materiálu.

Riešenie tak komplexného problému teda vyžaduje využívanie technológií z oblasti automatizácie, mechaniky, mechatroniky, elektrotechniky, optiky a ďalších odvetví techniky. Myslím, že je tiež potrebné spomenúť, že študentský projekt má predovšetkým edukačný charakter a nemožno ho považovať za 100% zrealizovateľný. Hlavnou úlohou je však poukázať na možné alternatívy a možnosti vo vesmírnom inžinierstve ako aj inšpirovať vesmírne spoločnosti k skutočnému realizovaniu podobnej myšlienky. Pri návrhu ako aj samotnej výrobe sa teda museli brať do úvahy ako ekonomické, tak aj vedomostné možnosti či limity študentov. Počas realizácie projektu sme sa však naučili veľa praktických a cenných vedomostí a zručností.

## 1.2. Pod'akovanie

V úvode by som sa chcel poďakovať pedagogickému kolektívu na Fakulte elektrotechniky a informatiky STU v Bratislave, a to predovšetkým Ing. Martinovi Bugárovi, PhD a Ing. Tiborovi Sedlárovi za ich snahu, čas a vedomosti, ktoré som využil pri návrhu a samotnej konštrukcii mechanických častí mobilného vozidla. Taktiež poďakovanie patrí prof. Ing. Petrovi Hubinskému, PhD a doc. RNDr. Pavlovi Valkovi, CSc za pomoc, vloženú dôveru a možnosť pracovať na danom projekte. V neposlednom rade by som spomenul aj pána Petra Mikulu, ktorý bol ochotný pomôcť v dielni pri montáži a výrobe niektorých dielov. Administratívne veci nám pomáhala riešiť pani Mgr. Alena Foltinová za čo jej tiež patrí moje poďakovanie. Bez potrebnej podpory zo strany pedagógov a ľudí na fakulte by projekt nemohol byť zrealizovaný. Na záver ďakujem aj mojim kolegom (Matej Pavelka, Ladislav Kašša, Oliver Hollý, Bence Nagy) za spoluprácu, rady, nápady a pomoc pri mojej účasti na projekte.

### 1.3. Riešená časť projektu

Hlavnou motiváciou pre moju účasť na projekte bola možnosť aplikovať vedomosti nadobudnuté počas štúdia do reálneho produktu. Zaujala ma aj atraktivnosť témy projektu akou je vesmír. Ako študent Strojníckej fakulty STU v Bratislave, odbor aplikovaná mechanika a mechatronika, som sa rozhodol práve pre návrh a neskôr aj samotnú realizáciu konštrukcie mechanickej časti mobilného vozidla. Publikácia teda zjednodušene opisuje celý priebeh môjho pôsobenia na projekte od počiatočných návrhov až po samotné realizovanie.

## 2. HLAVNÁ ČASŤ

### 2.1. Návrh mechanických prvkov vozidla

Na začiatku projektu som nemal prakticky žiadne vedomosti ani skúsenosti ohľadne problematiky konštrukcie vesmírnych vozidiel, tzv. roverov. Prvé týždne som strávil hľadaním vhodných informačných zdrojov z tejto oblasti a následným naberaním aspoň čiastočných vedomostí.

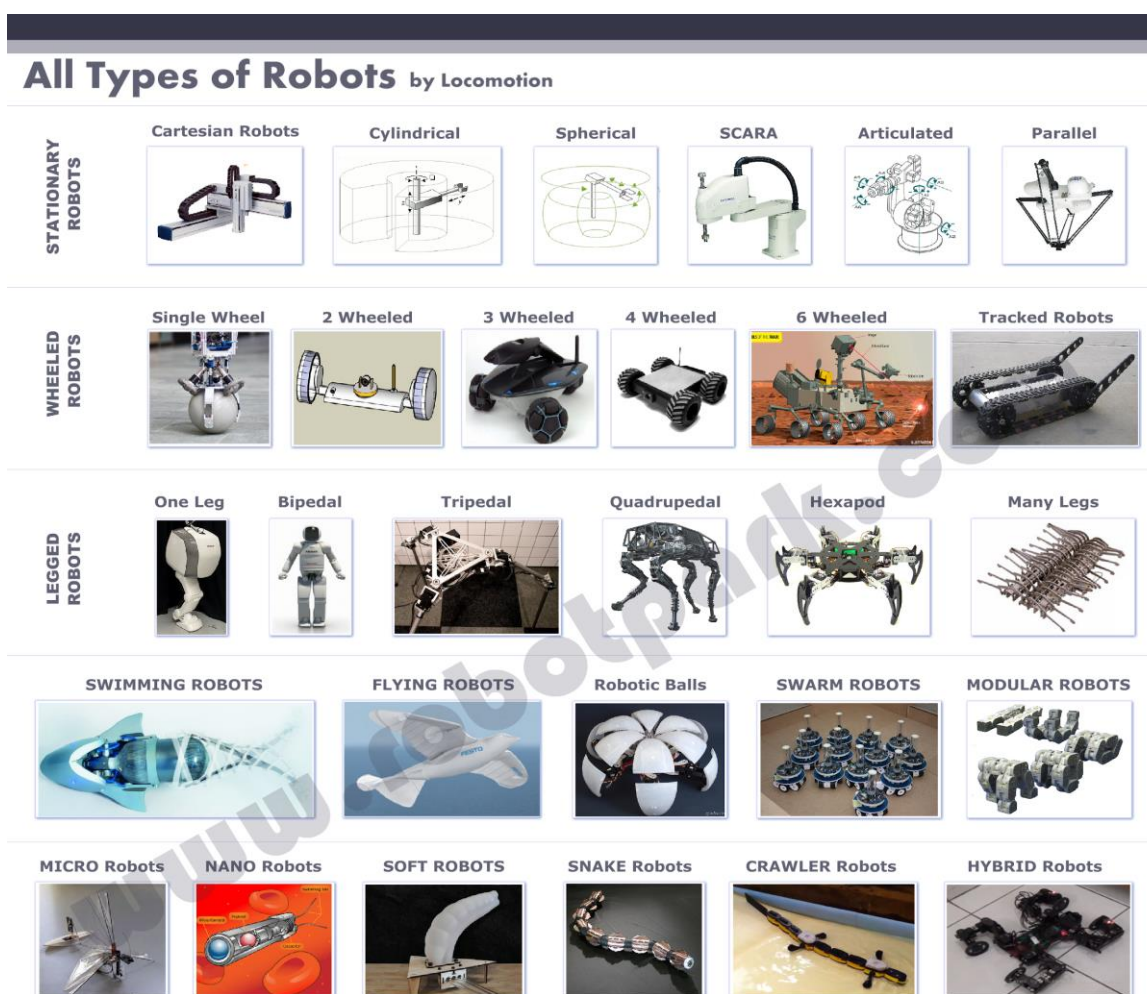
Bolo potrebné si hneď v prvotných krokoch určiť, do akej hĺbky budem zohľadňovať všetky faktory, ktoré sa pri reálnom konštruovaní zariadení tohto typu uvažujú. Po prvotnom prieskume som sa rozhodol zaoberať čisto principiálnym fungovaním mechaniky vozidla. Neuvažoval som materiálové vlastnosti niektorých použitých častí resp. som používal dostupné materiály nevhodné na aplikáciu vo vesmírnom priemysle, vplyv okolitého prostredia a mnoho ďalších dôležitých faktorov, s ktorými som sa nestihol oboznámiť. Iba na základe tohto zjednodušenia bolo možné prejsť už ku konkrétnemu návrhu (mechanizmus podvozku, uloženie hnacích prvkov, konštrukcia skrine, uloženie mechanizmu Fresnelovej šošovky a pod.). Napriek týmto zjednodušeniam som sa snažil vyhýbať použitiu hydraulických a pneumatických prvkov (kritické pre aplikáciu vo vesmíre), nepoužívať komerčne vyrábané gumené pneumatiky a pod.

Pri tvorbe výrobných výkresov ako aj voľbe konštrukčných prvkov (uloženia ložísk, tolerancie rozmerov) som používal, na konci práce uvedenú, literatúru. [2], [5] Vytvorené výrobné výkresy sú uvedené ako prílohy na konci práce.

## 2.1.1. Návrh podvozku

V súčasnosti existuje množstvo variácií a možností vo výbere typu podvozku robotizovaného mobilného zariadenia (Obr.1). [7] Za hlavné parametre pri výbere sa považujú: samotný účel robota, požiadavky na pohyb a stabilitu, prostredie, do ktorého je robot určený, geometrické a hmotnostné vlastnosti a mnoho iných. Pri zohľadnení týchto atribútov by mal výsledný návrh poskytovať čo najvýhodnejšie a najoptimálnejšie schopnosti pre dané zariadenie.

Pri mojom výbere som bol ovplyvnený rozmermi solárnych panelov, ktoré nám boli poskytnuté fakultou a taktiež minimálnou veľkosťou Fresnelovej šošovky schopnej aspoň čiastočne realizovať tavenie materiálu. Tieto rozmerové obmedzenia určili približnú celkovú veľkosť vozidla. V ďalšom kroku som zvolil 6 kolesový typ podvozku typu "Rocker-Bogie".

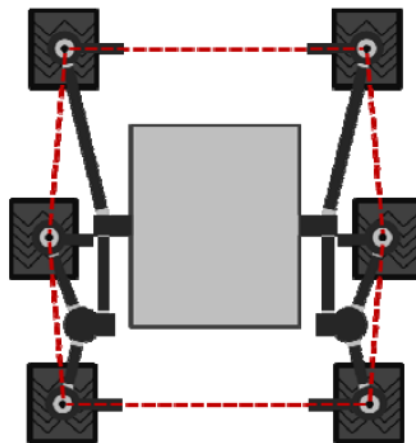


OBR. 1 TYPY MOBILNÝCH ROBOTOV PODĽA DRUHU POHYBU

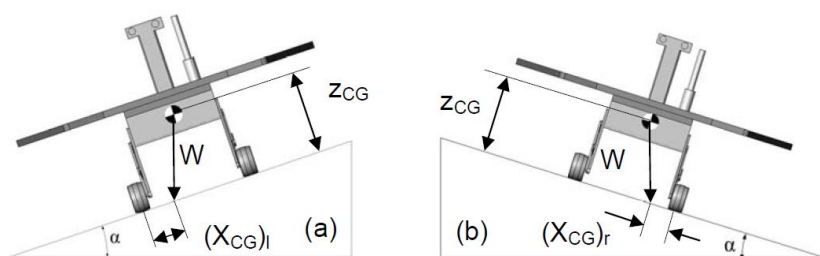
## A. Rocker-bogie system

Pre túto možnosť som sa rozhodol z niekoľkých dôvodov. Kolesový typ podvozku patrí medzi najpoužívanejšie pri potrebe dosiahnuť vysokú mobilitu a rýchlosť pohybu, ale zároveň malý odpor prostredia. Dôležitým faktorom je stabilita vozidla, či už statická, tak aj dynamická (pri pohybe terénom). Je potrebné aby vozidlo bolo spoľahlivé, stabilné a funkčné pri bežných podmienkach.

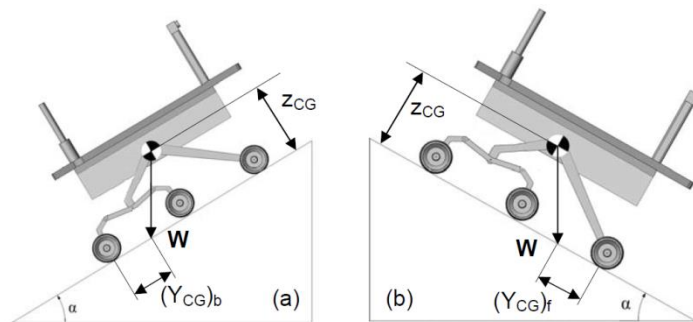
Stabilita vozidla závisí od tzv. podporného polygónu (support polygon), čo je zjednodušene povedané oblasť medzi spojnicami všetkých stredov kolies vozidla. [3] Pokiaľ tiažová sila ( $G$ ) sústredená v ťažisku celého vozidla smeruje do tejto oblasti, vozidlo je stabilné. Pri náklone a následnom vychýlení sily mimo oblasť, nastáva strata stability. Z toho je zrejmé, že vozidlo s väčším počtom kolies bude mať väčšiu kontaktnú plochu s povrchom a teda aj väčšiu stabilitu. [8] Na základe týchto skutočností som zvolil práve 6-kolesový druh podvozku. Väčší počet kolies je taktiež výhodný pre optimálnejšie rozloženie váhy celého vozidla. Z tohto dôvodu je taktiež ťažisko celého vozidla posunuté nižšie.



OBR. 2 SUPPORT POLYGON PRE 6-KOLESOVÝ ROBOT

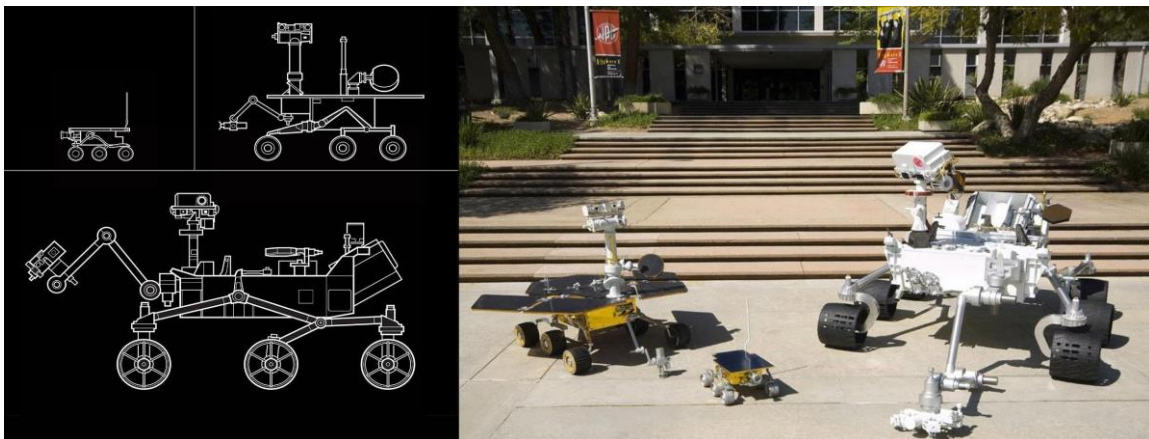


OBR. 3 NÁKLON VOZIDLA (VPRAVO-VLEAVO)



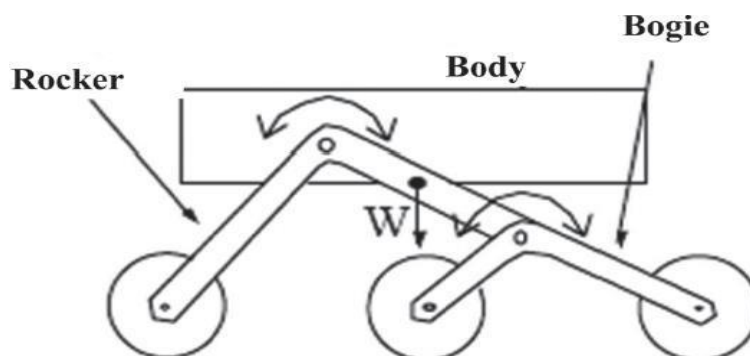
OBR. 4 NÁKLON VOZIDLA (VPRED-VZAD)

Ďalší dôležitý parameter je mobilita vozidla. Zvolený podvozok musí umožňovať čo najlepšiu schopnosť prekonávať prekážky v podobe kráterov, skál, kopcov prípadne trhlín. Vybraný Rocker-Bogie system, vymyslený a patentovaný pánom Donom Bicklerom (JPL), bol použitý už na niekoľkých misiách NASA pri skúmaní planéty Mars, kde sa osvedčila práve jeho húževnatosť a schopnosť prispôbiť sa prostrediu (Pathfinder, Opportunity/Spirit, Curiosity). [6]



OBR. 5: JPL MARS ROVERS

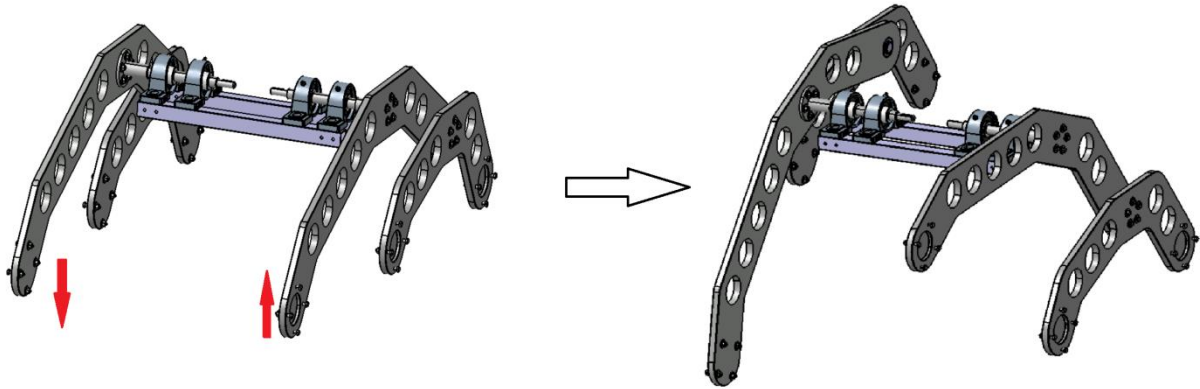
Systém využíva 6 kolies zavesených na dvoch väčších (Rockers) a dvoch menších (Bogies) ramenách.



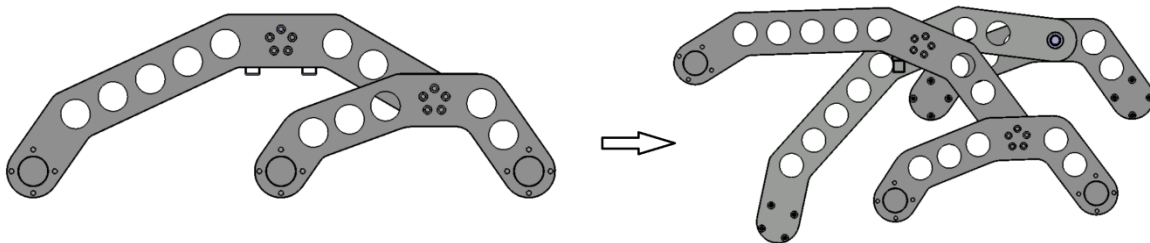
OBR. 6: ROCKER-BOGIE MECHANIZMUS



Väčšie ramená sú mechanicky prepojené, čo zabezpečuje ich závislý pohyb v opačných smeroch. Pri pohybe jedného predného ramena nahor sa uvedie do pohybu predné rameno na druhej strane (Obr.7). Pri pohybe ramena nahor z dôvodu napr. prechodu cez vyvýšený terén, toto previazanie zabezpečuje zvýšenie prítlaku na kolese opačného ramena a tým zlepšenie trakčných vlastností aj na planétach s menšou gravitáciou. Stredná platforma pre uloženie skrine si zachováva vždy stredovú polohu medzi vychýlenými ramenami. Systém je vďaka týmto pohybom tiež schopný prekonávať vyššie a väčšie prekážky. [4]



OBR. 7: PRINCÍP MECHANIZMU ROCKER-BOGIE



OBR. 8: PRINCÍP MECHANIZMU ROCKER-BOGIE

Spojenie menších ramien s väčšími je zabezpečené čapom a radiálnym ložiskom aby bol systém Rocker-Bogie využitý naplno. Pri návrhu som zámerné nepoužíval žiadne tlmiace a pružiacie prvky. Použitie hydraulických/pneumatických tlmiacich prvkov je v kozmickom priemysle rizikový a zložitý problém, ktorý by som aj tak nevedel odborne navrhnuť. Na druhej strane pružné vlastnosti by mali nežiadúci vplyv na vznikanie pomocného prítlaku na kolesách predných kolies (pohlcovanie kumulovanej energie pri pohybe ramien). Nakoľko vozidlo je pre potrebu bezpečnosti dimenzované na pomalé rýchlosti, nie je potrebné výrazne eliminovať nežiadúce dynamické vplyvy prostredia.

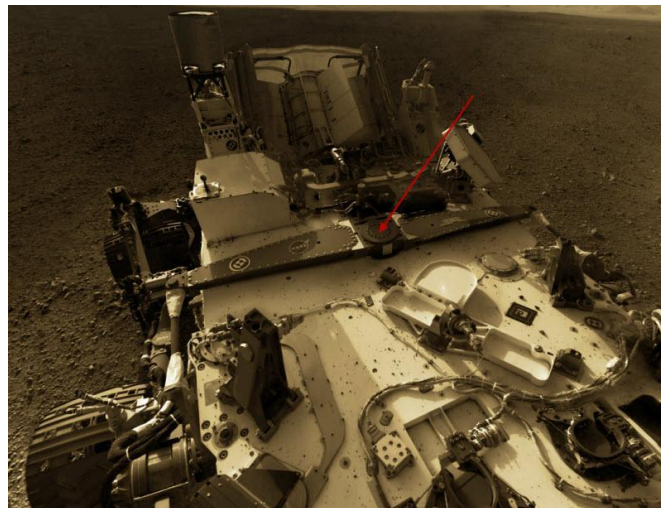
## B. Diferenciálny prevodový mechanizmus

V minulosti boli použité viaceré prevedenia tohto systému. Dvojica robotov NASA *Opportunity* a *Spirit* využíva tzv. differential gearbox. Závislý pohyb ramien je realizovaný cez sústavu ozubených kolies. Princiálne fungovanie je znázornené na Obr.9. [6]



OBR. 9: DIFFERENTIAL GEARBOX

Pri konštruovaní NASA's Mars Science Laboratory - *Curiosity* rover sa využil systém cez tzv. differential bar. V tomto prípade sú ramená spojené pomocou "diferenciálnej tyče". [6]



OBR. 10: DIFFERENTIAL BAR

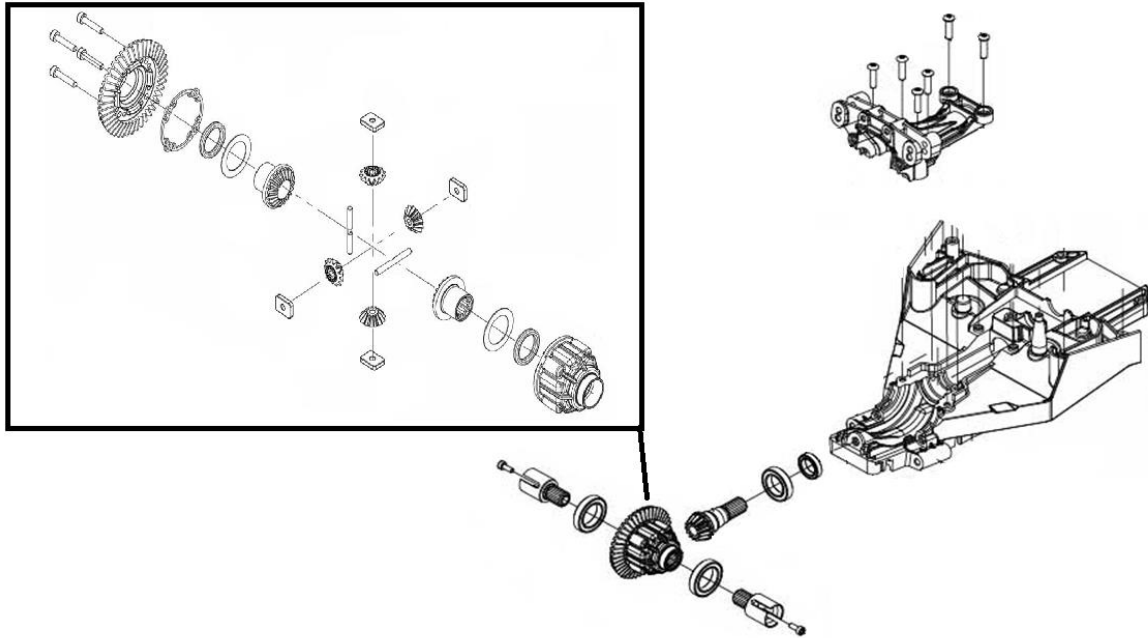
Odlíšné riešenia boli z časti zapríčinené rozdielnym typom zdroja energie:

*Opportunity/Spirit* - zdrojom sú solárne panely, ktorým by tyč zavádzala pri ich činnosti

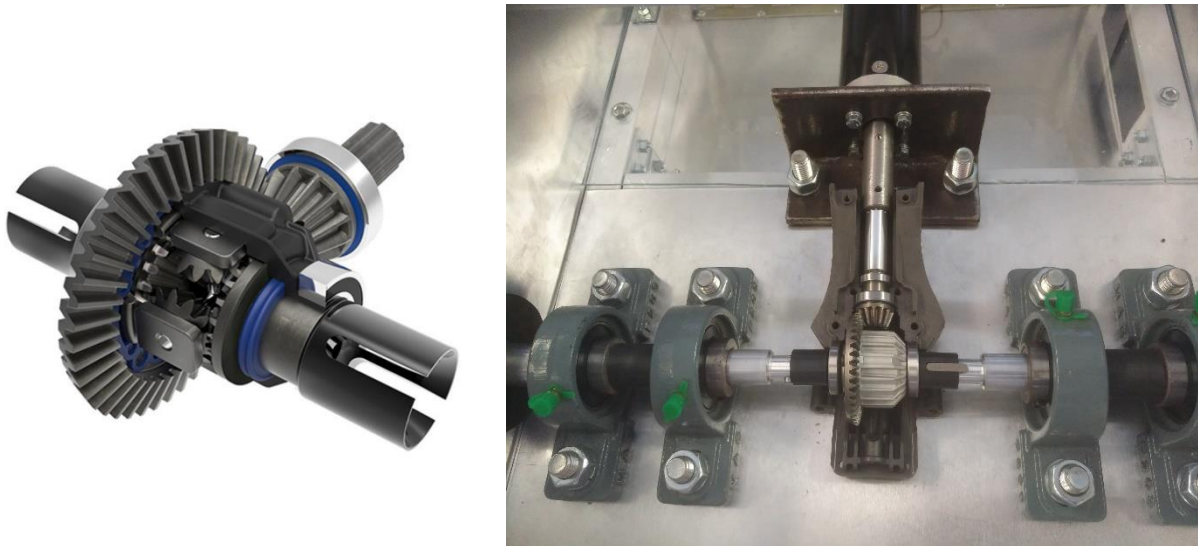
*Curiosity* - jadrový pohon a množstvo objemných prístrojov v skrini, ktoré zabraňovali uloženiu ozubených kolies (gearbox)

## Prvotný návrh centrálného prevodu

V našom projekte sa prvotne zvolil systém z bežného automobilového diferenciálu RC modelu. Vnútorňa časť (klietka) zabezpečovala protichodný pohyb ramien a vonkajší pastorok pri otáčaní okolo tanierového kolesa vykonával rotáciu skrine okolo osi hriadeľa.



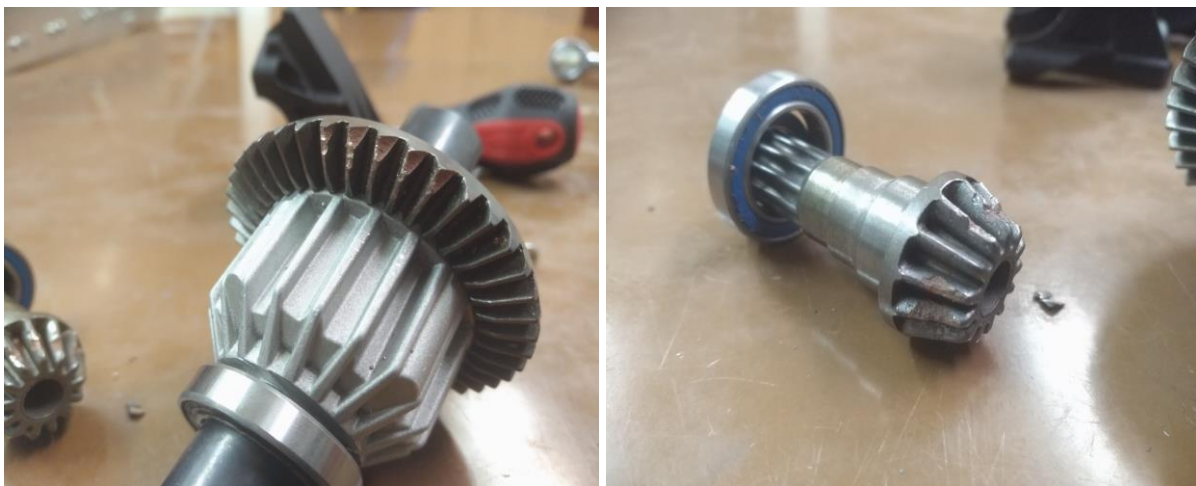
OBR. 11: SCHÉMA DIFERENCIÁLNEHO MECHANIZMU



OBR. 12: DIFERENCIÁLNY MECHANIZMUS VOZIDLA

Takýto systém mal však niekoľko nedokonalostí. Jedna z nich bola veľká celková vôľa v pohybe. Tá mala pôvod v samotnej geometrii, kedy ozubenia vnútornej klietky, ale aj vonkajšie ozubenie nezapadali do seba s dostatočnou presnosťou. Preto by aj samotná tlač nebola dostatočne presná a zle ovládateľná.

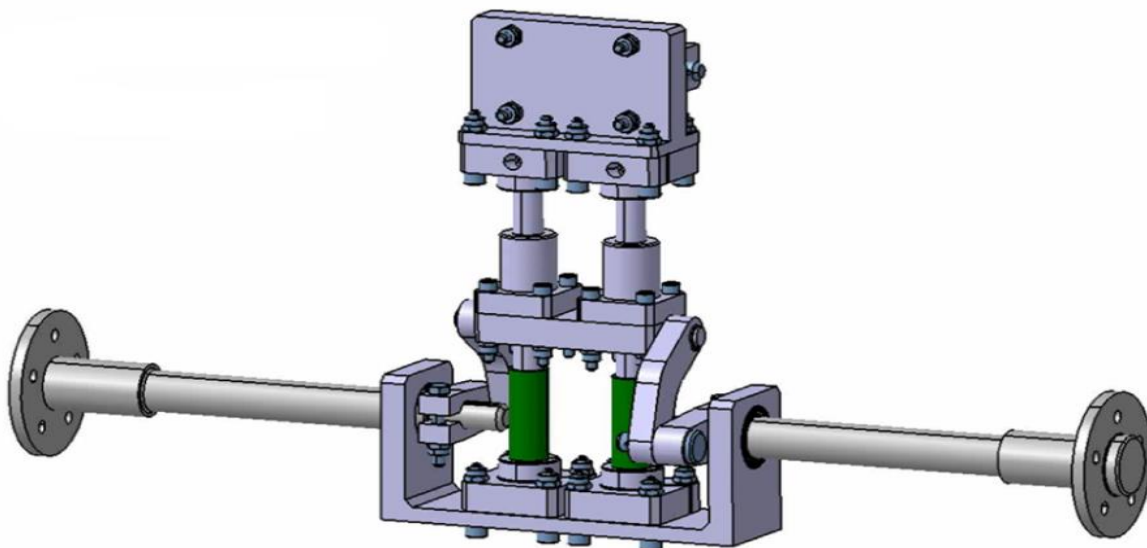
Pri následných skúškach systému v prevádzke navyše vznikli opotrebenia a lokálne deštrukcie materiálu na vonkajšom ozubení pastorku a tanierového kolesa, čím sa stal mechanizmus nespoľahlivým a nefunkčným. Pravdepodobnou príčinou bolo nadmerné zaťaženie v ozubenom prevode, ktorý mal vôľu a teda jednotlivé zuby nezaberali cez celú plochu resp. bol použitý materiál s nedostatočnou pevnosťou.



OBR. 13: POŠKODENÉ ČASTI OZUBENIA MECHANIZMU

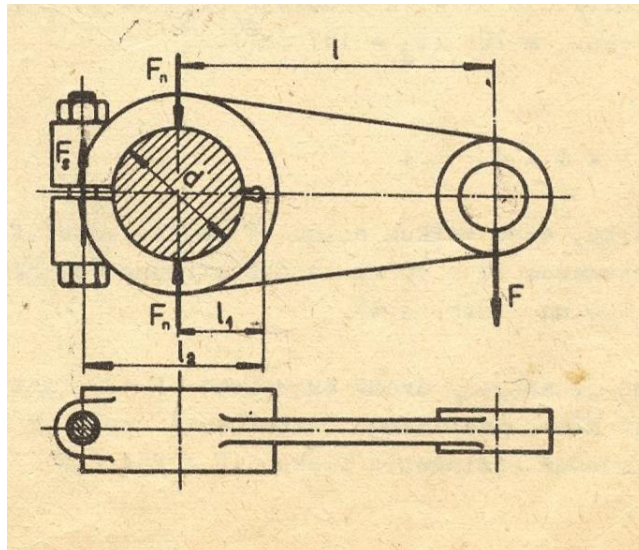
### **Modifikovaný návrh centrálného prevodu**

Z týchto dôvodov sa celý mechanizmus musel zmeniť a modifikovať. Riešením je sústava ramien, ktorá neobsahuje žiadne ozubené kolesá, ktoré sa museli z dôvodu mŕtvej vôle vylúčiť (Obr.25). Pri tomto riešení je zachovaný celý podvozok vrátane hriadeľov rotačne spájajúcich ramená „Rocker“ s telom vozidla. Centrálna hriadeľa sú cez zverný spoj spojené s kľukami. Aby sa zabezpečil protichodný pohyb sú voči sebe otočené o 180°. Spojenie kľúk s lineárnym vedením je zabezpečené cez geometricky upravené spojky prichytené na bežec translačného mechanizmu. Keďže optimalizovaný prevod musel geometricky zapadnúť do už vytvorenej sústavy hriadeľov a skrine, bolo veľmi náročné navrhnúť výslednú, kinematicky funkčnú geometriu všetkých súčiastok. Otočné spojenia súčiastok sú navrhnuté s vysokou radiálnou aj axiálnou presnosťou z dôvodu eliminácie vôle.



OBR. 14: MODEL MODIFIKOVANÉHO CENTRÁLNEHO PREVODU

Kritickou súčiastkou mechanizmu je kľuka, ktorá je spojená s hriadeľom zverným spojom. Je dôležité aby sa spoj neuvoľnil počas prevádzky. Jeho návrh sa realizoval pomocou literatúry [1]. Následne bol vytvorený Matlab skript na výpočet potrebnej sily v skrutke zverného spoja.



OBR. 15: ZVERNÝ SPOJ S ROZREZANÝM NÁBOJOM

Z podmienky rovnováhy vyplýva potrebná zverná sila:

$$F_n = \frac{k * M_k}{d * f_{\check{c}}}$$

Kde:  $k$  je súčiniteľ bezpečnosti  $d$  je priemer hriadeľa

$M_k$  je krútiaci moment ( $M_k = F * l$ ), veľkosť sily  $F$  bola zvolená umelo, nakoľko je zložité predpokladať jej reálnu hodnotu,  $F=1200N$  čo predstavuje 1,25 krát váhu celého vozidla čo je dostačujúca veľkosť

$f_{\xi}$  je súčiniteľ trenia ( $f_{\xi} = \frac{\pi}{2} * f$ )

Sila v skrutke sa dá vyjadriť pomocou vzťahu:

$$F_s = F_n \frac{l_1}{l_2}$$

Veľkosť skrutky sa dá vypočítať nasledovne:

$$S_1 = \frac{F_s}{\sigma_D} = \frac{k_1 * F_s}{R_e}$$

Kde  $S_1$  je plocha prierezu skrutky,  $k_1$  je súčiniteľ bezpečnosti a  $R_e$  je medza klzu materiálu. Na základe uvedených vzťahov bol vytvorený Matlab skript na výpočet potrebnej osovej sily v skrutke zverného spoja a bol navrhnutý potrebný priemer skrutky. Je potrebné spomenúť, že materiál hriadeľa aj náboja je hliník EN AW 7075 s medzou klzu  $R_e = 440 MPa$ . Výsledok finálnej konfigurácie je uvedený nižšie.

$$F_n = 2847 N$$

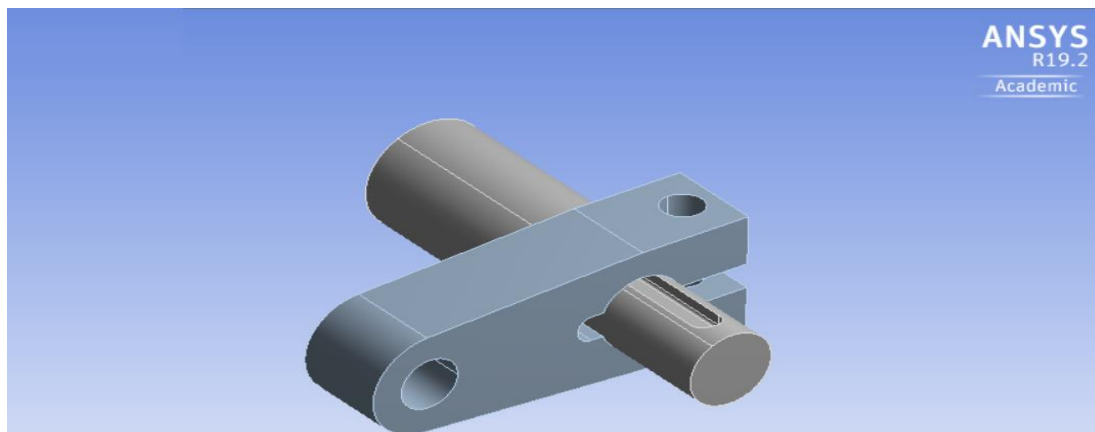
$$F_s = 1900 N$$

$$S_1 = 8.627 mm^2$$

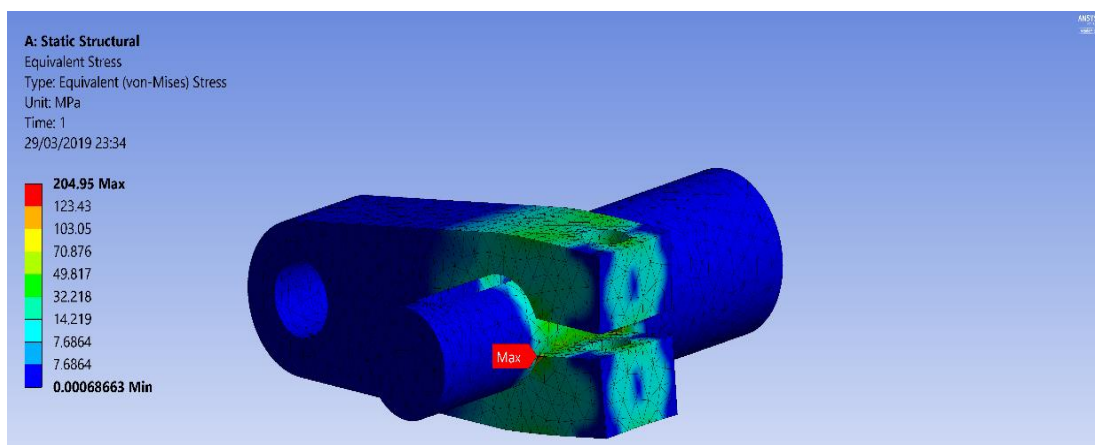
Plocha skrutky sa jednoducho dá previesť na menovitý priemer skrutky. Pre daný prípad skrutka M4 je postačujúca, ale z konštrukčných dôvodov bola zvolená skrutka M5.

Nakoniec zostava zverného spoja kľuky a hriadeľa bola podrobená MKP analýzám, aby sa potvrdila funkčnosť spoja. Ako vstup pre MKP analýzu sa použila potrebná sila v skrutke z predošlých výpočtov.

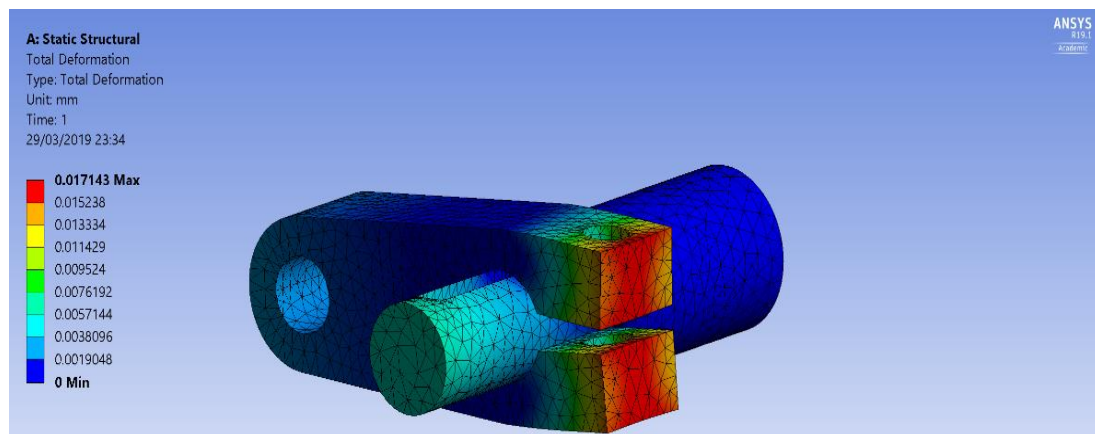
Z hľadiska montáže je veľmi dôležitý parameter krútiaci moment, potrebný na predpätie skrutkového spoja. Pomocou vhodných vzťahov sa dá vypočítať veľkosť krútiaceho momentu, ktorý sa dá presne nastaviť momentovým kľúčom.



OBR. 16: MODEL ZOSTAVY HRIADEL-KĽUKA



OBR. 17: STATICKÁ ANALÝZA MODELU ZOSTAVY HRIADEL-KĽUKA



OBR. 18: VYKRESLENIE DEFORMÁCIÍ KĽUKY PRI STATICKOM ZAŽAŽENÍ

V simulácii je uvedené aj miesto maximálneho napätia. Z výsledkov vyplýva, že maximálna hodnota napätia neprekročila medzu klzu materiálu. Hodnota maximálneho ekvivalentného napätia je:  $\sigma_{ekv.max} = 204,95$  MPa. Medzná klzná hodnota napätia pre daný materiál EN AW 7075 je  $\sigma_{Re} = 440$  MPa. Zo statického hľadiska teda zverný spoj vyhovuje, nakoľko nedôjde k jeho plastizácii.

Na druhom konci je na lineárne tyče mechanizmu napojený lineárny aktuátor. Ten je cez čap spojený s telom vozidla a svojím pohybom k tyčiam a od nich spôsobuje náklon kostry skrine okolo priečnej osi. Platforma, na ktorej sú pripevnené vodiace tyče so samotným telom rovera nie je priamo spojená a môže rotovať okolo priečnej osi nezávisle.



OBR. 19: LINEÁRNY AKTUÁTOR



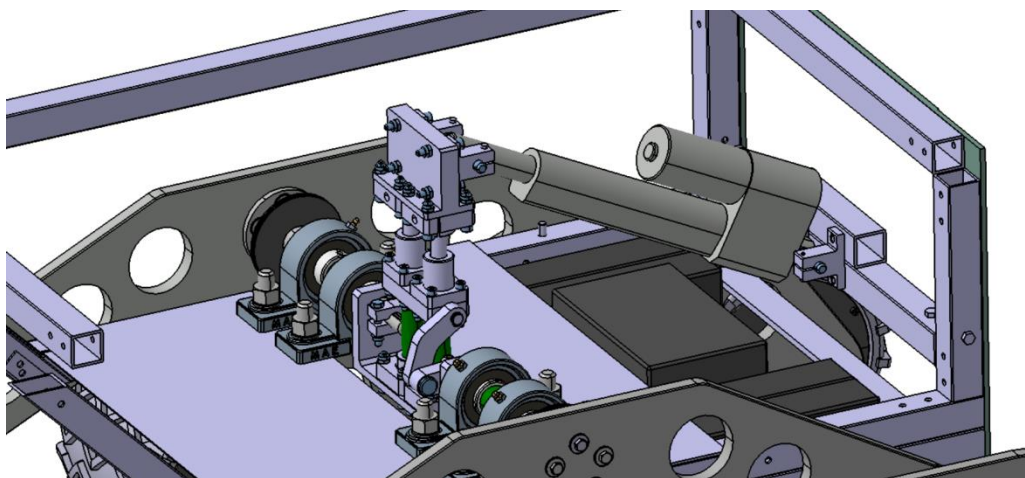
OBR. 20: ULOŽENIE AKTUÁTORA V SKRINI VOZIDLA

Výhoda tohto riešenia je používanie spojení typu „revolute“, v ktorých sa dá ovplyvniť veľkosť vôle presnosťou výroby a montáže. Protichodný pohyb a aj pohyb okolo priečnej osi je realizovaný namiesto ozubených kolies len translačnými pohybmi komponentov sústavy. Veľký odpor aktuátora slúži na zaistenie samovoľného pohybu skrine. Aktuátor slúži aj na presné sledovanie a kontrolované riadenie náklonu skrine.

Sústava je teda schopná vykonávať dva nezávislé pohyby:

- lineárny pohyb centrálného prevodu zabezpečuje opačný chod predných ramien
- pohyb aktuátora realizuje nezávislé natáčanie kostry skrine vozidla

Podvozok je po tejto modifikácii viac mobilnejší a presnejší aj pri procese tlačenia, kde je umožnené lepšie regulovať vzdialenosť ohniska šošovky od povrchu.



OBR. 21: MODEL ZOSTAVY MODIFIKOVANÉHO PREVODU S AKTUÁTOROM



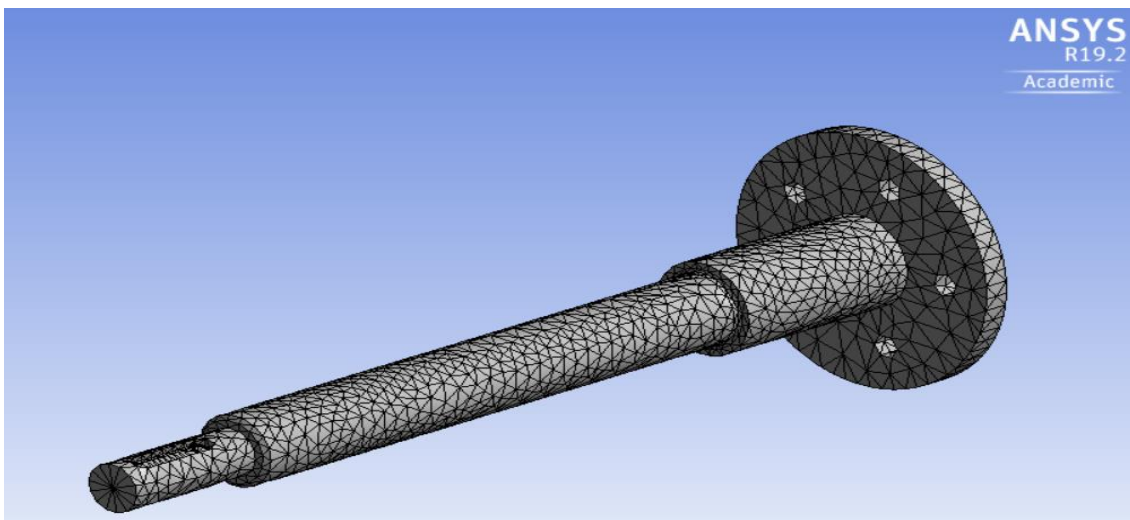
### C. Dimenzovanie centrálnych hriadeľov podvozku

Pre zrealizovanie výroby bolo potrebné spraviť základné pevnostné výpočty nosných prvkov podvozku. Geometria koncov hriadeľa bola z časti daná rozmerom polosí RC diferenciálu z prvotného návrhu centrálného prevodu. Na začiatku bolo nutné vhodne zvoliť polohy ložísk, v ktorých pôsobia reakčné sily, prípustnú hmotnosť skrine vozidla ako aj materiál. Predpokladal som dominantný vplyv ohybových zaťažení na hriadeľ v smere pôsobenia tiažovej sily.



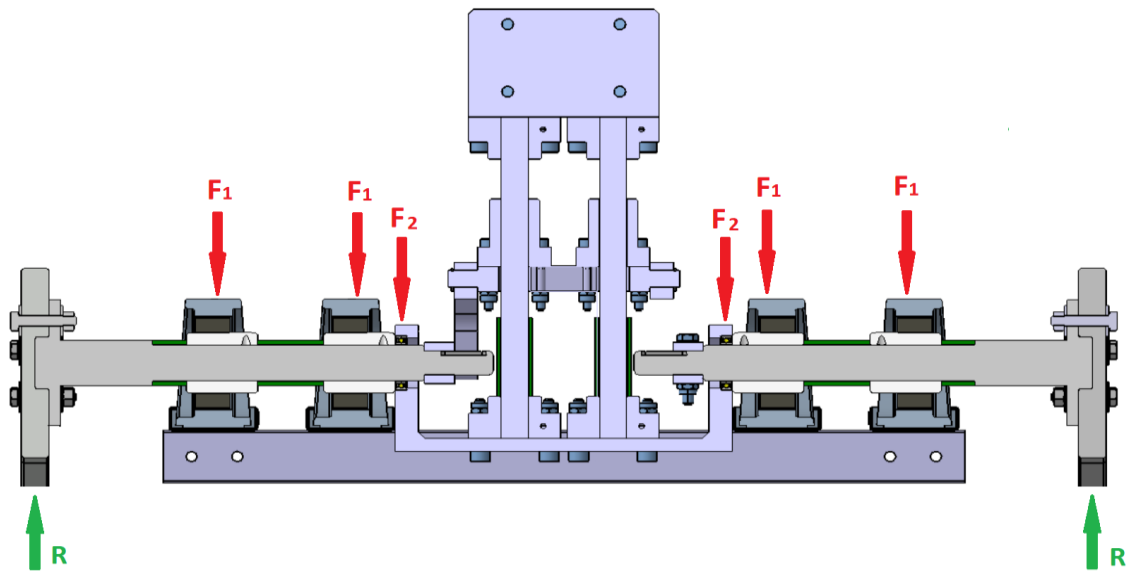
OBR. 22: SÚSTAVA CENTRÁLNYCH HRIADEĽOV PODVOZKU

V numerickom výpočte hodnôt napätia som využil MKP metódu. Statická analýza hriadeľa sa simulovala pomocou výpočtového softvéru Ansys. Na vytvorený 3D model som aplikoval sieť konečných prvkov („mesh“), skladajúcu sa z tetrahedronových objemových elementov primeranej veľkosti.

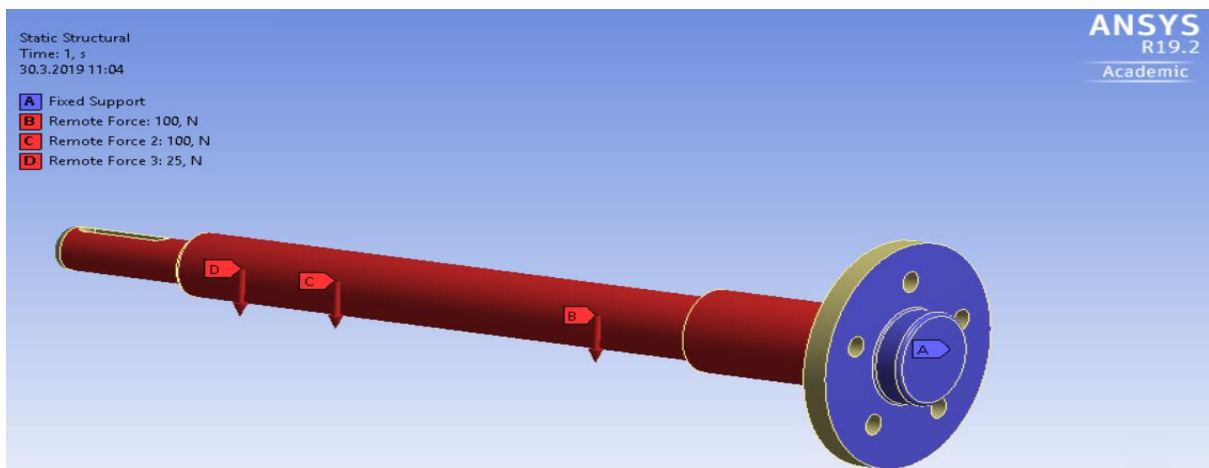


OBR. 23: SIEŤ KONEČNÝCH PRVKOV MODELU HRIADEĽA

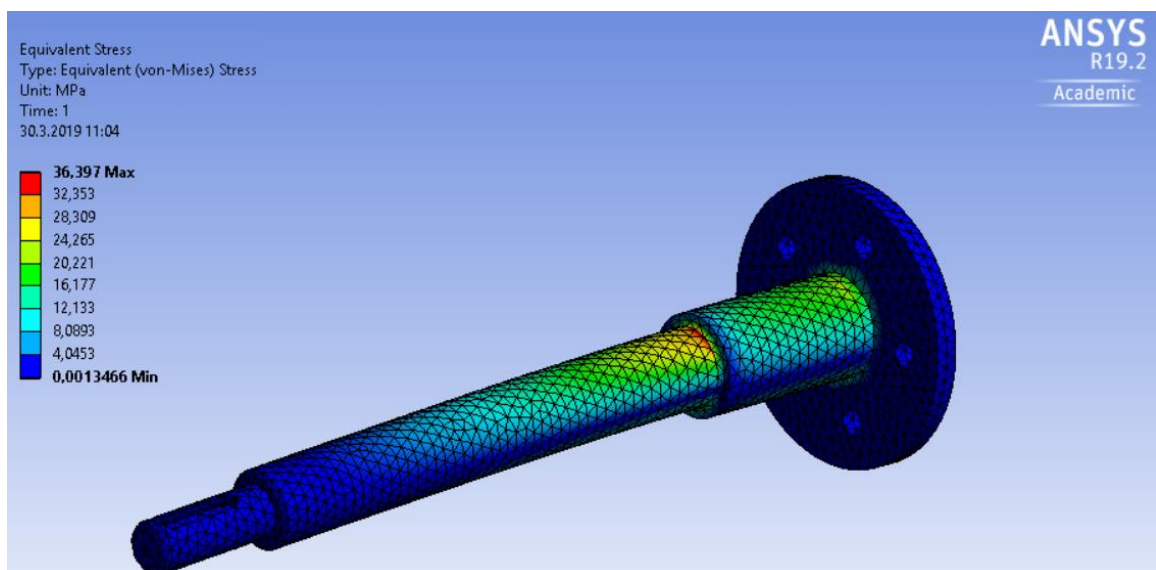
V ďalšom kroku boli vytvorené vhodné okrajové podmienky. Plochu hriadeľa, ktorá vstupuje do ramena som ukotvil a tým simuloval uloženie v ramene. Následné zaťaženia boli umiestnené do miest pôsobenia ložísk a platformy (Obr.33).



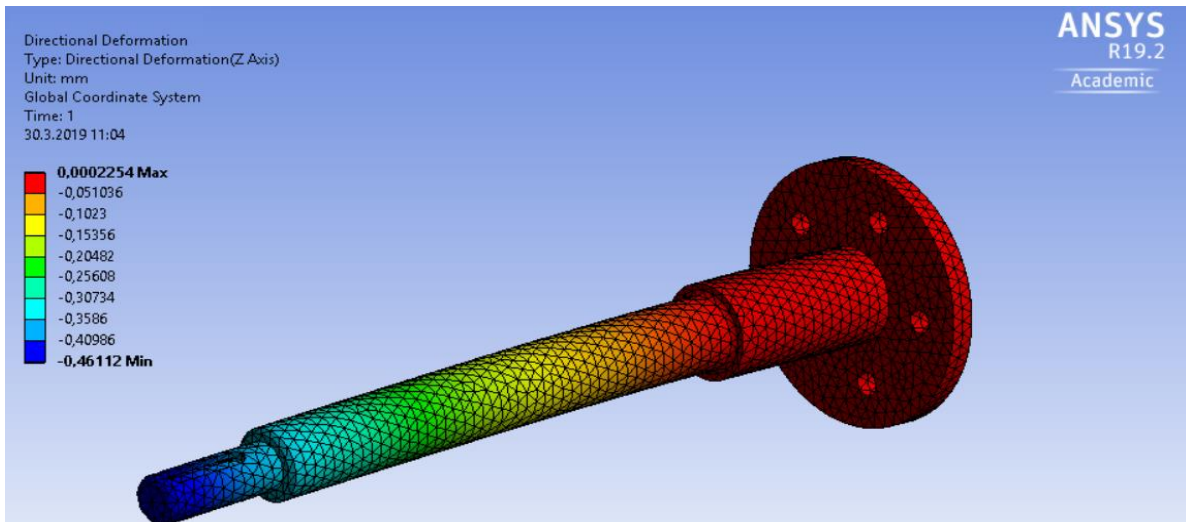
OBR. 24: ZOSTAVA ULOŽENÍ HRIADELOV S PÔSOBNÍM ZAŤAŽENÍ



OBR. 25: OKRAJOVÉ PODMIENKY SIMULÁCIE MODELU



OBR. 26: STATICKÁ ANALÝZA MODELU HRIADEĽA



OBR. 27: VYKRESLENIE DEFORMÁCIÍ HRIADEĽA PRI STATICKOM ZAŤAŽENÍ

Výsledky ukázali najväčšie hodnoty napätia v mieste pôsobenia zaťaženia na zmenšený priemer hriadeľa, čo je fyzikálne správne. Taktiež je zrejmé, že vzniknuté napätie (Von Misses) v kritických miestach hriadeľa je pod medzou klzu materiálu. Hodnota maximálneho ekvivalentného napätia je:  $\sigma_{ekv.max} = 36,397 \text{ MPa}$ . Medzná klzná hodnota napätia pre daný materiál EN AW 7075 je  $\sigma_{Re} = 440 \text{ MPa}$ . Zo statického hľadiska teda považujem navrhnutý priemer hriadeľa ako vyhovujúci. Po vykreslení deformácií v smere pôsobenia síl sú známe aj posunutia v jednotlivých miestach pozdĺž hriadeľa.

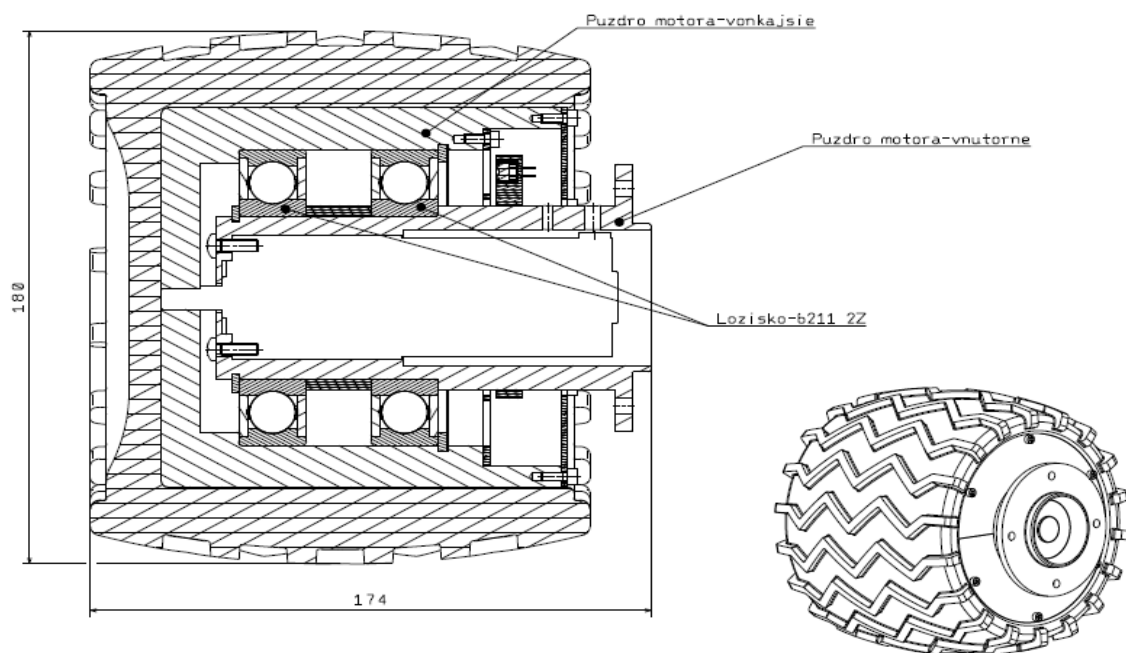
## 2.1.2. Návrh uloženia pohonu

Pohon vozidla je zabezpečovaný cez hnacie DC motory typu PG421 s planétovou prevodovkou, zapuzdrené jednotlivo v každom kolese. Pomerne veľký prevodový pomer 144:1 bol zvolený z viacerých dôvodov. Najhlavnejší z nich bola potreba zabezpečiť pomalý a spoľahlivý chod vozidla. Veľká prevodovka má taktiež veľký odpor, čím sa eliminuje možnosť pretáčania kolies resp. nežiadúci pohyb vozidla na nerovnom povrchu.



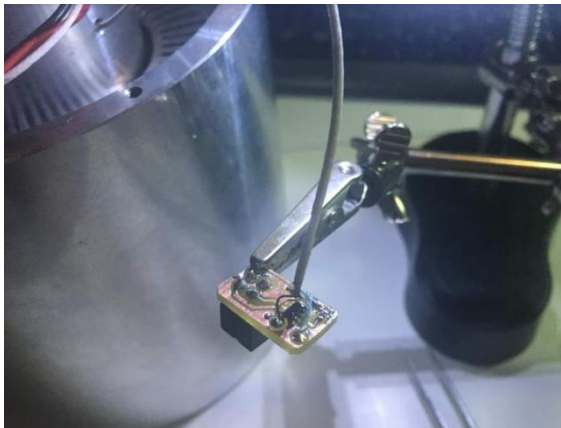
OBR. 28: DC MOTOR PG421

Na Obr.13 je znázornený rez zostavy zavesenia kolies s motorom. Skladá sa z vnútorného a vonkajšieho puzdra, ložísk a plastového obalu s dezénom, simulujúci skutočný obal kola z pevnejšieho materiálu. Zapuzdrenie má funkčnú ale aj bezpečnostnú úlohu, kde sú motory chránené jednak pred mechanickým poškodením od prostredia, ako aj pred slnečným žiarením či radiáciou.



OBR. 29: ZOSTAVA ULOŽENIA KOLESA

Z dôvodu detekcie a následnej možnosti riadenia otáčok jednotlivých kolies je v zadnej časti každého kolesa uložený systém optického enkódera. Skladá sa zo samotného enkódera, reflexnej senzorickej platne a prvkov pre ich uloženie. Prvky boli vylačené pomocou FDM technológie na 3D tlačiarňi. Zariadenie meria otáčky kolesa na základe vysielania a detekovania infračerveného lúča, pričom v určitej polohe (skrz diery) cez platňu lúč prejde a v inej (kde nie sú diery) sa odrazí naspäť do senzora. Frekvencia odrazov referuje rýchlosť otáčania sa platne a teda aj kolesa.



OBR. 30: MONTÁŽ A ZAPÁJANIE ENKÓDERA



OBR. 31: OPTICKÝ ENKÓDER CNY70



OBR. 32: ZOSTAVA ULOŽENIA ENKÓDERA



OBR. 33: 3D TLAČENÉ KOMPONENTY



OBR. 34: VONKAJŠIE PUZDRA



OBR. 35: VNÚTORNÉ PUZDRA



OBR. 36: MONTÁŽ ULOŽENIA KOLIES



OBR. 37: MONTÁŽ ULOŽENIA KOLIES

Obaly kolies boli vyrobené SLS 3D technológiou tlačenia. Skladajú sa z hlavného obalu a poklopu pre prípadnú demontáž kolesa. Postupné a zároveň detailné nanášanie veľmi jemného plastového prášku a jeho následné spekanie po vrstvách pri tejto technológii znamená vysokú presnosť výrobku. Materiál je pevný, ale zároveň pružný, čo sú ideálne vlastnosti pre simuláciu dezény kolies na vozidle. Montáž obalu na vonkajšie puzdro zostavy kolesa sa realizovala čiastočne cez lisovaný ale aj lepený spoj. Použité lepidlo má vysoké pevnostné vlastnosti, čo zaručuje spoľahlivé spojenie oboch materiálov. Následne sa nechalo lepidlo pár dní vytvrdnúť a mohlo sa pokračovať v uchytení na ramená vozidla.



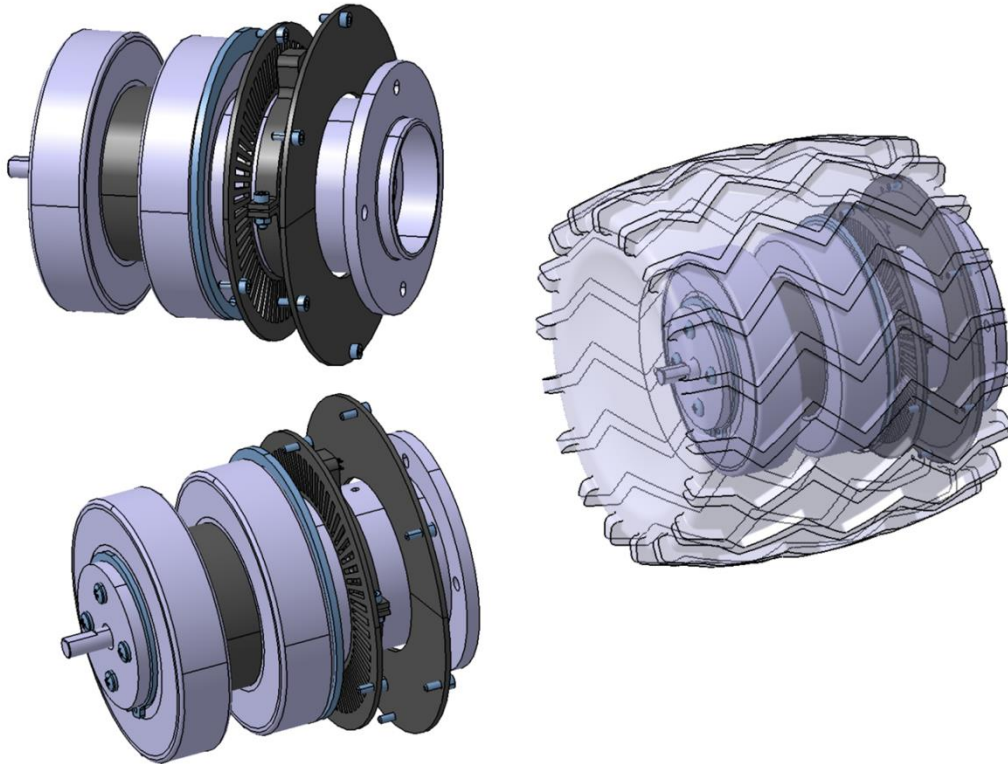
OBR. 38: MONTÁŽ OBALOV KOLIES



OBR. 39: ZOSTAVY ULOŽENIA KOLIES



OBR. 40: DEZÉNOVÝ OBAL KOLESA S POKLOPOM



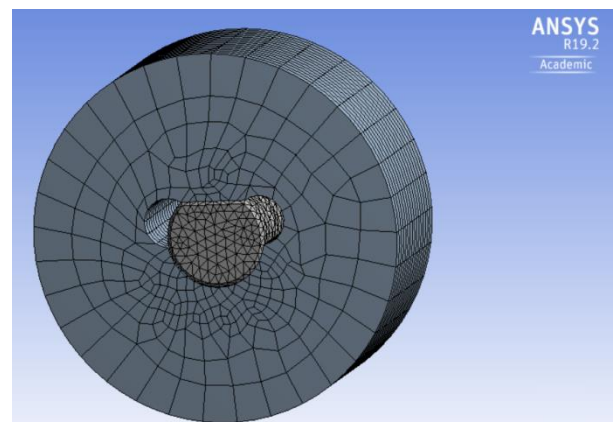
OBR. 41: 3D MODEL ZOSTAVY KOLESA

### Dimenzovanie prvkov v zostave osadenia kolies

Za najkritickejšie miesto pre kontrolu na otláčenie materiálu som zvolil tvarový spoj hriadeľa motora a puzdra. Vykonal som základný výpočet napätí (Von Misses) cez MKP software. Okrajové podmienky pre vytvorený model som úmyselne zvolil pre extrémny prípad votknutého vonkajšieho puzdra kola, kedy je tvarový spoj namáhaný najviac. Zaťažujúci krútiaci moment som aplikoval najväčší možný (rozbehový) o hodnote 7,5 Nm.



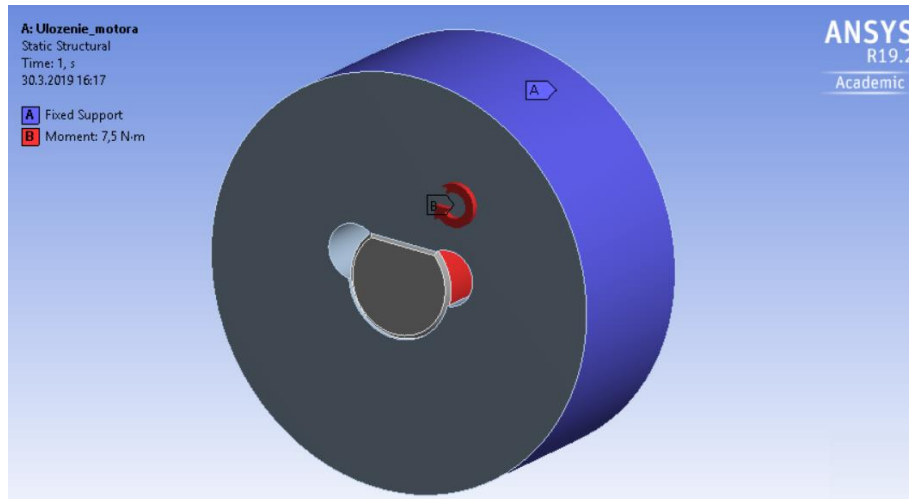
OBR. 42: 3D MODEL ZOSTAVY KOLESA



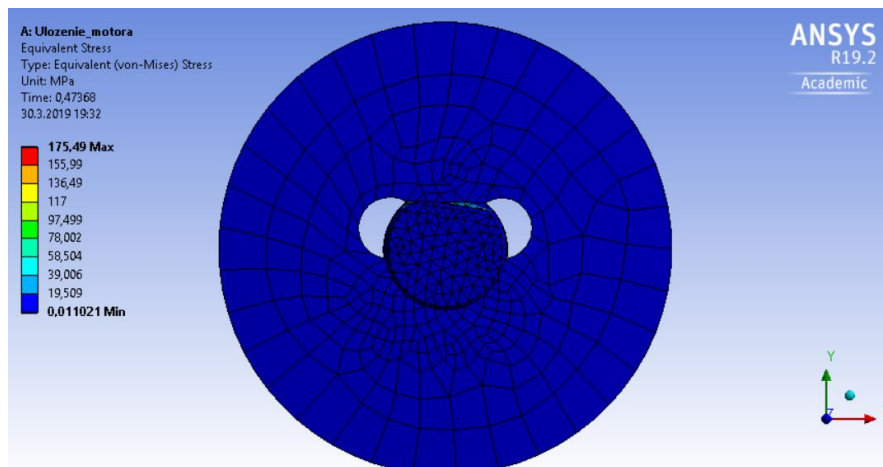
OBR. 43: 3D MODEL ZOSTAVY KOLESA



Pri modelovaní siete konečných prvkov na modeli som zvolil hustejšie delenie v oblasti kontaktu hriadeľa a náboja. Vo vzdialenejších oblastiach som hustotu siete zmenšil a tým zefektívnil výpočtový proces.



OBR. 44: ZOSTAVA KOLIES S RAMENAMI PODVOZKU



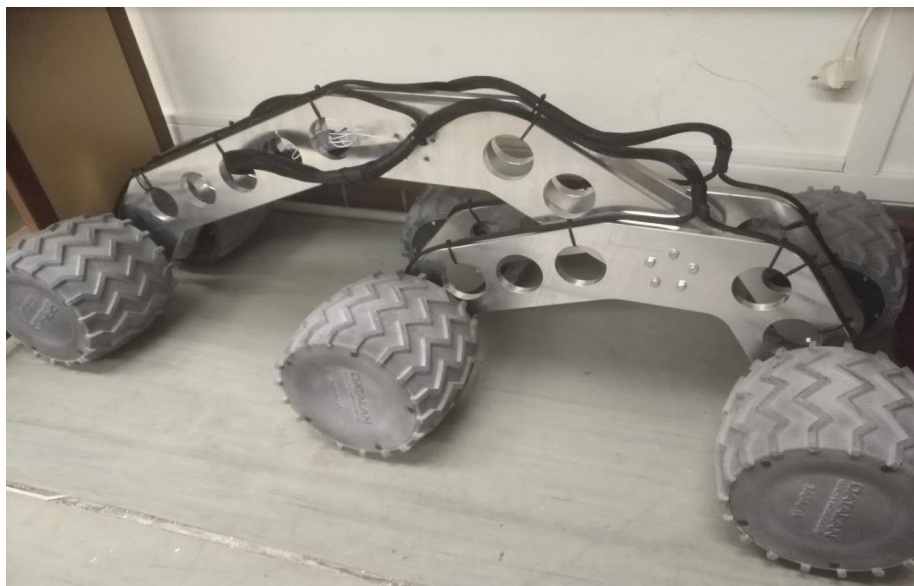
OBR. 45: ZOSTAVA KOLIES S RAMENAMI PODVOZKU

Hodnota maximálneho ekvivalentného napätia je:  $\sigma_{ekv.max} = 175,49$  MPa. Výsledok teda potvrdzuje vhodnosť vybraného materiálu a nadobudnutie prijateľných, bezpečných hodnôt napätí, keďže medza klzu ocele ako aj hliníkovej zliatiny náboja sú niekoľkonásobne vyššie (300-400 MPa).

Pri montáži kolies na podvozok vozidla sa využili vyrobené osadenia na oboch súčiastkach ako aj skrutkové spoje. Týmto spôsobom je zabezpečené pevné a odolné spojenie. Následne sa pri montáži pripevnila kabeláž kolies.



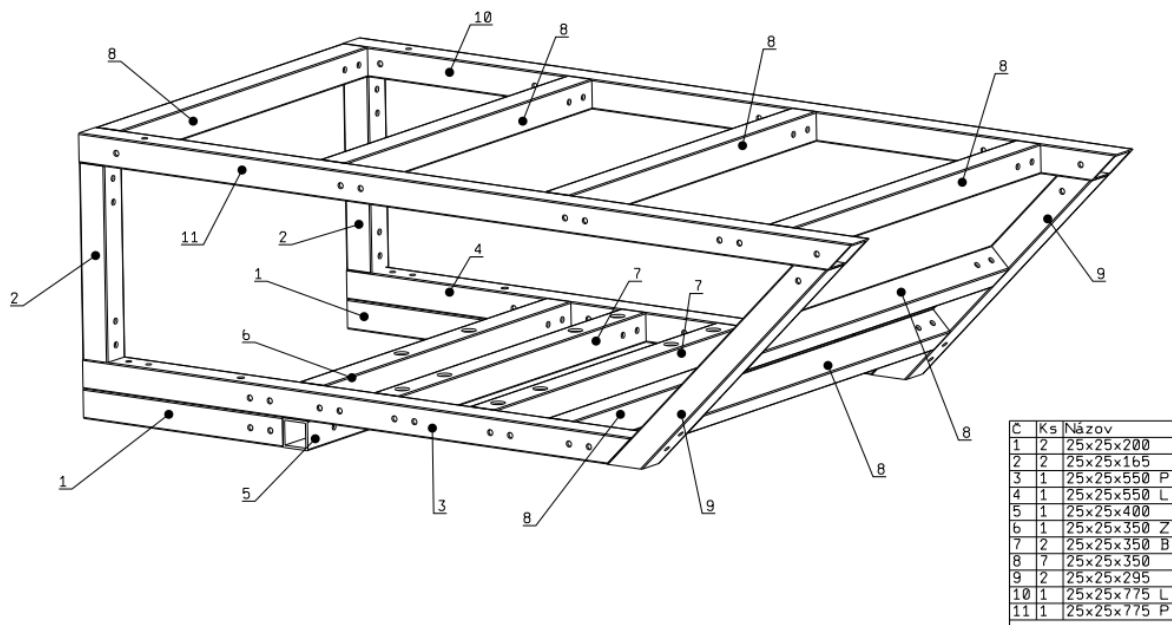
OBR. 46: ZOSTAVA KOLIES S RAMENAMI PODVOZKU



OBR. 47: ZOSTAVA KOLIES S RAMENAMI PODVOZKU

### 2.1.3. Návrh skrine

Základná kostra skrine vozidla je tvorená z duralových profilov typu jokel (25x25mm). V nej sú osadené stojanové ložiská, ktoré spájajú celú skriňu s podvozkom vozidla. Úložné miesto v zadnej časti slúži na efektívne uskladnenie batérií. Montáž kostry sa realizovala cez rozoberateľné, skrutkové spoje, čo je výhodné z hľadiska možnej modifikácie v budúcnosti. Táto možnosť sa už v priebehu samotnej montáže využila. Kotviace diery pre stojanové ložiská na spojenie s ramenami podvozku som volil v približnom geometrickom strede kostry. Následne som na kostru namontoval krycie plechy.



OBR. 48: ZOSTAVA PROFILOV KOSTRY SKRINE VOZIDLA



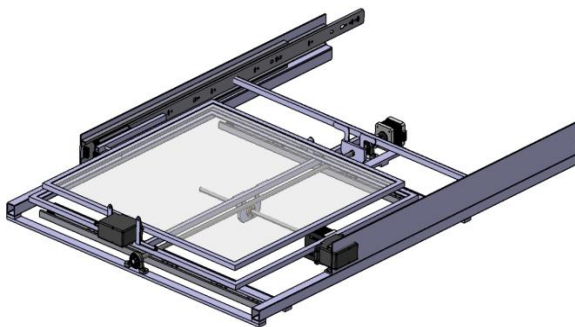
OBR. 49: MONTÁŽ PLECHOV NA RÁM SKRINE



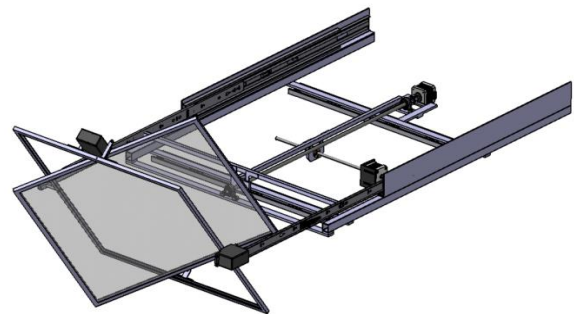
OBR. 50: RÁM SKRINE

#### 2.1.4. Návrh mechanizmu pohybu šošovky

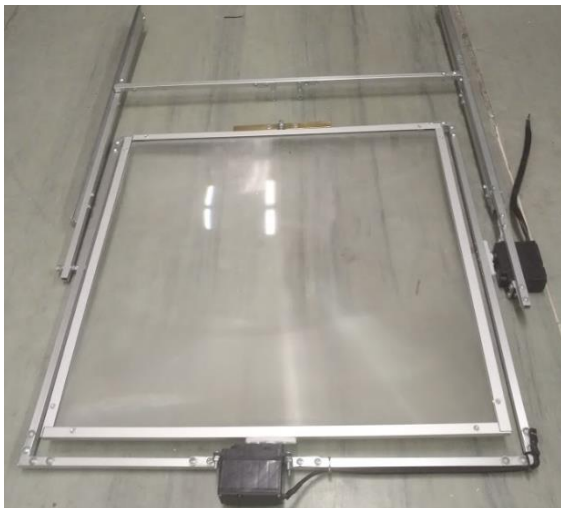
Pri navrhovaní mechanizmu uloženia Fresnelovej šošovky bolo nutné zabezpečiť, čo najefektívnejší spôsob usmerňovania slnečnej energie na povrch taveného materiálu počas procesu tlačenia. Výsledný mechanizmus je podobný ako pri konvenčnom 3D tlačení typu FDM. Umožňuje šošovke súčasný pohyb v dvoch osiach cez závitové tyče a krokové motory, ale taktiež aj natáčanie okolo týchto osí cez servomotory. Podporné koľajnice s valivými telieskami slúžia na plynulejší pohyb do jednotlivých smerov posuvu šošovky.



OBR. 51: MODEL ZASUNUTÉHO MECHANIZMU



OBR. 52: MODEL VYSUNUTÉHO MECHANIZMU



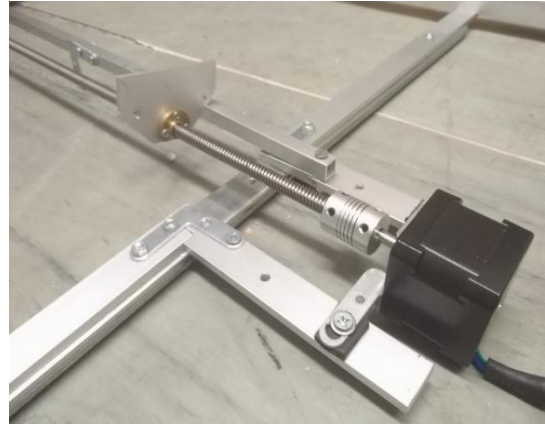
OBR. 53: POHYBLIVÁ ČASŤ MECHANIZMU S  
FRESNELOVOU ŠOŠOVKOU



OBR. 54: STATICKÁ ČASŤ MECHANIZMU



OBR. 55: SERVOMOTOR PRE NATÁČANIE ŠOŠOVKY



OBR. 56: KROKOVÝ MOTOR PRE PREDNÝ/ZADNÝ POHYB ŠOŠOVKY



OBR. 57: KROKOVÝ MOTOR PRE BOČNÝ POHYB ŠOŠOVKY

Spolu s pohybom natáčania skrine vozidla okolo osi nosných hriadeľov má ohnisko šošovky vysokú mobilitu. Na základe schopnosti nezávisle riadiť spomenuté pohyby je možné šošovku nastaviť vo väčšine prípadov do optimálnej polohy vzhľadom na miesto pôsobenia taviaceho procesu a efektívneho toku slnečnej energie. Mechanizmus navyše umožňuje zasunutie šošovky do polohy pod solárnymi panelmi, čo je východisková poloha pre pohyb vozidla v teréne. Tým sa eliminuje riziko nežiaduceho tavenia alebo poškodenia.



OBR. 58: MONTÁŽ MECHANIZMU ŠOŠOVKY



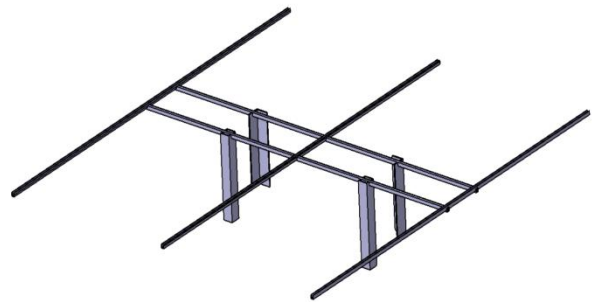
OBR. 59: MONTÁŽ MECHANIZMU ŠOŠOVKY

### 2.1.5. Návrh uloženia solárnych panelov

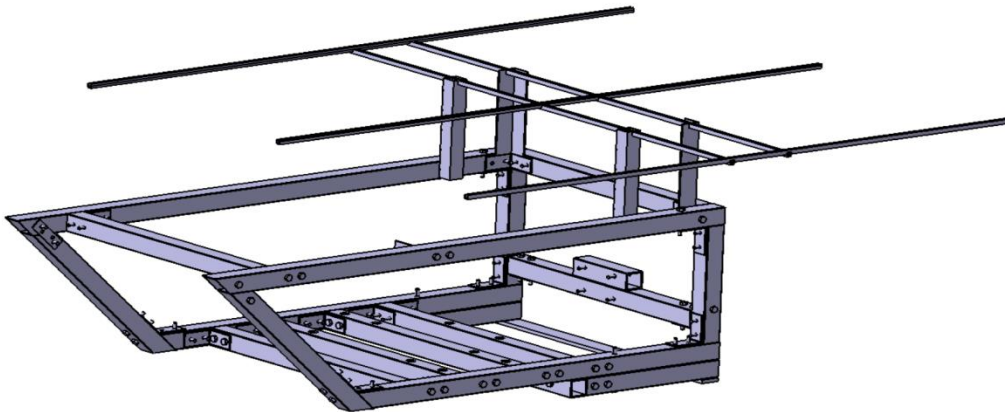
Solárne panely majú na vozidle významnú úlohu. Slúžia na napájanie batérií a teda zdroj energie pre celý systém. Z konštrukčného hľadiska bolo nutné navrhnuť ich statické uloženie na vrchnej strane vozidla tak, aby nekolidovali s mechanizmom šošovky pri jeho pohybe. Na uchytenie nosných profilov sa využil priestor v zadnej časti skrine. Panely bolo potrebné orámovať pre získanie lepšej pevnosti a zabráneniu ich ohybu. Následne sa vložili do pripravených drážok v uchytení a tým došlo k ich zaisteniu.



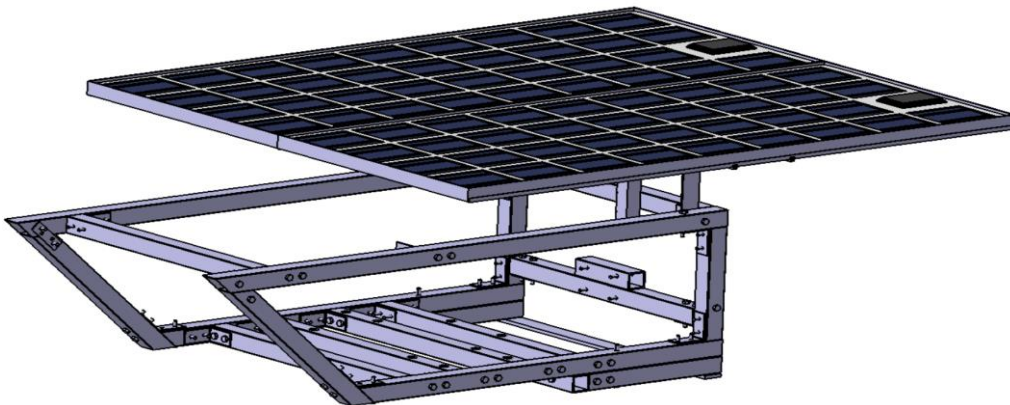
OBR. 60: SOLÁRNE PANELE ULOŽENÉ V RÁMOCH



OBR. 61: MODEL UCHYTENIA PANELOV



OBR. 62: ZOSTAVA SKRINE PRED OSADENÍM PANELOV



OBR. 63: ZOSTAVA SKRINE S PANELEMI

## 2.2. Testovanie jednotlivých mechanických systémov

Po kompletnom návrhu konštrukcie a montáže všetkých dielov do jedného celku sa začalo s prvým testovaním a overovaním základných funkcií vozidla.

### 2.2.1. Test mobility podvozku vozidla

Prvotné testy spočívali v overení samotnej funkčnosti pohybu všetkých kolies do oboch smerov a správneho natáčania skrine vozidla. Následne sa vyskúšala komunikácia s ovládačom a prvé riadenie.

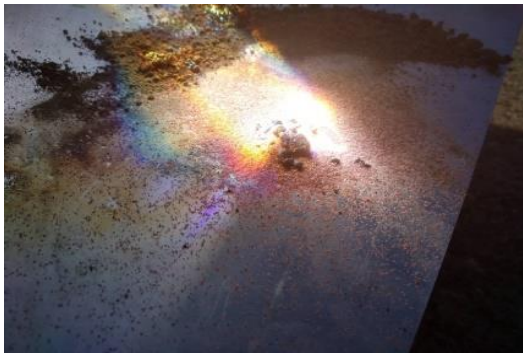


OBR. 64: VOZIDLO PRI TESTE MOBILITY PO ROVINNEJ PLOCHE

Podvozok dobre reagoval na prijímané pokyny a vozidlo vykonávalo ľubovoľné pohyby po rovnej ploche. Kinematika predných aj zadných ramien fungovala bez problémov. Vozidlo vykazovalo vysokú stabilitu, čo dokazuje nižšie položené ťažisko celej zostavy.

## 2.2.2. Test procesu bodového spekania materiálu

Ako druhý test v poradí sa uskutočnil proces spekania sypkých abrazívnych materiálov. Na tento proces je potrebné správne fungovanie mechanizmu náklonu skrine vozidla ako aj samotný pohyb šošovky. Aj pri tomto teste kinematika všetkých členov fungovala správne a pri sofistikovanom softvérovom riadení pohybov je vozidlo schopné nataviť resp. spieť materiál do pevnej štruktúry (Obr.).



OBR. 65: PROCES SPEKANIA MATERIÁLU



OBR. 66: PROCES SPEKANIA MATERIÁLU



OBR. 67: PROCES SPEKANIA MATERIÁLU



OBR. 68: VYTVORENÉ „SPEKANCE“



### 3. ZÁVER

V závere práce by bolo vhodné celkové zhodnotenie tohto študentského projektu. Moja spolupráca na projekte trvala približne dva semestre. Za túto dobu som od prvého stretnutia až po finálny návrh mechaniky vozidla nadobudol veľa skúseností, znalostí, zážitkov a spoznal veľa šikovných ľudí či už v školskom prostredí ale aj mimo neho. Naučil som sa riešiť problémy, ktoré prináša len prax. Od opráv a modifikácií konštrukčných návrhov cez následné stretnutia v externých firmách až po samotnú montáž či výrobu niektorých dielov. Prezentovanie projektu na absolvovaných podujatiach mi taktiež prinieslo cenné skúsenosti.



OBR. 69: TÍM ŠTUDENTOV NA PODUJATÍ STROJÁRSKY VEETRĤ (BRNO)



OBR. 70: TÍM ŠTUDENTOV NA PODUJATÍ NOC VÝSKUMNÍKOV (BRATISLAVA)

Dosiahnuté výsledky považujem za pozitívne a projekt hodnotím ako úspešný. Mechanika vozidla v doterajších testoch funguje bez väčších problémov. V testovaní budeme samozrejme pokračovať, nakoľko vidíme potenciál pre aplikáciu podvozku v niektorých technických odvetviach, kde by sa jeho dobrá priechodnosť a stabilita využila. Taktiež vidím priestor v ďalších zlepšeniach podvozku, či už hmotnostných alebo výkonových parametroch. Samotný mechanizmus spekania hodnotím tiež pozitívne, teda ako funkčný základ pre ďalšie úpravy a vylepšenia. Obzvlášť problém rovnomerného autonómneho nanášania materiálu do spekacieho procesu vidím ako veľkú technologickú výzvu. Snáď sa niekto tomuto problému v budúcnosti bude venovať serióznejšie a budeme o 3D tlači vo vesmíre ešte počuť.

V úplnom závere chcem poďakovať mojim kolegom, ktorí boli so mnou na projekte od úplného začiatku za ich rady, nápady a dobré postrehy. Myslím, že tento projekt je aj dôkazom toho, že na našej univerzite sa dajú robiť zaujímavé projekty, kde si študenti môžu vyskúšať ich zručnosti či vedomosti a pretvoriť svoje predstavy na skutočnosť.

## Bibliografické odkazy

### Knížné publikácie

- [1] KRÁĽ ŠTEFAN a kol., Časti a mechanizmy strojov II, Bratislava, 2002. 296s., ISBN: 80-227-1079-2
- [2] ANTALA JOZEF, Základy strojného inžinierstva, Pracovné listy k prednáškam, Bratislava, 2012. 218s., ISBN: 978-80-227-3772-2
- [3] HONG-AN YANG, QIANG GUO, Dynamic Rocker-Bogie: A Stability Enhancement for High-Speed Traversal, China, 2014. 212-220s., ISSN: 2089-4856
- [4] GIANCARLO, GENTA, Introduction to the Mechanics of Space Robots, Torino, 2012, 597s., ISBN: 978-94-007-1795-4
- [5] LEINVEBER JAN, VÁVRA PAVEL, Strojnické tabulky, Praha, 1999. 985s., ISBN: 80-7183-164-6

### Elektronické dokumenty

- [6] Curiosity/Opportunity rovers Rocker Bogie suspension [cit. 2019-2-12]. URL:<http://alicesastroinfo.com/2012/07/mars-rover-rocker-bogie-differential/>
- [7] Types of robots suspensions [cit. 2019-3-5]. URL: <http://www.robotpark.com/All-Types-Of-Robots>
- [8] FIRAT BARLAS, Design of a Mars Rover Suspension Mechanism, 2004. 93s. [cit. 2019-3-5]. URL: <http://hamaneh.ir/file/mechanic-en.pdf>

## Prílohy

Príloha 1: Čap ramenný

Príloha 2: Hriadeľ dlhý

Príloha 3: Kľuka

Príloha 4: Bežec

Príloha 5: Platforma

Príloha 6: Puzdro motora vnútorné

Príloha 7: Puzdro motora vonkajšie

Príloha 8: Rameno predné ľavé

Príloha 9: Rameno zadné ľavé

Príloha 10: Spojka koncová

Príloha 11: Spojka prevodová