



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

NÁVRH PODVOZKU PRO ELEKTRICKÝ MINIBUS

DESIGN OF CHASSIS FOR AN ELECTRIC MINIBUS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Bronislav Strnadel

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Bc. Bronislav Strnadel
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Automobilní a dopravní inženýrství
Vedoucí práce:	prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.
Akademický rok:	2018/19

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 diplomové práce:

Návrh podvozku pro elektrický minibus

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhnout kompletní podvozkovou platformu pro elektrický minibus pro max. 20 stojících cestujících pro městskou dopravu v rámci univerzitních kampusů. Konstrukce má být, co nejjednodušší a co nejvíce symetrická. Při návrhu se soustředit zejména na uchycení bateriového bloku a jeho snadnou robotizovanou výměnu.

Cíle diplomové práce:

Seznamte se se současnými řešeními rámu elektrických minibusů. Proveďte základní výpočty potřebného bateriového bloku. Konstrukční návrh rámu minibusu, který bude co nejvíce symetrický a umožní uchycení bateriového bloku. Navrhněte řešení vhodné pro robotizovanou výměnu bateriového bloku. Návrh rámu ověřte statickými pevnostními výpočty.

Seznam doporučené literatury:

VARGA, Bogdan, CLODEAN, Calin, FLORIN, Mariasiu. Electric and Hybrid Buses for Urban Transport: Energy Efficiency Strategies. Switzerland: Springer, 2016. ISBN 978-3-319-41249-8.

BERETTA, Joseph. Automotive electricity: electric drives. Hoboken, NJ: J. Wiley, 2010. ISBN 978--84821-095-0.

RAHN, Christopher D. Battery systems engineering. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley&Sons, 2013. ISBN 978-111-9979-500.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Teoretická část diplomové práce je věnována elektromobilům od jejich historie, přes zdroje elektrické energie a systém vyměnitelných baterií, až po elektrické autobusy a autonomní řízení. V praktické části je popsán koncept autonomního elektrického minibusu s výpočtem kapacity baterie. Dále je navrženo její uchycení k podvozkovému rámu a představa automatické výměny. V poslední kapitole lze nalézt konstrukční návrh samotného rámu spolu s pevnostní analýzou metodou konečných prvků.

KLÍČOVÁ SLOVA

podvozkový rám, elektrický minibus, elektromobil, autonomní, baterie

ABSTRACT

The theoretical part of the master thesis is devoted to electric vehicles from their history through sources of electric energy and a swapping battery system to electric buses and autonomous driving. In the practical part the concept of autonomous electric minibus with the calculation of battery capacity are described. Furthermore, the attachment of battery to chassis and the idea of automatic swap are designed. In the last chapter the design of chassis itself can be found together with the FEM analysis.

KEYWORDS

chassis frame, electric minibus, EV, autonomous, battery

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

STRNADEL, B. *Návrh podvozku pro elektrický minibus*. Brno, 2019. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 61 s. Vedoucí diplomové práce Josef Štětina.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením prof. Ing. Josefa Štětiny, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 24. května 2019

.....

Bronislav Strnadel

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat prof. Ing. Josefu Štětinovi, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce, včetně konzultací a věcných poznámek, které mi velice pomohly při jejím vypracování. Velký dík samozřejmě patří také mým rodičům, kteří mě po celou dobu mého studia na univerzitě podporovali.

OBSAH

Úvod	11
1 Elektromobily	12
1.1 Historie.....	12
1.2 Zdroje elektrické energie	15
1.3 Systém výměny baterií.....	21
1.4 Elektrické autobusy.....	23
1.5 Autonomní řízení	25
2 Koncept elektrického minibusu	27
2.1 Autonomní hromadná doprava	27
2.2 Problematika první a poslední míle	28
3 Baterie.....	29
3.1 Výpočet kapacity	29
3.2 Návrh konstrukce	34
3.3 Návrh uchycení k rámu	34
3.4 Představa robotizované výměny	37
4 Podvozkový rám	38
4.1 Konstrukce	38
4.2 Statická pevnostní analýza	42
Závěr.....	51
Seznam použitých zkratk a symbolů	57
Seznam příloh.....	61

ÚVOD

S rostoucí světovou populací roste také počet vozidel, což vede zejména ve velkých městech k dopravním zácpám, nadměrnému hluku a znečištění ovzduší. Obyvatelé tak musejí vdechovat zplodiny, které produkují automobily stojící v kolonách přímo pod jejich okny v ulicích města. Některá evropská města proto zavedla emisní zóny, do kterých je vozidlům povolen vjezd pouze s ekologickou plaketou podle příslušné emisní normy. S ohledem na naplnění závěrů Pařížské klimatické dohody přišla navíc Evropská unie s přísnějšími emisními normami, které nutí výrobce automobilů k vývoji šetrnějších motorů až na hranici technických možností. Proto se automobilky začaly zabývat elektromobily a automobily s hybridními pohony, které dané normy dokáží snadno splnit. Tento krok povede k dramatické proměně automobilového průmyslu v Evropě s nepředvídatelnými důsledky. Rychlý nástup elektrifikace dopravy s sebou přináší problém dostatečné dobíjecí infrastruktury a výrobní kapacity elektráren, kdy bude potřeba velké množství elektřiny, pokud možno z obnovitelných zdrojů. Investice do těchto projektů budou obrovské, které v konečném důsledku zaplatí samotný spotřebitel. Elektromobily jsou úzce spojeny také z energeticky náročnou výrobou baterií, která za sebou zanechává větší ekologickou stopu než výroba konvenčních vozidel. Z širšího pohledu se na produkci škodlivých látek vypouštěných do ovzduší podílí automobilová doprava jen minimálně v porovnání s jinými producenty, na které se nevztahují zdaleka tak přísné limity [35].

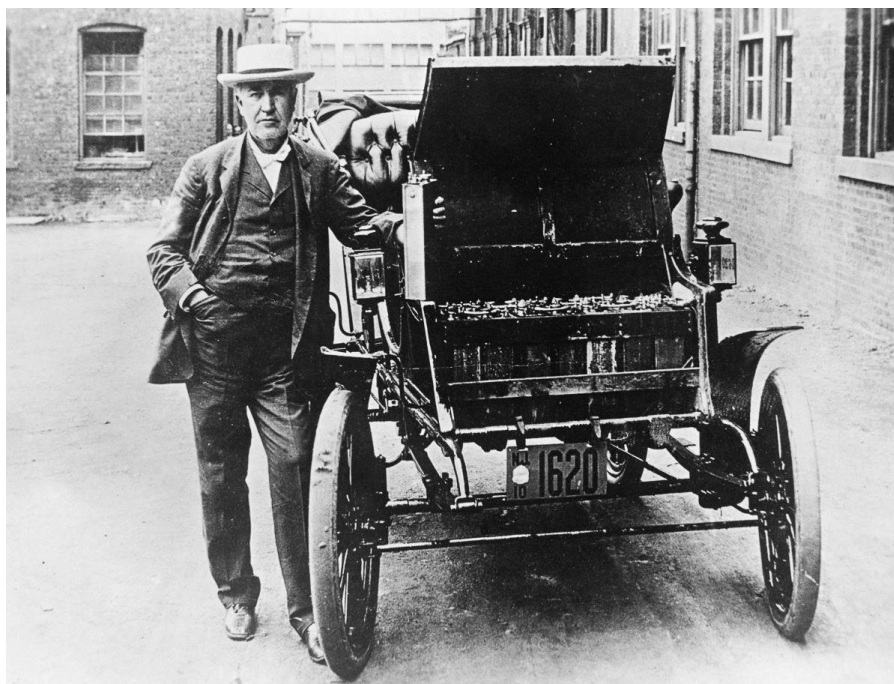
Předmětem této práce je autonomní elektrický minibus jako reprezentant technologie, jež v budoucnu nepochybně nahradí stávající vozidla na fosilní paliva. Toto téma mě motivovalo, protože mám rád inovace, zejména pokud mohou přispět ke zlepšení životního prostředí i přesto, že je jejich „čistota“ sporadická. Ve společnosti jsou elektromobily často odsuzovány kvůli ekonomické a ekologické náročnosti jejich výroby a emisím, které doprovází výrobu elektřiny potřebné pro jejich provoz. Doufám, že se brzy podaří dosáhnout hospodárnější výroby elektromobilů a zároveň dojde k většímu využití obnovitelných zdrojů energie, případně jaderných elektráren. Autonomní řízení vozidel navíc reaguje na trend automatizace, podobně jako průmyslová revoluce Průmysl 4.0 ve výrobě a při čím dál větším počtu vozidel a nedostatku řidičů je jen vítaná.

Cílem této diplomové práce je vypočítat základní parametry baterie minibusu a následně navrhnout symetrickou konstrukci jednoduchého podvozkového rámu, ke kterému bude možné bateriový blok uchytit. Zároveň je potřeba navrhnout řešení vhodné pro jeho snadnou robotizovanou výměnu. Pro ověření, zda navržená konstrukce pevnostně vyhovuje je nutné provést statickou pevnostní analýzu.

1 ELEKTROMOBILY

1.1 HISTORIE

Historie vozidel využívající ke svému pohonu elektřinu je úzce spojená s vynalezením baterie. Už v roce 1800 italský fyzik Alessandro Volta demonstroval možnost chemického uchování energie ve svém galvanickém článku, když se inspiroval svým krajanem Galvanim a jeho experimenty se žabí nohou vystavenou něčemu, co se později označovalo jako elektrický proud. Poté ho následovali další jako v roce 1821 Briton Michael Faraday, když objevil princip elektromotoru a o deset let později představil spojitost elektromagnetické indukce s elektrickým proudem a magnetismem. Položil tak základ elektrickým motorům nezbytným pro elektrická vozidla. Belgičan Gaston Planté pak v roce 1859 vynalezl první olověný akumulátor, který se dodnes používá pro startování spalovacích motorů a jako zdroj energie i v některých elektromobilech. Elektrickou tříkolku jako první elektrické vozidlo sestrojil až roku 1881 Francouz Gustave Trouvé a použil pro ni právě Plantéův akumulátor. Na počátku 80. let 19. století se podobné tříkolky objevily také v USA a Velké Británii. Nutno připomenout, že v roce 1885 představil Karl Benz první spalovací motor na světě [6].



Obr. 1 Thomas Edison v roce 1895 a jeho první elektromobil Edison Baker [21]

Thomas Edison (obr. 1) viděl v elektromobilech budoucnost a snažil se vyvinout efektivnější baterie. V roce 1901 přišel s nikl-železným akumulátorem, který upoutal pozornost při opětovném zájmu o elektromobily na začátku století. Byly schopny uchovat o 40 % více energie na jednotku hmotnosti než olověné akumulátory, ale jejich výrobní cena byla velmi vysoká, takže nemohly být použity v komerčních elektromobilech [6].

V období mezi lety 1880 až 1900 zažily elektromobily největší rozvoj, který ustal na počátku 20. let minulého století. Nikdy poté již podobně prosperující období, kdy došlo ke spoustě technologických průlomů, nepřišlo. Dokonce i dnes, o sto let později, se vývoj elektromobilů stále opírá o zkušenosti z počátku jejich éry [6].

Na přelomu století bojovaly elektromobily o majoritu na trhu spolu se spalovacími motory a automobily na páru. V roce 1903 bylo v New Yorku registrováno okolo 4 000 motorových vozidel, z toho 53 % s pohonem na páru, 27 % na benzin a 20 % na elektřinu. Již o pár let dříve však elektromobily předčily v prodeji ostatní dva konkurenty v rámci celých Spojených států a roku 1912 dosáhly svého vrcholu s počtem okolo 30 000 elektrických vozidel. Ke slovu se pak dostal slavný Ford T se svou sériovou výrobou, která započala v roce 1909 a začal dosahovat dominanci na trhu [6].

Rychlé dobíjení baterií bylo samozřejmě žádané stejně jako dnes, síť dobíjecích stanic existovala, ale nemohla konkurovat rychle se rozvíjejícím benzinovým stanicím, jejichž výstavba začala více méně ve stejnou dobu. Objevila se i vozidla se snadno vyměnitelnými bateriemi pro dosažení většího dojezdu. Kromě snahy o vylepšení baterií a důmyslný systém jejich dobíjení nebo výměny vznikly okolo roku 1900 další dvě technologie s cílem zvětšit dojezd elektromobilů. První z nich je princip rekuperace představený v Paříži v roce 1887, který využívá schopnosti elektromotoru chovat se jako generátor. Funguje to tak, že při brzdění nebo jízdě z kopce se kinetická energie kol přemění v elektromotoru-generátoru zpět na energii elektrickou, dochází tak k brzděnému efektu a zároveň lze přebytečnou energii dobíjet baterii. Druhou technologií je hybrid a jedním z prvních vývojářů v tomto odvětví byl Ferdinand Porsche, který uvedl automobil kombinující benzinový a elektrický pohon na výstavě v Paříži v roce 1900. Tyto první hybridy již byly vybaveny systémem rekuperace a byly skvělým řešením pro tichý chod při provozu ve městě a velký dojezd mimo něj. Kvůli vysoké ceně se hybridy bohužel více méně vytratily z trhu během první světové války a byly zapomenuty až do začátku 70. let minulého století [6].

I během první světové války, která ještě posílila výrobu a vývoj, měly elektromobily své místo. Nedostatek benzínu a potřeba vozidel se spalovacím motorem pro armádu vedla spolu s rozsáhlou výstavbou elektráren k produkci a využívání elektromobilů. Elektřina se jevila jako bohatý zdroj nejen pro průmyslové účely, ale i pro dopravu. Na konci války bylo v USA odhadem 50 000 elektrických vozidel [6].

Přes velké naděje ale elektromobily po válce brzo ztrácely za benzinovými a naftovými motory. Některé firmy je vyráběly i v průběhu 20. let, nicméně odbytl relativně nízký a po krachu burzy v roce 1929 většina z nich zbankrotovala. V USA nedošlo k obnovení výroby až do druhé světové války, kdy byly elektromobily potřeba z podobných důvodů jako během té první. Stejný scénář se odehrál i v Evropě a Japonsku, kde se elektromobily vyráběly až do počátku 50. let kvůli stále nedostatečným zásobám benzínu [6].

V 60. letech se rozhořely debaty o znečištění ovzduší ve velkých městech a spalovací motor byl označen za hlavního viníka. Tehdy se do každého benzínu přidávalo olovnaté aditivum a automobily neměly žádné filtry částic ani katalyzátory. Někteří výrobci se proto snažili vyrobit elektromobil s přijatelným dojezdem, výkonem a v neposlední řadě nízkou cenou, ale vzniklo jen několik prototypů a ukázalo se, jak obtížné je vyvinout elektromobil splňující tyto parametry [6].

Sešedesátá léta byla pro vývoj v oblasti elektromobilů velmi aktivním obdobím. Tyto vozidla byla atraktivní nulovými emisemi s možností použití solárních článků, větrné nebo vodní energie jako zdroje pro výrobu elektřiny. V USA, stejně jako v Evropě a Japonsku se většina velkých automobilek zabývala vývojem elektromobilů s různými pohonnými systémy a bateriemi, ale nikdy se pořádně neprosadily. Na konci 70. let tak vývoj elektromobilů celosvětově ustal [6].

Na začátku 80. let, kdy bylo znovu poukazováno na znečištění ovzduší velkých měst, se elektromobily opět ocitly v centru pozornosti. Podstatou problému se ukázalo příliš mnoho vozidel na jednom místě a především rychle rostoucí velkoměsta v rozvojových zemích. Světová komise pro životní prostředí a rozvoj (WCED) vydala v roce 1987 studii Naše společná budoucnost (Our common future), ve které zdůrazňuje důležitost environmentálních a klimatických problémů způsobené extenzivním využíváním fosilní energie, potřebu redukovat spotřebu energie v bohatých zemích a zároveň dosáhnout radikálního přechodu na obnovitelné zdroje energie. Oddělit fosilní energii a dopravní sektor je hodně tvrdý oříšek, jelikož tato dvě odvětví se vyvíjela ruku v ruce po více než sto let [6].

Celosvětový počet vozidel nepochybně narůstá, a zatímco spousta zemí zvládla stabilizovat nebo dokonce snížit spotřebu energie ve stacionárním sektoru, v dopravě stále roste. To vedlo k důležité změně v chápání problematiky dopravy. Od problémů s lokální intenzitou znečištění ovzduší ve velkých městech v 60. a 70. letech se okolo roku 1990 přešlo ke globálnímu problému nadměrného užívání motorizované dopravy a spotřeby energie. Novou iniciativu ve vývoji elektromobilů přineslo nařízení o nulových emisích vydané v Kalifornii v roce 1990 [6].



Obr. 2 První sériově vyráběný elektromobil GM EV1 z konce 90. let [22]

Devadesátá léta minulého století byla velmi intenzivním obdobím pro vývoj elektromobilů a hybridů (obr. 2). Všechny velké automobilky na světě se zapojily do poměrně rozsáhlých vývojových programů a začaly s vývojem účinnějších baterií. Bylo uspořádáno spousta mezinárodních R&D konferencí zaměřených výhradně na elektromobily, které byly již tehdy brány za „hudbu“ budoucnosti [6].

Dlouhá historie vývoje elektromobilů není historií neustálých objevů, ale je plná vzestupů a pádů. Všechny velké inovace jako jsou elektromotor, baterie a dobíjecí infrastruktura vznikly už před více než sto lety. S ohledem na historii vzniká otázka, zda je možné překonat všechny překážky, které jsou elektromobilům kladeny a vytvořit tak nový způsob dopravy dostupný pro všechny [6].

1.2 ZDROJE ELEKTRICKÉ ENERGIE

Nejběžnějším zdrojem energie elektrických vozidel jsou bezesporu baterie, které tvoří jednu z jejich nejdůležitějších komponent. Svou kapacitou a hmotností určují výkonové parametry, dojezd, užitečné zatížení a v neposlední řadě také dynamické vlastnosti vozidla [1]. Různé typy baterií se mimo jiné liší zejména svou gravimetrickou hustotou energie ($\text{Wh}\cdot\text{kg}^{-1}$) a výkonovou hustotou ($\text{W}\cdot\text{kg}^{-1}$). V porovnání s jinými zdroji energie (vodík, benzin...) mají výrazně nižší hustotu energie, nicméně tato nevýhoda do jisté míry kompenzována vyšší účinností elektrického pohonu [7].

Pro dosažení určitého dojezdu musí baterie obsahovat dostatečný počet článků, což ale vede k vyšší celkové hmotnosti vozidla. Kromě hustoty energie musí být při výběru vhodného typu baterie zvaženy ještě další aspekty jako jsou výkonová hustota, životnost, bezpečnost, použitelná kapacita (hloubka vybití) a nakonec cena baterie [7].

V současné době je na trhu dostupných několik typů baterií, kdy každý má své výhody i nevýhody, které musí být zvaženy podle technických požadavků a způsobu využití baterie.

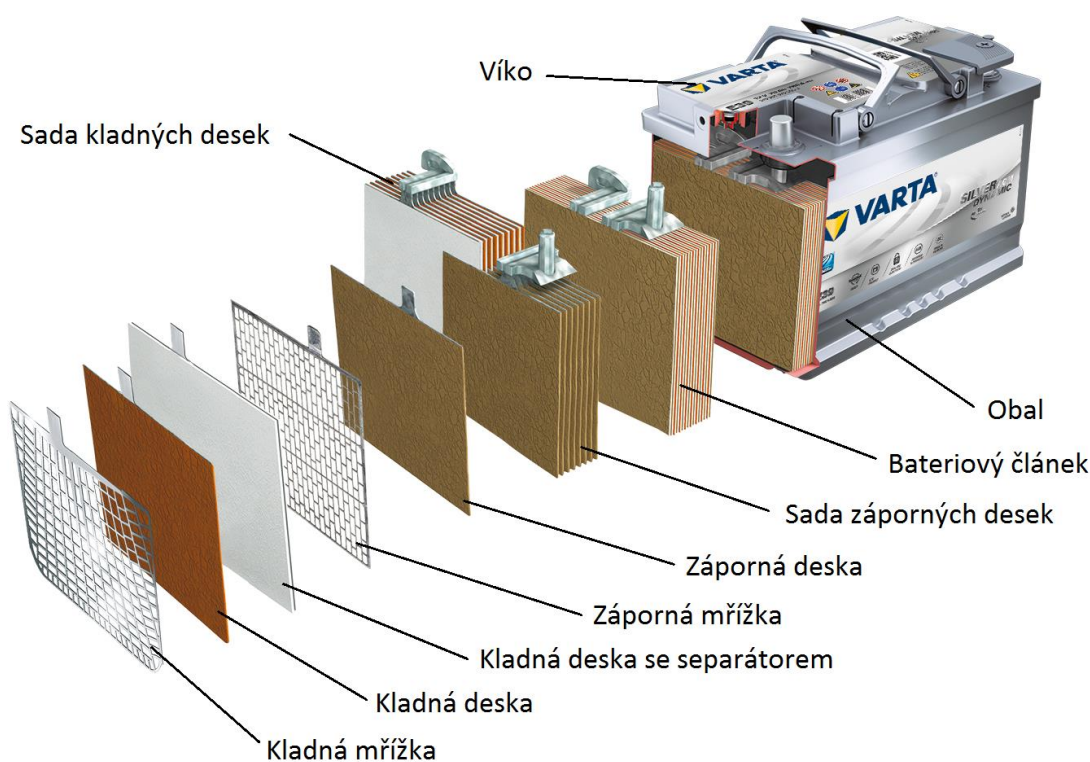
1.2.1 OLOVĚNÉ BATERIE

Konstrukce olověných baterií se skládá ze záporných olověných elektrod vložených mezi kladné elektrody z olova s přísadou vápníku nebo antimonu. Separátor z mikroporézního materiálu umožňuje chemickou reakci a zabraňuje zkratování vlivem kontaktu elektrod. Záporné a kladné elektrody jsou spojeny aktivním materiálem – oxidem olovičitým nebo síranem olovnatým, který vytváří velkou plochu pro uchování elektrochemické energie. Všechny kladné elektrody jsou svařeny dohromady a připojeny ke kladnému pólu baterie a analogicky u záporných elektrod. Celá sestava elektrod je uložena v polypropylenovém obalu uzavřeném víkem s větracími otvory, případně antiexplozivními pojistkami a hloubkoměrem. Baterie je naplněna roztokem elektrolytu, který se skládá z kombinace kyseliny sírové a destilované vody [8].

Při nabíjení probíhá v baterii elektrochemická reakce, která vytváří elektrický potenciál neboli napětí díky principu dvou kovů (kladné a záporné elektrody) s rozdílným potenciálem [8].

Po více než sto let jsou klasické olověné baterie se zaplavenými elektrodami běžným zdrojem energie pro napájení různých trakčních, podpůrných nebo záložních systémů. Díky významným pokrokům ve vývoji v posledním desetiletí však byla vyvinuta VRLA olověná baterie (řízená ventilem) jako alternativa pro standartní olověné baterie. VRLA baterie vznikla z požadavku na „bezúdržbovou“ baterii, zejména dolévání elektrolytu zabraňující vyschnutí článků a bezpečný provoz v bateriových blocích elektromobilů. Účinnost těchto baterií dosahuje 95–99 %. Požadavky na speciální odvětrávání a koncentraci elektrolytu jsou u VRLA baterií minimální. Komerčně jsou dostupné dva typy VRLA baterií s konstrukcí podobnou klasickým olověným bateriím se zaplavenými elektrodami, jedná se o AGM baterie se skelným vláknem a gelové baterie [8].

AGM baterie (obr. 3) mají velmi podobnou konstrukci jako klasické olověné baterie, protože používají stejné elektrody, mají však vyšší hustotu elektrolytu. Charakteristický je pro ně sklolaminátový separátor, který se v podstatě chová jako houba absorbující elektrolyt. Umožňuje výměnu kyslíku mezi elektrodami a zároveň je elektricky separuje. Tloušťka separátoru určuje stupeň absorpce elektrolytu. Čím větší je jeho schopnost absorbovat elektrolyt, tím nižší je pravděpodobnost vyschnutí článku a zkratování elektrod. Rozdílný je také větrací otvor nebo antiexplozivní pojistka, jež zabraňuje uvolňování kyslíku během normálního provozu a udržuje tlak uvnitř baterie pro výměnu kyslíku mezi elektrodami. Navíc funguje jako bezpečnostní zařízení zabraňující vniknutí elektrických jisker nebo oblouků a v případě nadměrného zvýšení tlaku se chová jako pojistný ventil [8]. Jejich životnost lze dvakrát až třikrát prodloužit, pokud nejsou vybíjeny pod 20 % kapacity. V porovnání s konvenčními olověnými bateriemi mají o 30 % vyšší výkon při stejném objemu. Inovativní baterie AGM našly využití u start-stop systémů [1].



Obr. 3 AMG baterie Varta (upraveno) [23]

Gelový typ VRLA baterií používá stejné elektrody jako klasické olověné baterie, pouze je do elektrolytu přidán prášek čistého oxidu křemičitého, který způsobí jeho zgelovatění. Při vysychání gelu vznikají trhliny, které jsou užitečné pro difuzi kyslíku mezi kladnými a zápornými elektrodami. Stejně jako AGM baterie jsou gelové baterie vybaveny větracím otvorem nebo antiexplozivní pojistkou udržující tlak v baterii a zabraňující uvolňování vodíku a kyslíku při abnormálním provozu [8].

Použití olověných baterií pro elektromobily není příliš vhodné, jelikož jejich výkon závisí na teplotě. Nicméně vynikají svou nízkou cenou, existujícím recyklačním programem a vysokou bezpečností [1].

1.2.2 NIKL-METAL HYDRIDOVÉ (Ni-MH) BATERIE

Tyto baterie jsou dnes velice rozšířené v přenosných elektrických zařízeních a postupně nahradily Ni-Cd baterie díky vyšší energii a nižšímu dopadu na životní prostředí [1].

Používají elektrolyt ve formě vodného roztoku hydroxidu draselného. Anoda je vyrobena z oxid-hydroxidu nikelnatého (NiO(OH)), zatímco katodu tvoří speciální kovová slitina, která s vodíkem vytváří směs hydridů neurčitého složení [10]. Pro katodu byly vyzkoumány dvě slitiny materiálu. První slitina označovaná jako AB₂ má absorpci vodíku 2 % hmotnosti, oproti tomu druhá slitina s označením AB₅ disponuje absorpcí 1,6 %. Vyšší absorpce slitiny AB₂ může být využita pouze s větší velikostí baterie, což je pro kompaktní baterii elektromobilu nežádoucí [8].

Japonští a evropští výrobci sáhli po slitině AB₅, která obsahuje vzácné zeminy s kobaltem pro zlepšení odolnosti vůči korozi a cyklickému nabíjení a vybíjení. Nevýhodou je relativně vysoká cena kobaltu a náročnost výroby slitiny. Firma Ovonic z USA volila slitinu AB₂, která je jakožto polyfázový materiál více náchylná ke korozi a časem rychle degraduje. Na druhou stranu má výhodu ve strmějším sklonu napěťové křivky, takže lépe zvládá zatížení [1].

Základní koncept Ni-MH baterií je výsledkem výzkumu kovových slitin, které jsou schopny absorbovat a uvolňovat vodík v objemu až tisíckrát větším než jejich vlastní. Mnohem menší atom vodíku snadno absorbovaný v mezerách bimetalové katody se zvětší až do velikosti 24 % svého objemu. Hustota kapacity katody dosahuje až 1800 mAh·cm⁻³ [8].

Články mají většinou válcový tvar, zejména kvůli jednoduchosti a ceně výroby. Za zmínku však stojí použití prizmatických článků firmou Panasonic, která je dodává pro slavný hybrid Toyota Prius (obr. 4). Spousta modelů hybridů a elektromobilů je vybavena Ni-MH bateriemi, zejména americké a japonské výroby, postupně jsou však vytlačovány výhodnější Li-Ion technologií [1].



Obr. 4 Ni-MH baterie Toyota Prius [24]

1.2.3 LITHIUM-IONTOVÉ (LI-ION) BATERIE

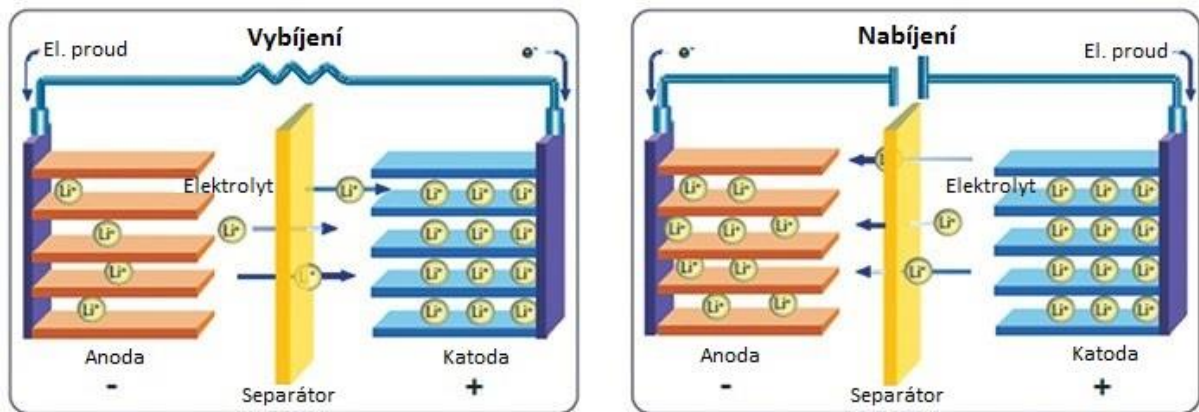
Lithiové zdroje energie (obr. 5) se v současné době používají ve všech přenosných elektronických zařízeních jako jsou notebooky, tablety nebo mobilní telefony a osvědčily se i v elektromobilech. Důvod, proč je tento typ baterie tak rozšířen je hlavně díky nízké atomové hmotnosti lithia, která dává poměr elektrické kapacity a hmotnosti $3,86 \text{ Ah}\cdot\text{g}^{-1}$ [1].



Obr. 5 Konstrukce válcového Li-Ion článku (upraveno) [26]

Zápornou elektrodu tvoří obvykle různé formy uhlíku, zejména grafit nebo vodík s obsahem uhlíkových materiálů. Pro kladnou elektrodu je známo několik druhů materiálů na bázi lithia, z nichž nejpoužívanější jsou LiCoO_2 , LiMn_2O_4 a LiFePO_4 . Výzkum nedávno přišel také s použitím grafenu, supertenké formy uhlíku, jako materiálu pro výrobu elektrod. Baterie s LiCoO_2 se vyznačují velmi stabilní kapacitou a spolu s vysokou specifickou energií se hodí pro použití v mobilních zařízeních, jako jsou smartphony, notebooky nebo digitální fotoaparáty. Jejich nevýhodou je však relativně krátká životnost, nízká tepelná stabilita a menší únosnost zatížení, takže se musí často dobíjet. Materiál LiMn_2O_4 umožňuje rychlé nabíjení a vybíjení baterií, oproti LiCoO_2 je levnější a má lepší stabilitu při vysokých teplotách. Baterie využívající tento materiál mají vyšší bezpečnost, která z nich dělá ideální zdroje pro zdravotnická zařízení, elektromobily nebo elektrické nářadí. Nevýhodou LiMn_2O_4 je ovšem jeho nižší kapacita. Oproti jiným Li-Ion bateriím jsou baterie s LiFePO_4 odolnější při dlouhodobém působení vysokého napětí. Jejich nízký odpor zvyšuje jejich bezpečnost a tepelnou stabilitu, což jsou důležité parametry pro použití v elektrických vozidlech. Jediná jejich nevýhoda v porovnání s ostatními Li-Ion bateriemi tkví v nízké specifické energii [37]. Vysoká reaktivita lithia s vodou vylučuje použití vodného elektrolytu, proto je nutné použít elektrolyt obsahující organické rozpouštědlo a lithiovou sůl, který má mnohem nižší vodivost než elektrolyt s obsahem vody. Vývoj baterií vyžaduje použití velmi tenkých elektrod a separátorů, které zvyšují riziko poškození. Navíc elektrody a organický elektrolyt mohou nevratně oxidovat v případě přetížení, to znamená, že se musí individuálně kontrolovat každý element v bateriovém bloku [1].

Při vybíjení se z anody uvolňují ionty lithia (Li^+), prochází organickým elektrolytem směrem ke katodě, kde jsou rychle absorbovány do jejího materiálu (obr. 6). Stejně snadno probíhá tento proces i obráceně a díky rychlé reverzibilitě iontů lithia mohou být Li-Ion baterie rychleji nabíjeny a vybíjeny než olověné nebo Ni-MH baterie. Navíc jsou schopny dodat stejné množství energie jako Ni-MH baterie, ale jsou obvykle o 40 % menší a o polovinu lehčí. Jsou také šetrnější k životnímu prostředí [8].



Obr. 6 Schéma principu Li-Ion baterií (upraveno) [25]

Stejně jako u olověných nebo Ni-MH baterií musí být zamezeno jejich přebíjení, aby se předcházelo poškození elektrod nebo rozkladu elektrolytu. Jelikož elektrolyt neobsahuje vodu, odpadá plynování spojené s jejím rozpadem. Vývoj moderních řídicích systémů baterií je klíčový pro zajištění bezpečného provozu jak při normálních podmínkách, tak v případě nehody vozidla [8].

Kromě vysoké hodnoty specifické energie mají Li-Ion baterie také dlouhou životnost, konvenční design a nízkou cenu. Jsou odolné proti samovybíjení a netrpí paměťovým efektem, který vzniká při opakovaném nabíjení baterie ve stavu, kdy není zcela vybita. Elektromobily s Li-Ion bateriemi dosahují skvělých výkonových charakteristik s ohledem na jejich akceleraci a dojezd. Mezi jejich nevýhody patří nestabilita, stárnutí a potenciální nebezpečí. Pokud totiž dojde k porušení separátoru oddělujícího kladnou a zápornou elektrodu, může chemická reakce způsobit vzplanutí baterie [8].

Jedna z posledních inovací v oblasti Li-Ion technologií jsou Li-Ion baterie s elektrolytem v pevném skupenství, které představují novou generaci trakčních baterií a slibují jejich nízkou cenu, vysoký výkon a bezpečnost. Eliminují hlavní nevýhody spojené s kapalným elektrolytem, jako jsou vysoká hořlavost, rozklad elektrolytu při přepětích, koroze elektrod a riziko vytečení elektrolytu. Snášejí také vyšší provozní teploty díky teplotní stabilitě a mají vyšší specifickou energii [9].

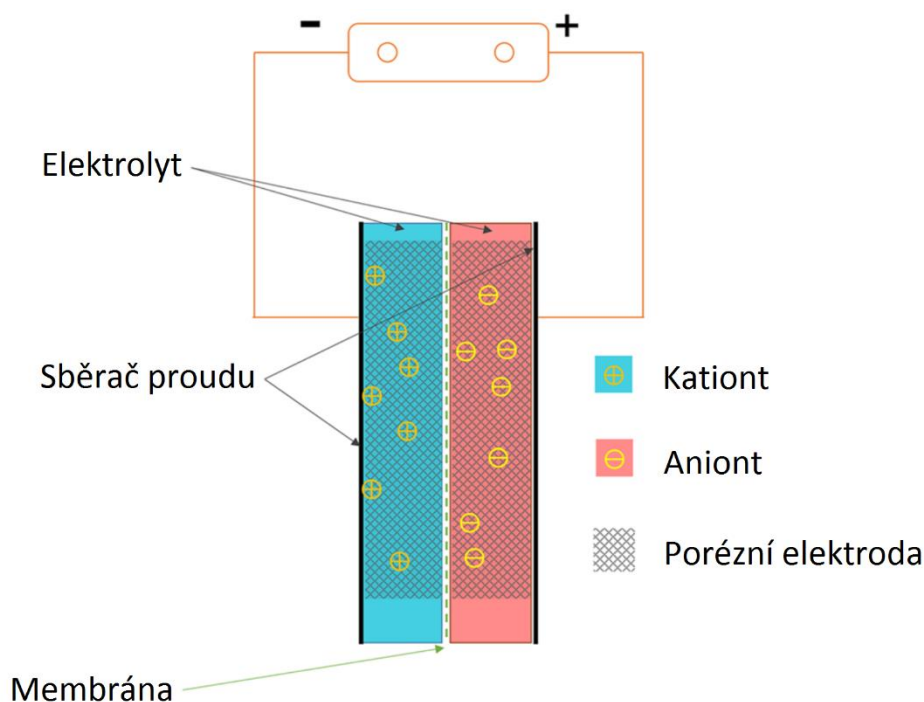
1.2.4 LITHIUM-POLYMEROVÉ (LIPO) BATERIE

Komerčně dostupné lithium-polymerové baterie používají namísto elektrolytu gelový polymer uzavřený v obalu ve formě vaku. Díky tomu jsou tenké, lehké a flexibilní, takže ideální pro použití v mobilních zařízeních, zejména pak v RC modelech. Z bezpečnostních důvodů však musí být tyto baterie opatřeny pevným obalem, který zabrání jejich rozpínání. Původní Li-polymerová baterie navržená v 70. letech minulého století měla polymer v tuhé formě, který ale nefunguje dobře při pokojové teplotě [14].

Oproti Li-Ion bateriím mají delší dobu samovybití, takže se lépe hodí pro zařízení, která jsou například nějakou dobu nevyužita. Nicméně jsou nákladnější na výrobu, mají nižší hustotu energie a kratší životnost, hůře pracují při nízkých teplotách (pod 0 °C) a jejich hluboké rychlé vybití může způsobit expanzi, vzplanutí nebo dokonce explozi baterie [14].

1.2.5 SUPERKAPACITORY

Superkapacitory známé také jako ultrakapacitory jsou zdroje elektrické energie, které se v poslední době těší velké popularitě. Stejně jako baterie, mají články superkapacitorů kladnou a zápornou elektrodu oddělenou elektrolytem (obr. 7), ale uchovávají energii elektrostaticky (jako kondenzátor) a ne chemicky jako baterie. Běžným kondenzátorům se podobají také dielektrikem ve formě separátoru oddělujícího elektrolyt. Taková konstrukce umožňuje superkapacitorům dosáhnout vysoké hustoty energie, obzvláště v porovnání s normálními kondenzátory. V porovnání s bateriemi o stejné velikosti dokážou uchovat méně energie, ale jsou schopny ji uvolnit mnohem rychleji, protože vybití ani nabíjení není omezeno chemickou reakcí. Další výhodou je jejich nízká degradace během nabíjení a vybití díky absenci fyzikálních nebo chemických změn při uchovávání elektrického napětí. Pro elektrody se nejčastěji používá uhlík v různých formách, jako jsou aktivní uhlí, tkanina z uhlíkových vláken, uhlík na bázi karbidu, grafit nebo uhlíkové nanotrubičky [15].



Obr. 7 Konstrukce superkapacitoru (upraveno) [27]

Používají se tam, kde je potřeba velký počet rychlých nabíjecích a vybíjecích cyklů namísto dlouhodobého uskladnění elektrické energie. Nejsou tedy vhodné jako hlavní zdroj energie v elektromobilech, lze je ale využít v situacích, kdy vozidlo potřebuje velké množství energie v krátkém čase jako například při akceleraci. Navíc mohou být superkapacitory velmi rychle dobíjeny během rekuperace brzděné energie. Někteří výrobci automobilů proto tuto technologii využívají pro systém start-stop [15].

Superkapacitory v současnosti nejsou schopny plně nahradit baterie elektromobilů, ale jejich dalším vývoj by mohl vyřešit problémy spojené se současnými elektromobily ve smyslu nedostatečného dojezdu, zdlouhavého dobíjení a relativně krátké životnosti baterií. Nejnovější studie představují možnost integrování superkapacitorů přímo do konstrukce karoserie automobilu ve formě nanotrubic, které by dokázaly uchovat dostatečné množství elektrické energie pro pohon vozidla a nahradit tak rozměrné a těžké baterie [15].

1.3 SYSTÉM VÝMĚNY BATERIÍ

Jednou z alternativ ke klasickému dobíjení baterií je systém jejich výměny ve speciálních stanicích, kde vozidlo jednoduše najede nad plošinu, proběhne automatická výměna a s plně nabitou baterií pokračuje v jízdě (obr. 8). Celý proces trvá jen několik minut, ale komerčnímu rozšíření tohoto systému brání několik překážek [16]:

1. Design baterie

Baterie musí být navrženy jako jeden bateriový blok, ke kterému je snadný přístup pro jeho výměnu. To lze vyřešit umístěním ploché baterie pod podlahu vozidla. Jelikož se baterie opakovaně odpojuje a připojuje k napájecímu a chladicímu systému vozidla, musí její konstrukce zajišťovat také snadné a rychlé vyjmutí, stejně jako zpětnou instalaci.



Obr. 8 Ukázka systému výměny baterií [28]

2. Kompatibilita

Pro rozšíření této technologie, je klíčová zaměnitelnost baterií napříč jejich výrobci. Jelikož každá automobilka vyrábí svá vozidla podle vlastních návrhů, bylo by pro ně zavedení standartního formátu baterií značně limitující. Jsou zde také různí výrobci bateriových článků a jednotnost bateriových bloků by znamenalo vyrábět stejné články, což by omezilo jejich vývoj a inovaci. Více variant baterií není vhodné řešení, jelikož by se navýšily skladovací kapacity a zkomplikoval automatický proces výměnných stanic.

3. Infrastruktura

Infrastruktura potřebná pro výměnný systém je mnohem komplexnější a dražší než pro klasické dobíjení baterií. Zaprvé mají výměnné stanice za úkol dobíjet baterie, tudíž musí být stejně jako dobíjecí stanice napojeny na elektrickou rozvodnou síť pouze s tím rozdílem, že lze kontrolovat dodávku proudu a baterie mohou sloužit jako úložný prostor pro ukládání elektrické energie. Přesto je nutné nabíjet všechny baterie co nejrychleji, aby byly připraveny pro dalšího zákazníka. Zadruhé musí mít každá stanice dostatečný počet baterií převyšující denní potřebu. To znamená, že pro každé vozidlo jsou potřeba dvě baterie, jedna ve vozidle a druhá ve výměnné stanici, což výrazně navyšuje cenu elektromobilu, protože baterie tvoří jejich nejdražší položku. Navíc jsou vysoké náklady na výstavbu a provoz výměnných stanic, kterých musí být dostatečný počet.

4. Degradace baterií

Baterie postupem času degradují a v důsledku toho, se každým nabíjením zkracuje dojezd elektromobilu. Představa systému vyměnitelných baterií, kdy všechny vozidla používají baterie o stejném formátu a výkonu zahrnuje fakt, že budou ve výměnných stanicích baterie s různou kapacitou, hlavně kvůli jejich degradaci. Většina řidičů si tak pochopitelně při výměně vybere novější baterii s větší kapacitou, a tedy i dojezdem a nemusí tak často navštěvovat výměnnou stanici. Naopak budou nespokojeni, když místo novější baterie dostanou starší, na kterou ujedou menší vzdálenost. Výsledkem toho se pro zajištění spokojenosti zákazníků zkrátí životnost baterií a opotřebené baterie budou častěji nahrazeny novými, což drasticky zvýší náklady na jejich recyklaci.

5. Vlastnictví baterie

V případě, kdy je baterie ve vlastnictví majitele vozidla se na výměnné stanici vymění za jinou, kterou si řidič pouze „vypůjčí“ a původní baterie se mezitím dobíjí. Po návratu na stanici se původní, již nabitá baterie znovu nainstaluje zpět do vozidla. Výhodou této metody je, že baterie pořád patří majiteli vozidla, který má také přístup k ostatním bateriím. Ovšem řidič se vždy musí vrátit na stejnou výměnnou stanici pro svou baterii. Je nezbytné, aby byl také dostatečný počet baterií pro uspokojení poptávky zákazníků, protože baterie vlastníků vozidel nemohou být použity v jiném vozidle a zůstávají na stanici, dokud si je jejich majitelé nevyzvednou. Pokud baterie nepatří majiteli vozidla dojde k razantnímu snížení ceny elektromobilu a zvýšení flexibility díky tomu, že se řidič po výměně baterie nemusí vracet na stejnou stanici. Při každé výměně je však řidič nucen zaplatit nejen za spotřebovanou energii, ale také za pronájem baterie.

6. Nabídka a poptávka baterií na výměnných stanicích

Se stoupající poptávkou po bateriích a výměnných stanicích se mohou zvýšit i náklady spojené s dopravou těžkých baterií, a tím ke zvýšení jejich provozních nákladů.

Kvůli zmíněným překážkám a většímu zaměření vývoje na technologii dobíjení nezažívá tento systém výměny baterií velký úspěch. Uplatnění by ale mohl najít například ve velkých metropolích asijských států, kde je obrovské množství malých jednostopých a třístopých vozidel jejichž počet konstantně roste. Baterie těchto vozidel jsou podstatně menší a lehčí než baterie v elektromobilech, a lze je tak snadno vyměnit i manuálně. Výměnné stanice mohou být rozmístěné na více místech po městě pro zajištění maximální obslužnosti. Na rozdíl od dobíjecích stanic nemusejí být baterie dobíjeny vysokými proudy, které zatěžují elektrickou síť. Náklady spojené s výstavbou výměnných stanic jsou podstatně nižší než jejich automatické verze pro elektromobily, v podstatě zahrnují jen stojan s uskladněnými bateriemi, který je připojený na elektrickou rozvodnou síť (obr. 9). Pro úspěch tohoto projektu je ovšem nezbytné, aby měly baterie jednotný design, byly zaměnitelné napříč různými typy vozidel a byla dostatečná infrastruktura výměnných stanic. Podobný scénář, avšak s většími a těžšími bateriemi by mohl nastat i u jiných vozidel městské dopravy, ať už se jedná o hromadnou dopravu, taxislužbu nebo jiné provozovatele vozového parku [17].



Obr. 9 Elektrický skútr a stojan s výměnnými bateriemi [39]

1.4 ELEKTRICKÉ AUTOBUSY

Z důvodu rychlé urbanizace světa a s ní spojené rostoucí znečišťování ovzduší jsou elektrické autobusy skvělým řešením dopravy ve velkých městech. Takové autobusy nevypouští žádné škodliviny ani skleníkové plyny, a dokonce i kdyby elektřina na jejich provoz pocházela z uhelných elektráren, stále dosahují v průměru menšího znečištění na kilometr než diesellové autobusy. Elektřina je také levnější než nafta nebo zemní plyn, takže mají elektrobusesy nižší provozní náklady a díky jednoduchosti konstrukce lze ušetřit také na jejich údržbě. Další výhodou elektrických autobusů je jejich tichý provoz, což vede ke snížení hlukové zátěže velkých měst. Přestože rozdíl pořizovací ceny hraje proti elektrifikaci, převažující výhody vedou spoustu měst k obměně jejich vozového parku za elektrické autobusy [18].

Technologie se rychle vyvíjí a za posledních několik let se podařilo dvojnásobit výkon i dojezd elektromobilů, vznikl nový průmysl a infrastruktura dobíjecích stanic se neustále rozrůstá. Analýzy ukazují, že v příštích asi 10 letech poroste prodej autobusů na alternativní paliva nebo elektřinu mnohem rychleji než prodej diesellových autobusů, přesto ale kvůli jejich počtu zůstane nafta dominantním palivem. Nejrychlejší růst je očekáván v rozvojových zemích, zejména v Číně a Indii, kde jsou problémy s ovzduším nejvážnější [18].

Elektrobuses americké značky Proterra jsou až o několik tun lehčí než jejich konkurenti, protože jejich konstrukce je vyrobena z ultra lehkých uhlíkových vláken. Minulý rok představila společnost elektrobuses Catalyst E2 Max (obr. 10), který na jedno nabití ujel přes 1 772,2 km, což je nový světový rekord ujeté vzdálenosti elektrickým vozidlem. Dlouhé bateriové bloky umístěné pod podlahou a na střeše autobusu představují mezi 440 a 660 kWh energie s dojezdem 320–560 km v závislosti na konfiguraci. Autobus se pyšní dvěma elektromotory, které dávají výkon 510 koní a zvládnou převýšení až 26 stupňů. Stejně jako Tesla využívá také technologii rychlonabíjení, která plně nabije baterie během 10 minut [18].



Obr. 10 Elektrobuses Proterra Catalyst E2 Max [18]

Proterra na tomto rostoucím trhu není zdaleka sama, čínský výrobce automobilů BYD značně rozšířil svůj výrobní závod v Lancasteru v Kalifornii, kde bude vyrábět nejen elektrobusesy, ale také elektrické nákladní vozy. Volvo, jakožto největší výrobce autobusů na světě nedávno představilo novou verzi řady 7900, která na jedno nabití ujede 200 km a zajímavostí je také vývoj bezdrátového dobíjení zabudovaného ve vozovce. Hyundai přišel s elektrobusem „Elec City“ s dojezdem 290 km. Volkswagen, který se stále vzpamatovává z emisní aféry investuje 1,7 milionu dolarů na vývoj elektrických (případně autonomních) autobusů a nákladních vozidel. New Flyer, největší výrobce autobusů v Severní Americe se zase chlubí novým elektrobusem Xcelsior Charge s dojezdem 320 km. V Indii pro změnu vládne elektrickým autobusům Tata Motors [18].

S rozvíjejícím se průmyslem klesají náklady, vynikají výhody bateriových elektrobusesů a stále více měst se zapojuje do programu čisté dopravy bez fosilních paliv.

1.5 AUTONOMNÍ ŘÍZENÍ

Autonomní neboli samoříditelná vozidla zatím nebyla mezi veřejností úplně přijata a jejich používání také není široce rozšířené, jejich doba totiž teprve přijde. Většina velkých automobilek již aktivně vyvíjí technologie autonomních vozidel a provádí jejich rozsáhlé testování v provozu (obr. 11) [19].

Hlavním cílem autonomních vozidel je zvýšení bezpečnosti na silnicích, díky pomocným systémům (ADAS), jako jsou například tempomat, automatické nouzové brzdění nebo hlídání jízdního pruhu. Očekává se masivní vývoj automobilů s cílem dosáhnout plné autonomie, kde jsou tyto pomocné systémy stále více řízeny centrálním počítačem, který přebírá zodpovědnost za řízení vozidla [19].

Autonomní vozidla propojená s ostatními automobily a infrastrukturou řízení dopravy získávají informace o dopravní situaci v reálném čase, které pomáhají navigačnímu systému vybrat optimální trasu. Tím, že dokážou hlídat vzdálenost mezi vozidly, mohou zmenšit jejich odstup v jízdních pruzích a zvýšit rychlost dopravy. Protože jsou autonomní vozidla lehčí než konvenční automobily, dosahují menší spotřeby energie [19].



Obr. 11 Autonomní systém elektromobilu Tesla [29]

Pro zajištění bezpečného a spolehlivého provozu jsou autonomní vozidla vybavena speciálními technologiemi [19]:

1. Umělá inteligence

Testování autonomních vozidel je nejvíce zaměřeno na umělou inteligenci, která zahrnuje funkce jako rozpoznávání řeči, hlasové vyhledávání, rozpoznávání a zpracování obrazu, detekce pohybu a analýza dat. Společně dokáží tyto systémy rozeznávat chodce, ostatní vozidla, dopravní signály a držet se dané trasy.

2. Bezpečnost

Aby byla autonomní vozidla přijata mezi širokou veřejností, musí být především zajištěna jejich bezpečnost, a to nejen cestujících, ale také ostatních vozidel a chodců. K tomu jsou vybavena několika kamerami a dalšími typy senzorů monitorující okolí vozidla. Ačkoliv je hlavní aspekt autonomních vozidel bezpečnost provozu, potenciální možnost kybernetického útoku neboli „hacknutí“ vzbuzuje jisté obavy.

3. Síť

Rychlé a nepřetržité propojení mezi autonomními vozidly a okolních zdrojů, jako jsou cloudové úložiště zajišťuje rychlejší výměnu signálů mezi vozidly. Se vznikem 5G bezdrátové technologie, která slibuje vysokou rychlost připojení a stahování dat, je očekávána vyšší konektivita vozidel umožňující širokou škálu funkcí od účasti na videokonferencích, přes hraní online počítačových her, až po sledování zdravotního stavu. Komunikace mezi vozidlem a sítí umožňuje výměnu dat s okolní infrastrukturou pro jízdu v souladu s rychlostními limity a dopravním značením. Dokáže také snížit spotřebu a zabránit nehodám. Vzájemná komunikace mezi vozidly zase zajišťuje bezpečný provoz s ohledem na dopravní situaci a pomáhá také vyhnout se kolizím.

4. Sensory

Technologie senzorů se rychle vyvíjí s ohledem na narůstající počet autonomních vozidel a zahrnují hlavně systémy radar, lidar a kamery. Tyto technologie umožňují provoz vozidel na pěti autonomních úrovních tak, jak jsou definovány sdružením SAE International:

- Úroveň 0 – Systém pouze vydává varování, ale vůz nedokáže neovládat.
- Úroveň 1 – Vozidlo dokáže samo plnit jednoduché úkoly zatáčení a akcelerace (tempomat, parkovací asistent), všechny další operace jsou na řidiči.
- Úroveň 2 – Autonomní systém dokáže plně přebrat ovládání vozidla, řidič však musí být stále ve střehu a připraven reagovat.
- Úroveň 3 – Řidič nemusí věnovat pozornost řízení, vozidlo si poradí i s nebezpečnými situacemi vyžadující rychlou reakci, do určité doby však musí řidič zasáhnout.
- Úroveň 4 – Stejně jako u úrovně 3, ale již není vyžadována pozornost řidiče s výjimkou vysoce nebezpečných situací.
- Úroveň 5 – Není vyžadován jakýkoliv lidský zásah do řízení, vozidlo je plně autonomní.

2 KONCEPT ELEKTRICKÉHO MINIBUSU

Jako koncept pro tuto práci byl vybrán autonomní elektrický minibus určený pro přepravu studentů v rámci univerzitního kampusu VUT v Brně s maximální kapacitou 20 osob, z toho 14 stojících a 6 sedících cestujících. Díky tomu spadá do kategorie vozidel M2, jejíž specifikace udává více než 8 míst k přepravě osob a nejvyšší přípustnou do 5 000 kg [30]. Výkon minibusu je odhadován na 100–150 kW a s ohledem na provoz ve městě dosahuje maximální rychlosti 60 km·h⁻¹. Minibus dokáže jezdit zcela samostatně na autonomní úrovni 5, tedy bez nutnosti lidského zásahu a automaticky probíhá i výměna baterie.

Konstrukce minibusu je plně symetrická a má říditelné obě nápravy, což zlepšuje jeho manévrovatelnost zejména na malém prostoru. Vozidlo pohání dva elektromotory, na každé nápravě jeden, které přes diferenciály a poloosy přenáší točivý moment na kola. Baterie umístěná pod podlahou minibusu je během provozu bezpečně zajištěna na svém místě a po vybití na určitou kapacitu nebo ukončení provozu se na výměnném stanovišti automaticky vymění za plně nabitou během několika minut. Odpadá tedy čekání při dobíjení baterie, jak je tomu u většiny dnešních elektromobilů, což značně zvyšuje provozuschopnost a efektivitu přepravy. Jako u každého autonomního vozidla má i tento minibus ve své výbavě spoustu čidel, senzorů a kamer monitorující jak samotné vozidlo, tak okolí kolem něj. Hodnoty z těchto zařízení následně vyhodnocuje centrální počítač a adekvátně reaguje, neboť veškeré ovládací prvky jsou řízeny elektricky neboli tzv. „drive-by-wire“.

2.1 AUTONOMNÍ HROMADNÁ DOPRAVA

Za účelem snížení počtu vozidel, škodlivých emisí a zlepšení průjezdnosti zejména ve velkých městech se automobilky kromě jiných trendů stále více zaměřují na vývoj vozidel, které dokáží přepravit větší množství osob. Taková vozidla jsou ideálním řešením problematiky tzv. „první a poslední míle“, navíc je lze implementací autonomního řízení snadno propojit s aplikacemi jako jsou Uber nebo Lyft a společně zajistit dopravní dostupnost napříč celým městem. Využívání těchto aplikací jako alternativní dopravy ve velkých městech je stále více populární hlavně díky nízkým cenám přepravy, snadné dostupnosti a jednoduchosti [31].

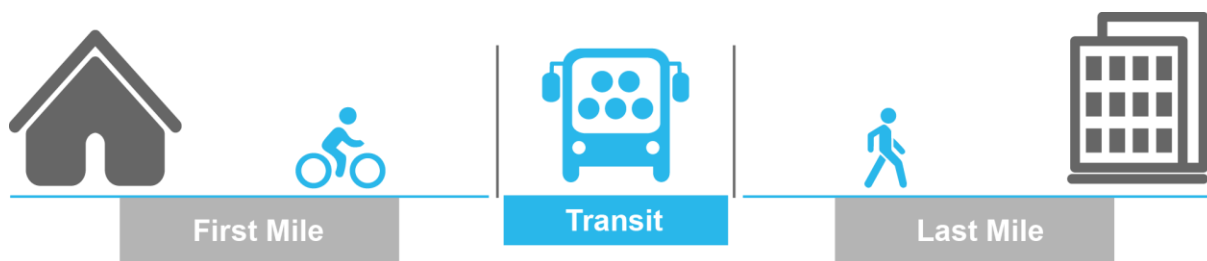
Navya Autonom Shuttle (obr. 12) je pěkným příkladem autonomního elektrického minibusu francouzského výrobce, který se zaměřuje pouze na tento typ vozidel do měst a pro soukromé účely od roku 2015. Autonom Shuttle má kapacitu 15 cestujících, dosahuje provozní rychlosti 25 km·h⁻¹ a v průměru vydrží až 9 hodin jízdy. Používá nejmodernější technologie multisenzorů pro lokalizaci, měření rychlosti, mapování okolí, detekování překážek a rozpoznávání dopravních značek. Minibus je částečně symetrický a má říditelné obě nápravy, takže se dokáže otočit na poloměru menším než 4,5 metru. Pohon jedné nápravy zajišťuje elektromotor o jmenovitém výkonu 15 kW, který je napájen LiFePO₄ baterií o kapacitě 33 kW. Doba nabíjení na 90 % kapacity je 8 hodin při výkonu 3,6 kW nebo 4 hodiny při dvojnásobném výkonu dobíjecí stanice. Tyto minibusy již brázdí ulice měst ve Francii, Švýcarsku a Austrálii nebo operují pod záštitou letišť, univerzit a soukromých firem [32].



Obr. 12 Autonomní minibus Navya Autonom Shuttle [32]

2.2 PROBLEMATIKA PRVNÍ A POSLEDNÍ MÍLE

Cestování veřejnou dopravou sebou obvykle přináší problém, jak se dostat z dopravního uzlu (vlakové nádraží, autobusová zastávka, přístaviště atd.) k vytyčenému cíli. Pro takovou problematiku existuje termín „poslední míle“. V opačném případě, kdy je pro cestující obtížné dostat se z výchozího místa na nejbližší zastávku veřejné dopravy, je takový scénář analogicky popisován jako problém „první míle“ (obr. 13). Tyto problematiky jsou obzvláště akutní na místech, kde nové zástavby přesouvají firmy a obyvatele na předměstí s nižší hustotou. Vzdálenost k existující síti veřejné dopravy je na těchto místech často příliš velká pro chůzi pěšky, proto se lidé spoléhají na vlastní automobily, což má za následek větší dopravní zácpy, znečištění a rozrůstání měst. Tradičním řešením jsou svozové autobusy, cyklostezky a změny územního plánování. Alternativy představují programy sdílených jízdních kol, automobilů nebo dnes velice populární elektrické koloběžky, skateboardy, elektrokola apod. [33].



Obr. 13 Problematika první a poslední míle [34]

3 BATERIE

3.1 VÝPOČET KAPACITY

Pro výpočet potřebné kapacity baterie na jedno nabití je nutné zjistit, jak velkou tažnou sílu, resp. práci musí elektromotory vykonat pro ujetí daného počtu kilometrů. Proti tažné síle vozidla působí hned několik jízdnicích odporů:

$$F_x = F_g \cdot \sin(\theta) + F_s + R_x + D_A \quad (1)$$

kde: F_xtažná síla [N]

F_gtíhová síla [N]

θúhel stoupání [°]

F_sd'Alembertova (setrvačná) síla [N]

R_xvalivý odpor [N]

D_Aaerodynamický odpor [N]

Tíhová síla vychází z celkové hmotnosti minibusu, ve které nejvíce figuruje hmotnost cestujících, dále pak hmotnost jednotlivých částí vozidla jako jsou podvozek, karoserie, elektromotory a samotná baterie. Průměrná hmotnost jednoho cestujícího byla stanovena na 75 kg, ostatní hmotnosti byly odhadnuty jako parametry pilotního výpočtu.

<i>Počet cestujících</i>	$l_p = 20$	
<i>Průměrná hmotnost cestujícího</i>	$m_{\xi} = 75 \text{ kg}$	
<i>Hmotnost cestujících</i>	$m_l = l_p \cdot m_{\xi} = 1\,500 \text{ kg}$	(2)
<i>Hmotnost karoserie</i>	$m_k = 800 \text{ kg}$	
<i>Hmotnost podvozku</i>	$m_p = 1000 \text{ kg}$	
<i>Hmotnost elektromotorů</i>	$m_e = 300 \text{ kg}$	
<i>Hmotnost baterie</i>	$m_b = 400 \text{ kg}$	
<i>Celková hmotnost</i>	$m_c = m_l + m_k + m_p + m_e + m_b = 4\,000 \text{ kg}$	(3)

Z celkové hmotnosti lze vypočítat tíhovou sílu pomocí gravitačního zrychlení ($g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$).

$$\text{Tíhová síla} \quad F_g = m_c \cdot g = 39\,230 \text{ N} \quad (4)$$

Setrvačná neboli d'Alembertova síla udává velikost síly potřebné k dosažení požadovaného zrychlení, přičemž komfortní zrychlení se pohybuje okolo $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ [4].

$$\begin{aligned} \text{Komfortní zrychlení} \quad a_x &= 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \\ \text{d'Alembertova síla} \quad F_s &= m_c \cdot a_x = 4\,000 \text{ N} \end{aligned} \quad (5)$$

Při odvalování pneumatik po vozovce vzniká tzv. valivý odpor, který závisí na velikosti přitlačné síly na kolo, rameni valivého odporu a poloměru kola. Přitlačná síla se rovná síle tíhové, jen působí v opačném směru jakožto reakce od vozovky. Rameno valivého odporu závisí na spoustě faktorech, jako jsou materiály a vlastnosti povrchů, tlak v pneumatikách, teplota, rychlost a další. Jeho orientační hodnoty však lze vyhledat v tabulkách podle materiálu styčných ploch, v tomto případě pneumatiky a asfaltové silnice [11]. Byla zvolena velikost pneumatik 215/60 R17, která určuje poloměr kola r_k .

$$\text{Přítlačná síla} \quad F_N = F_g = 39\,230 \text{ N} \quad (6)$$

$$\text{Rameno valivého odporu} \quad \xi = 0,0052 \text{ m}$$

$$\text{Poloměr kola} \quad r_k = 0,345 \text{ m}$$

$$\text{Valivý odpor} \quad R_x = F_N \cdot \frac{\xi}{r_k} = 591,2 \text{ N} \quad (7)$$

Proti pohybu vozidla působí vždy také odpor vzduchu neboli aerodynamický odpor, který závisí na koeficientu odporu vzduchu, čelní ploše vozidla, hustotě prostředí a rychlosti vozidla. Součinitel odporu vyjadřuje odpor předmětu (vozidla) v tekutém prostředí, závisí na jeho tvaru u určuje se experimentálně. V tomto případě byla jeho hodnota odhadnuta. Čelní plocha odpovídá velikosti plochy průmětu vozidla do roviny kolmé na směr pohybu, která byla přibližně vyčíslena z 3D modelu minibusu [5]. Hustotu prostředí představuje v tomto případě vzduch při normální teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Při výpočtu odporu vzduchu je uvažována maximální rychlost minibusu $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ převedená na $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

$$\text{Koeff. odporu vzduchu} \quad c_x = 0,5$$

$$\text{Čelní plocha vozidla} \quad S_x = 5,5 \text{ m}^2$$

$$\text{Hustota vzduchu při } 20 \text{ }^\circ\text{C} \quad \rho_v = 1,2047 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Max. rychlost vozidla

$$v_{max} = 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} = 16,667 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Aerodynamický odpor

$$D_A = \frac{1}{2} \cdot c_x \cdot S_x \cdot \rho_v \cdot v_{max}^2 = 460,1 \text{ N} \quad (8)$$

Když jsou známy velikosti všech jízdních odporů, lze vypočítat velikost tažné síly a s pomocí dráhy i práci. Při jízdě po reálné silnici zde ale působí také různé jízdní stavy jako jsou jízda do kopce, akcelerace, brzdění apod., proto je potřeba provést analýzu trasy minibusu.



Obr. 14 Trasa minibusu [12]

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, minibus operuje v rámci kampusu VUT a jeho trasa vede z kolejí Pod Palackého vrchem, kolem Fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií až k Fakultě strojního inženýrství a zpět (obr. 14). Po rozdělení trasy o celkové délce 930 m na úseky podle profilu vozovky a jízdních situací je možné pro každý z nich vypočítat práci, kterou lze nakonec jednoduše sečíst a získat tak její celkovou hodnotu. Na úsecích, kde dochází k brzdění nebo jízdě z kopce je práce záporná, a dala by se tak využít pro rekuperaci, v tomto případě jsou však uvažovány jako nulové.

Celková práce

$$W_c = \sum_{i=1}^{18} W_i = 2,135 \text{ MJ} \quad (9)$$

Na dané trase bude minibus jezdit v časech 7.45–12.45 a 13.00–18.00 hod., kdy každý interval představuje 5 hodin provozu. Jedna jízda trvá cca 3 minuty, poté minibus čeká na konečné zastávce 5 minut, to znamená, že v daném časovém rozmezí celkem stihne asi 37 jízd. Následně musí zajet na výměnné stanoviště a baterii vyměnit. Dojezd baterie při plném zatížení bez rekuperace brzděné energie tak činí 34,41 km.

Provozní doba 7.45–12.45; 13.00–18.00

$$t_p = 5 \text{ h}$$

Doba jedné jízdy $t_j = 3 \text{ min}$

Doba čekání $t_{\check{c}} = 5 \text{ min}$

Celková doba jedné jízdy $t_c = t_j + t_{\check{c}} = 8 \text{ min}$ (10)

Počet jízd $j = \frac{t_p \cdot 60}{t_c} = 37,5 \Rightarrow 37$ (11)

Délka trasy $s = 930 \text{ m}$

Dojezd minibusu $d_m = j \cdot s = 34,41 \text{ km}$ (12)

Nyní se vynásobením celkové práce a počtu jízd získá potřebná energie v joulech a převedením také potřebná minimální kapacita baterie ve watthodinách.

Potřebná energie $E = W_c \cdot j = 79 \text{ MJ}$ (13)

$$1 \text{ Wh} = 3\,600 \text{ J}$$

Minimální kapacita baterie v Wh $C_{bWh} = \frac{E}{3\,600} = \frac{79 \cdot 10^6}{3\,600} = 21,94 \text{ kWh}$ (14)

Pro sestavení bateriového bloku byl vybrán výkonný LiFePO_4 článek WB-LYP400AHA od firmy Winston Battery s kapacitou 400 Ah (obr. 15).



Winston LYP400AHA

Hmotnost:	13,5 kg
Výška:	285 mm
Šířka:	461 mm
Hloubka:	65 mm
Jmenovité napětí:	3,2 V
Kapacita:	400 Ah

Obr. 15 Bateriový článek s parametry (upraveno) [13]

Minimální kapacita baterie v Ah se pak vypočítá vydělením stejné veličiny ve Wh a jmenovitého napětí baterie.

$$\text{Jmenovité napětí baterie} \quad U_j = 3,2 \text{ V}$$

$$\text{Minimální kapacita baterie v Ah} \quad C_{bAh} = \frac{C_{bWh}}{U_j} = 6,858 \text{ kAh} \quad (15)$$

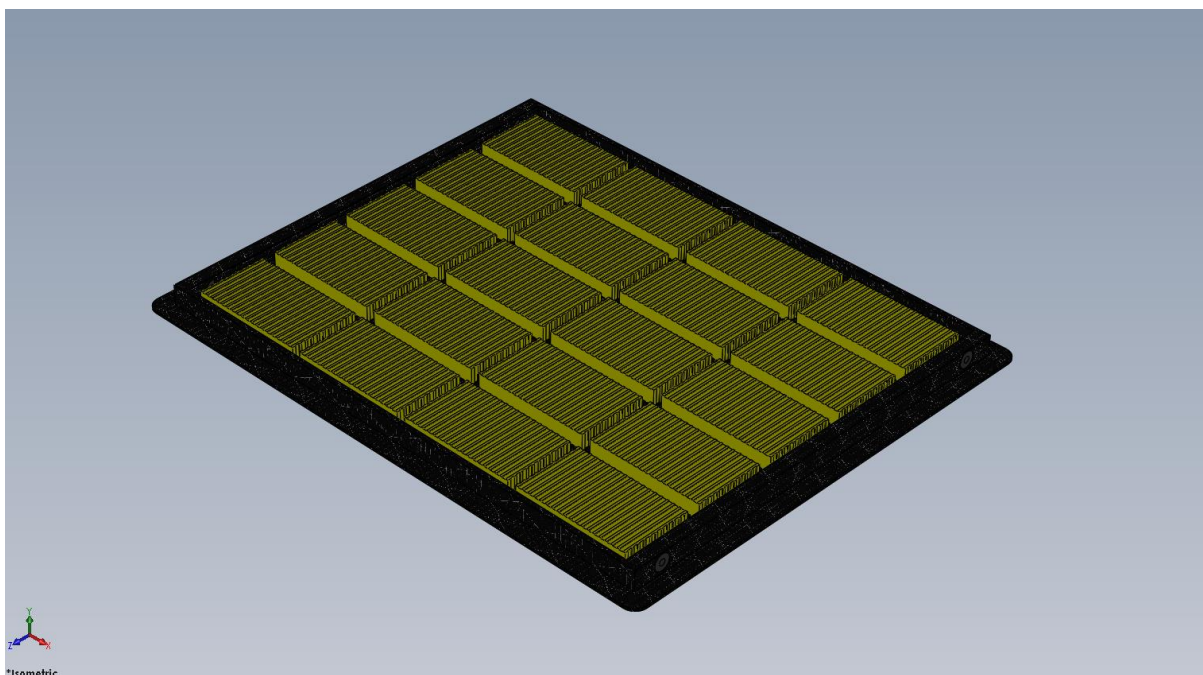
Na závěr zbývá zjistit, kolik článků musí baterie obsahovat.

$$\text{Kapacita jednoho článku} \quad C_{\xi} = 400 \text{ Ah}$$

$$\text{Minimální počet článků baterie} \quad B_{min} = \frac{C_{bAh}}{C_{\xi}} = 17,144 \Rightarrow 18 \quad (16)$$

3.2 NÁVRH KONSTRUKCE

Podle výpočtu kapacity baterie z předchozí podkapitoly je potřeba alespoň 18 článků Winston LYP400AHA pro samotný pohon minibusu bez využití rekuperace. Jelikož však baterie napájí také systémy řízení, brzdění, osvětlení, vytápění, obsluhu dveří a další elektrická zařízení minibusu, byla navržena kompaktní konstrukce bateriového bloku s podélným uspořádáním 20 článků v rozložení 5 x 4 uzavřené v bateriové skříni s uhlíkových vláken (obr. 16). Jednotlivé články jsou mezi sebou paralelně propojeny pro zachování jmenovitého napětí a sumaci jejich kapacity. Celý obvod je pak vyveden na kontakty baterie, které zajišťují její propojení s palubní sítí minibusu. Čtyři otvory s pryžovými vložkami na čelních stranách baterie slouží k jejímu uchycení k rámu pomocí aktuátorů.



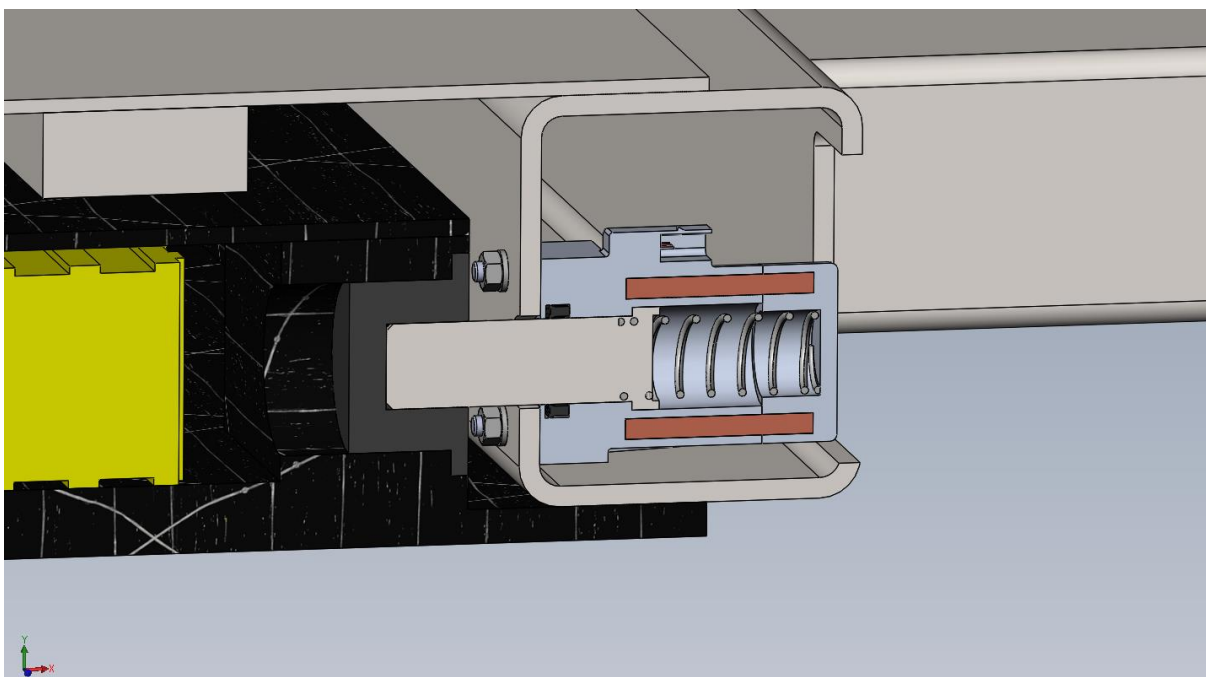
Obr. 16 Konstrukce bateriového bloku (bez víka)

Výsledná kapacita baterie

$$C_{bv} = 20 \cdot C_c \cdot U_j = 25,6 \text{ kWh} \quad (17)$$

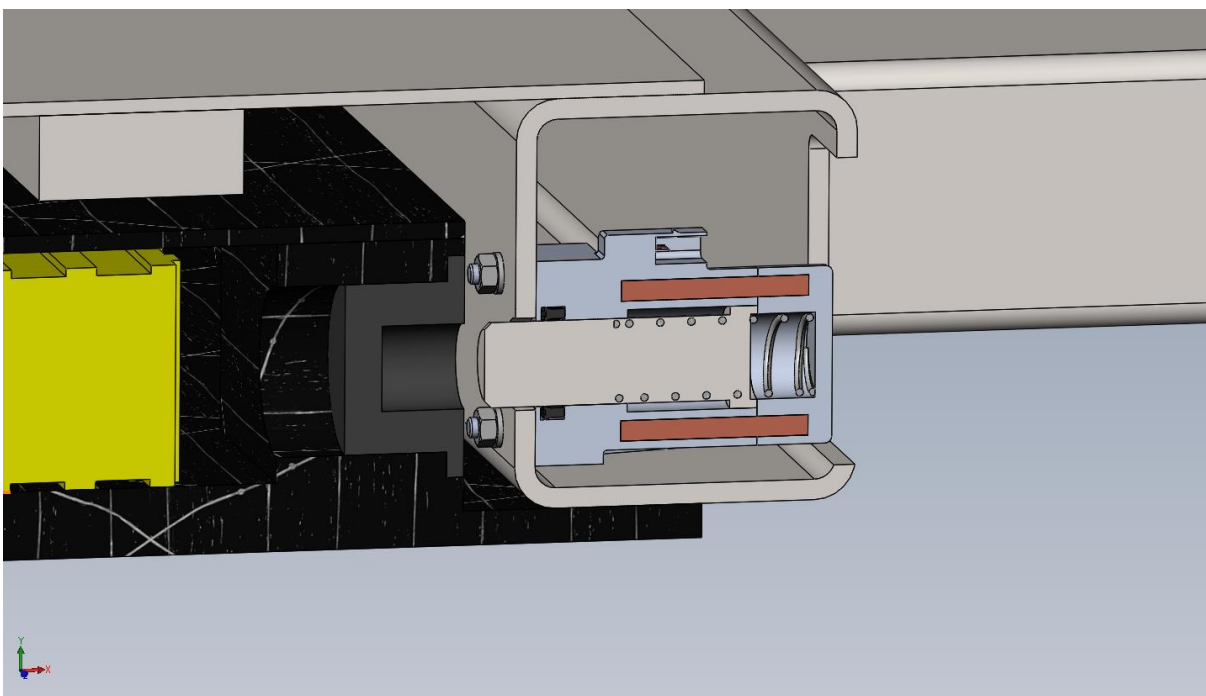
3.3 NÁVRH UCHYCENÍ K RÁMU

Celý bateriový blok nesou čtyři elektromagneticky ovládané aktuátory, každý z nich je uchycen k podvozkovému rámu pomocí čtyř šroubů velikosti M6 uvnitř příčných profilů (obr. 17). Kolíky aktuátorů zajišťují spolu s pryžovými vložkami bateriové skříně pružné uložení baterie, které eliminuje přenos vibrací a deformací z rámu na baterii a zároveň zabraňuje jejímu pohybu během provozu. V době, kdy není napájeno vinutí elektromagnetu, je kolík ve vysunuté poloze udržován pomocí pružina uložené uvnitř aktuátoru. Zasunutí kolíku provádí elektromagnetická síla řízená signálem z řídicí jednotky, která překoná sílu pružiny a dojde k jejímu stlačení. Doraz kolíku zabraňuje jeho vypadnutí z aktuátoru v případě poruchy, kdy není napájeno vinutí elektromagnetu a baterie není nainstalována. Obr. 17 znázorňuje aktuátor v řezu, kde je pružina s kolíkem v kolizi, ve skutečnosti je však pružina předepnuta, aby stále tlačila kolík směrem do baterie.



Obr. 17 Aktuátor ve vysunuté poloze

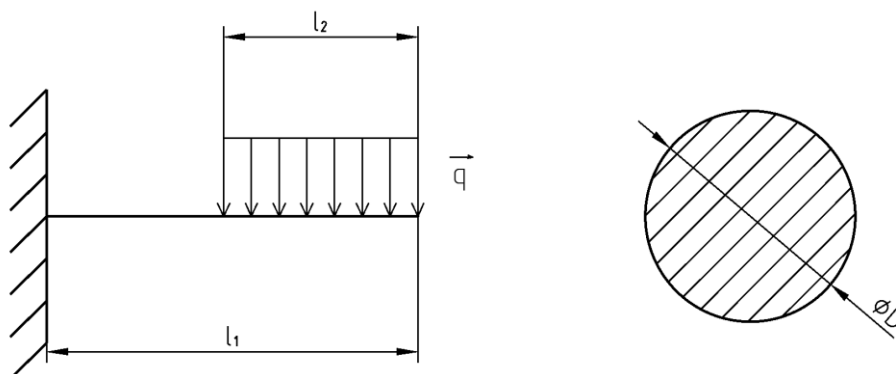
Na obr. 18 je zobrazen aktuátor s kolíkem v plně zasunuté poloze, kdy dosedne na doraz a pružina je maximálně stlačena (stlačení pružiny není zobrazeno).



Obr. 18 Aktuátor v zasunuté poloze

Jelikož je kolík aktuátoru velmi namáhanou součástí, která představuje jisté bezpečnostní riziko byla na něm provedena statická pevnostní analýza s kontrolou na ohyb a střih.

3.3.1 PEVNOSTNÍ ANALÝZA UCHYCENÍ



Obr. 19 Náčrt pevnostní analýzy

$$l_1 = 45,1 \text{ mm}$$

$$l_2 = 24,1 \text{ mm}$$

$$D = 25 \text{ mm}$$

Dovolené napětí (mez kluzu):

$$\sigma_d = 225 \text{ MPa}$$

Gravitační zrychlení:

$$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Hmotnost baterie připadající na jeden kolík:

$$m_{bk} = 100 \text{ kg}$$

Síla působící na kolík:

$$F_k = m_{bk} \cdot g = 981 \text{ N} \quad (18)$$

Spojité zatížení:

$$q = \frac{F_k}{l_2} = 40,7 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (19)$$

VÝPOČET OHYBOVÉHO NAPĚTÍ

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{q \cdot l_2 \cdot (l_1 - \frac{l_2}{2})}{\frac{\pi \cdot D^3}{32}} = \frac{40,7 \cdot 24,1 \cdot (45,1 - 12,05)}{\frac{\pi \cdot 25^3}{32}} = 21,13 \text{ MPa} \quad (20)$$

VÝPOČET NAPĚTÍ VE SMYKU

$$\tau_s = \frac{F_k}{S} = \frac{F_k}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} = \frac{981}{\frac{\pi \cdot 25^2}{4}} = 1,99 \text{ MPa} \quad (21)$$

VÝPOČET REDUKOVANÉHO NAPĚTÍ PODLE METODY HMH

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_o^2 + 3 \cdot \tau_s^2} = \sqrt{21,13^2 + 3 \cdot 1,99^2} = 21,41 \text{ MPa} \quad (22)$$

VÝPOČET BEZPEČNOSTI

$$k_k = \frac{\sigma_d}{\sigma_{red}} = \frac{225}{21,41} = 10,51 \quad (23)$$

3.4 PŘEDSTAVA ROBOTIZOVANÉ VÝMĚNY

Výměna baterie probíhá na výměnném stanovišti (obr. 20), kde minibus najde na přesně danou pozici na vyvýšených nájezdech a aktivuje parkovací brzdu. Robot s plošinou zajede pod minibus, pomocí čidel lokalizuje baterii a vysunutím plošiny nahoru ji podepře. Senzory minibusu detekují přítomnost plošiny, řídicí jednotka rozpozná úmysl vyjmout baterii a aktivuje aktuátory, které zasunou jistící kolíky a robot uvolní baterii spustí dolů. Aby byla palubní síť vozidla neustále napájena i během výměny baterie, je minibus vybaven malou separátní baterií. S naloženou baterií robot vyjede zpod minibusu a odveze ji do dobíjecí stanice, kde je připojena na nabíjení. Následně na plošinu naloží již nabitou baterii a inverzním způsobem, provede její instalaci do vozidla. Jakmile senzory zaznamenají správnou pozici baterie, vinutí aktuátorů přestane být napájeno, pružiny zatlačí kolíky do pryžových vložek bateriového bloku, robot spustí plošinu, vyjede zpod minibusu a vrátí se do své dokovací stanice. Minibus deaktivuje parkovací brzdu, sjede z plošiny a může s plně nabitou baterií pokračovat v cestě.



Obr. 20 Ukázka výměnného stanoviště [36]

4 PODVOZKOVÝ RÁM

Podvozkový rám mezi sebou spojuje nápravy a tvoří nosný prvek pro karoserii, hnací skupinu, cestující a v případě elektromobilu i baterii. Tíhu všech těchto položek přenáší na nápravy. Jeho úkolem je přenášet také hnací, brzdné a suvné síly mezi nápravami a karoserií. Musí být dostatečně pružný, tuhý a pevný, aby vydržel namáhání krutem i ohybem při různých jízdních stavech a zatíženích. Zároveň by měl být v rámci možností lehký [3].

Elektrické minibusy používají nejčastěji obvodový neboli perimetrický rám se dvěma podélníky rozšířenými na šířku karoserie, které jsou spojené několika příčkami. Výhoda této konstrukce spočívá v maximálním prostoru mezi podélníky pro uložení baterie pod podlahu vozidla. V oblasti náprav je rám zúžen nebo vyhnut směrem nahoru kvůli uvolnění prostoru pro nápravy. V případě, kdy je hnaná pouze jedna náprava může být baterie umístěna mezi koly druhé nehnané nápravy případně nad ní a lze použít jednodušší obdélníkový rám namísto obvodového. Baterie může být také uložena na střeše jako u některých elektrických autobusů, ale pro zachování nízké polohy těžiště a lepší jízdní stability je výhodnější umístění baterií ve spodní polovině vozidla.

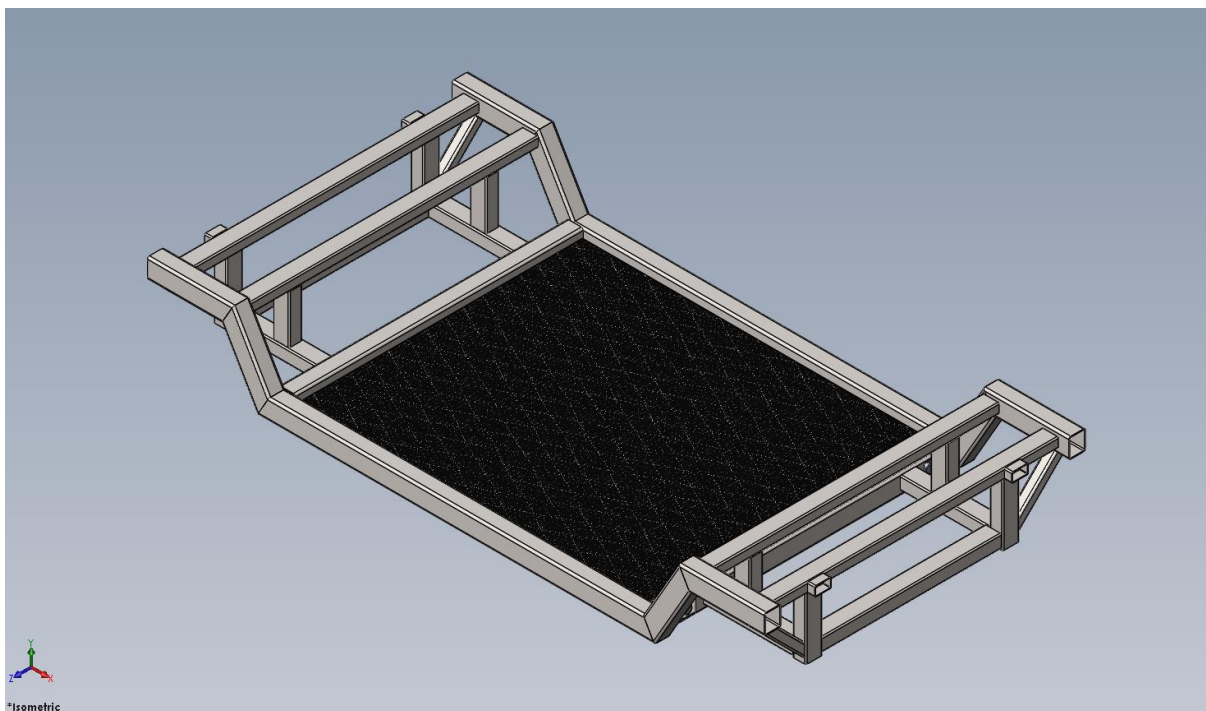


Obr. 21 Obvodový rám [38]

4.1 KONSTRUKCE

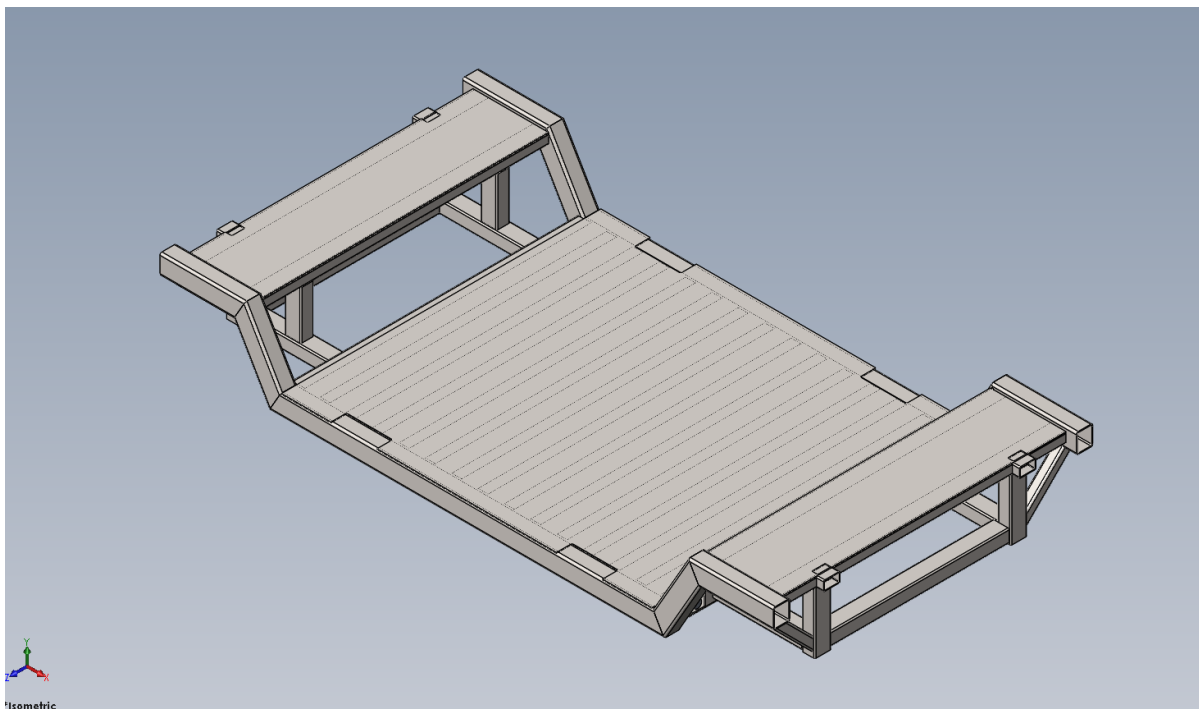
Před návrhem konstrukce podvozkového rámu bylo nejprve potřeba si načrtnout jeho základní tvar a odhadnout celkové rozměry s ohledem na maximální povolenou šířku pro daný typ vozidla, přepravní kapacitu, provozní podmínky, velikost bateriového bloku a nakonec dostatečnou tuhost. Podobně jako u jiných dnešních elektrických minibusů byl vybrán obvodový typ rámu zejména kvůli umístění baterie. Pro 3D modelování byl zvolen software Solidworks 2017.

Rozměry bateriového bloku tvořily výchozí parametry při navrhování podvozkového rámu, jelikož zabírá téměř celý prostor pod podlahou minibusu. Kolem něj byla tedy vytvořena rámová konstrukce, kterou tvoří svařenec z uzavřených profilů obdélníkového a čtvercového průřezu (obr. 22). Profily byly většinou orientovány tak, aby měly větší tuhost při zatěžování ve svislém směru. Mezi baterií a rámem byla vymezena dostatečná minimální mezera pro její snadnou výměnu a uchycení. V přední a zadní části podvozku byly přidány pomocné rámy pro uchycení pohonu a náprav.



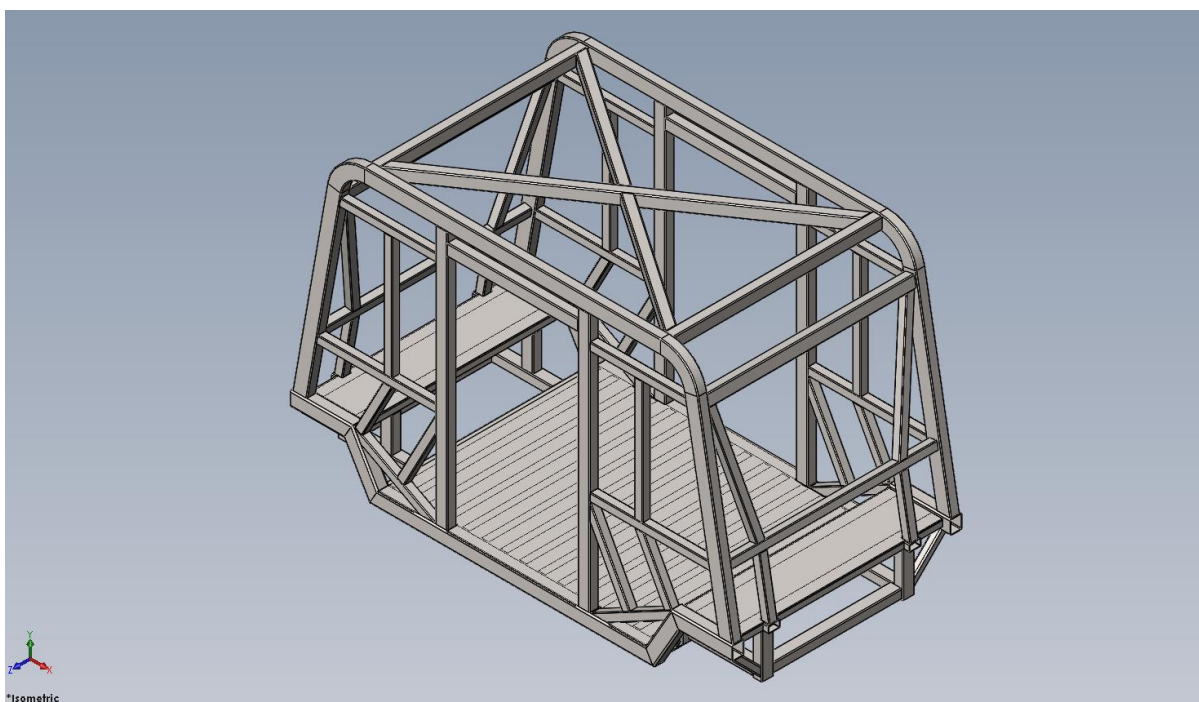
Obr. 22 První návrh konstrukce podvozkového rámu

Aby bylo možné simulovat plošné zatížení od tíhy cestujících byl rám doplněn o plechovou podlahu a plechy nad nápravami, ke kterým budou připevněna sedadla (obr. 24). Tloušťka všech plechů je 4 mm a podlaha byla navíc za účelem snížení průhybu zesílena pásovinami ze spodní strany o průřezu viz tab. 1.



Obr. 24 Druhý návrh konstrukce podvozkového rámu

Pro zlepšení tuhosti konstrukce byl vymodelován také vrchní rám karoserie a přidán k podvozkovému rámu (obr. 23). Při jeho navrhování byl brán ohled zejména na torzní tuhost, proto obsahuje několik diagonálně orientovaných profilů, které dokážou torzní namáhání zachycovat. Z důvodu symetrie budou dveře umístěny na obou stranách a okna po celém obvodu karoserie. Čelní plochy karoserie byly mírně skloněny pro snížení aerodynamického odporu. V přílohách této práce lze najít výslednou konstrukci zobrazenou ve více pohledech a součástí je také výkres sestavení formátu A2 s celkovými rozměry a polohou těžiště.

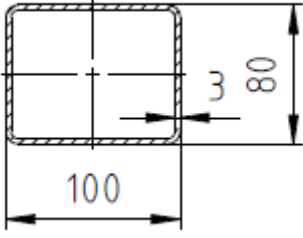
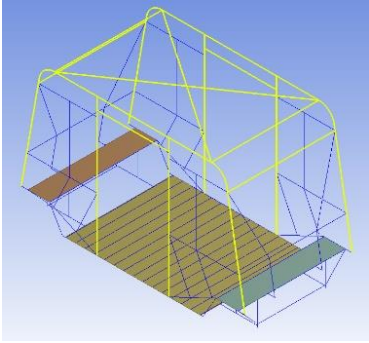
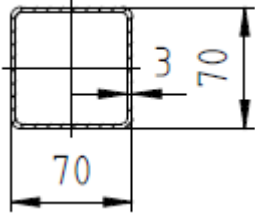
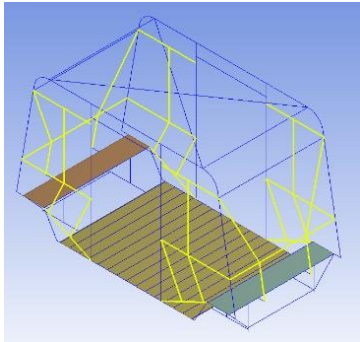
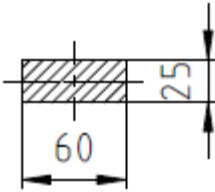
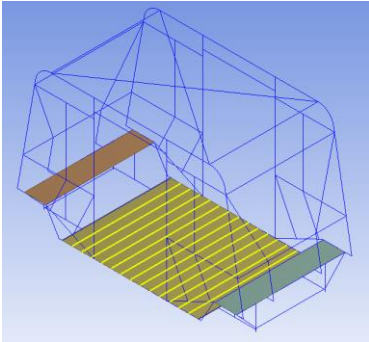


Obr. 23 Finální návrh konstrukce podvozkového rámu

Tab. 1 znázorňuje průřezy jednotlivých profilů a jejich použití v konstrukci je v prutovém modelu zvýrazněno žlutou barvou:

Tab. 1 Seznam použitých profilů

Číslo profilu	Průřez	Použití
1.		
2.		
3.		
4.		

5.		
6.		
7.		

4.2 STATICKÁ PEVNOSTNÍ ANALÝZA

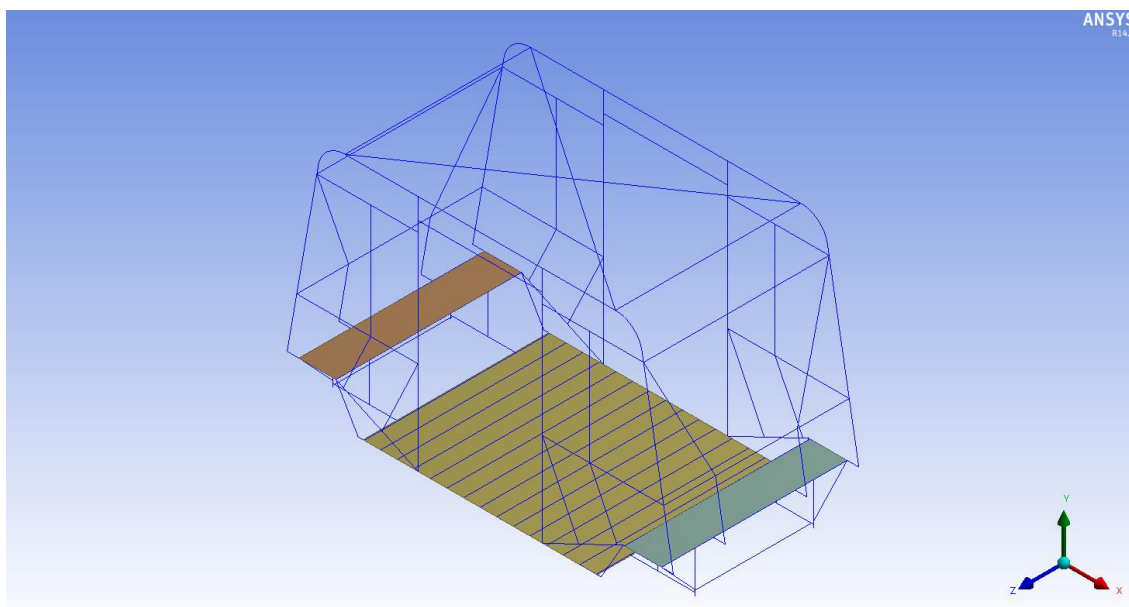
Pro ověření dostatečné tuhosti navržené konstrukce bylo nutné provést statickou pevnostní analýzu při plném zatížení metodou konečných prvků (MKP). Pro tento účel byl vybrán program Ansys Workbench 14.5. Nepsaným pravidlem je, že vynásobením statického zatížení faktorem 2 až 3 lze přibližně určit vliv zatížení dynamického [2]. Takže i když se jedná o statickou analýzu, je možné z jejich výsledků posoudit, zda bude konstrukce pevnostně vyhovovat také při dynamickém zatěžování.

4.2.1 VOLBA MATERIÁLU

Ještě před modelováním geometrie je potřeba zvolit vhodný materiál příp. materiály, ze kterých bude konstrukce vyrobena a zadat jejich mechanické parametry do knihovny materiálů programu Ansys. Pro tento případ se hodí dobře svařitelná nelegovaná konstrukční ocel S355J2 (ČSN 11 503) s mezí kluzu 355 MPa a mezí pevnosti v tahu 630 MPa [20].

4.2.2 MODELOVÁNÍ GEOMETRIE

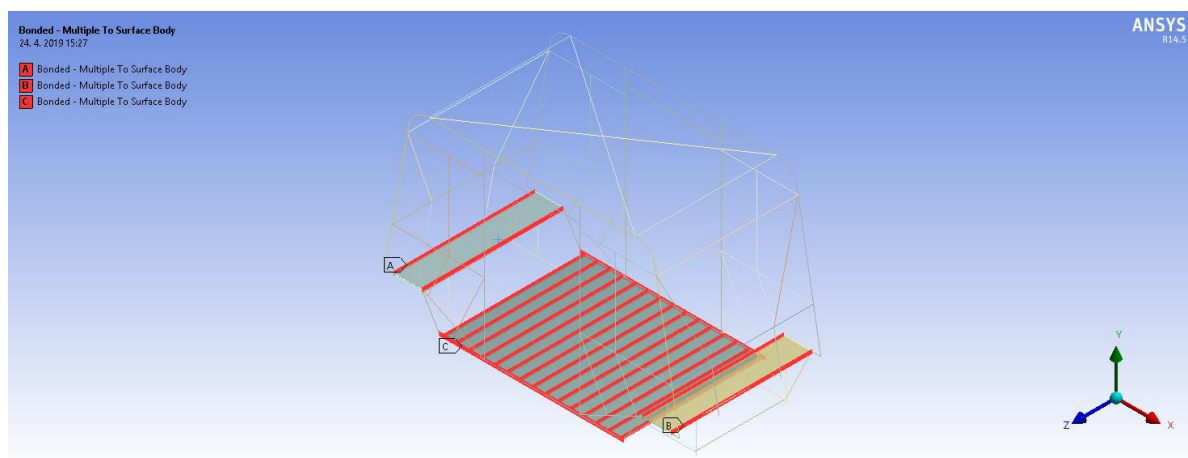
Analýza navrženého 3D modelu by byla s ohledem na velikost sestavy a příliš velkého počtu prvků velmi časově náročná. Proto byla geometrie konstrukce vymodelována pomocí tzv. metody „line body“ (obr. 25), ta nahrazuje skutečné profily jejich střednicemi, kterým je následně přiřazen průřez. Analogicky se postupuje u ploch, kterým se po definování tvaru pouze zadá tloušťka.



Obr. 25 Geometrie modelu

4.2.3 DEFINOVÁNÍ KONTAKTŮ

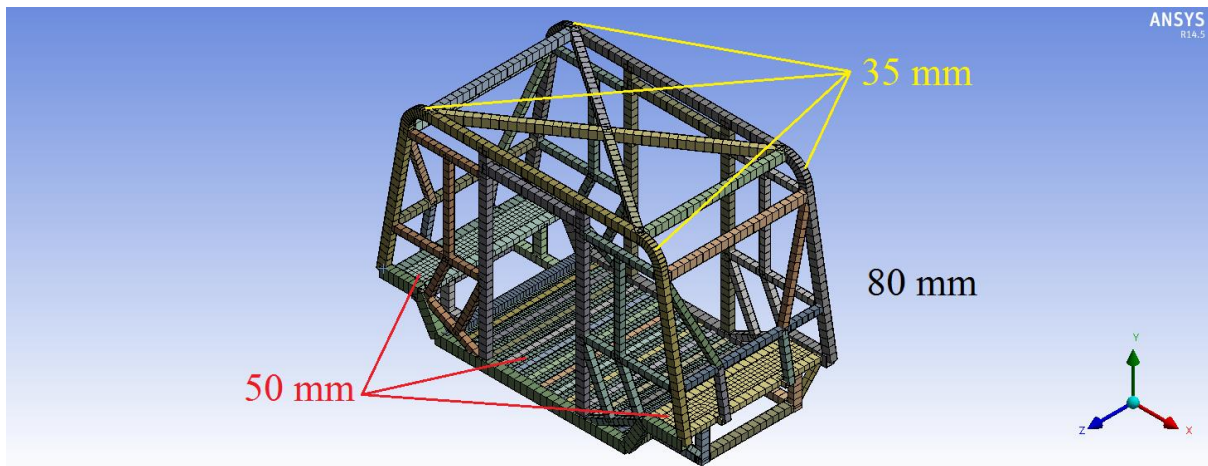
Protože se jedná o jeden velký svařenec jsou spoje jednotlivých střednic automaticky definovány jako pevné. Oproti tomu plochy musí být se střednicemi svázané pomocí funkce „kontakty“, kde lze také zvolit, jestli plocha leží na profilu nebo pod ním. Podlaha vyztužená pásovinami je přivařena k podvozkovému rámu stejně jako plechy pod sedadly. Svarové spoje tak byly nahrazeny pevnými vazbami (obr. 26).



Obr. 26 Definované kontakty

4.2.4 DISKRETIZACE

Diskretizaci lze definovat jako rozdělení spojitého modelu na konečný počet prvků, přičemž jsou zjišťované parametry určovány v jednotlivých uzlových bodech. Princip určení velikosti prvků spočívá v jejich postupném zmenšování až do okamžiku, kdy už se výsledné hodnoty příliš nemění. Většinou se proto volí menší prvky v kritických místech nebo v oblastech největšího zájmu pro zpřesnění výsledků. Tímto postupem byla definována velikost prvku na celém modelu 80 mm se zjemněním pro plochy na 50 mm a v místě ohnutí nosníků horní konstrukce na 35 mm (obr. 27).



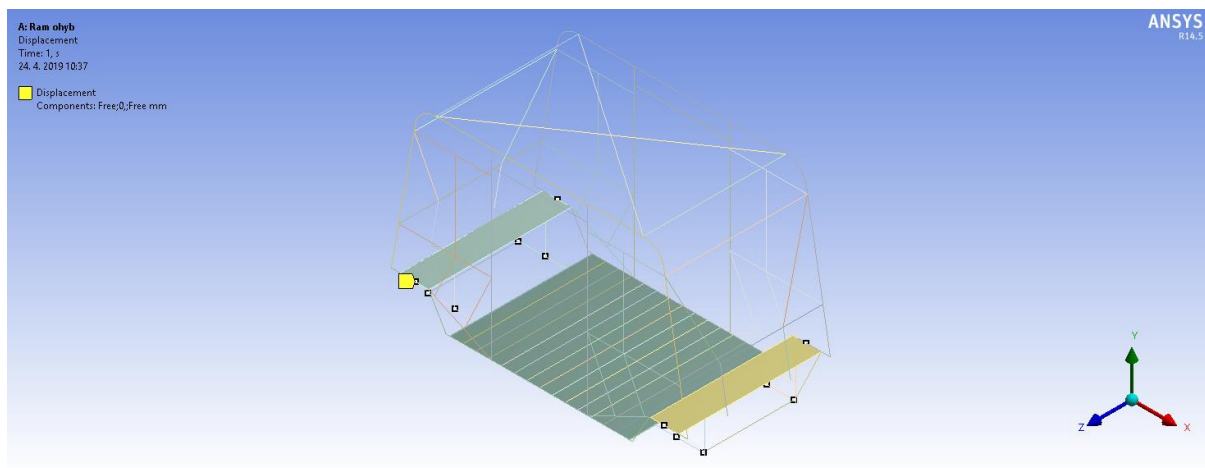
Obr. 27 Diskretizace modelu s různou velikostí prvků

4.2.5 ZADÁNÍ OKRAJOVÝCH PODMÍNEK

Posledním krokem před spuštěním výpočtu bylo stanovení okrajových podmínek, které zahrnují vazby a zatížení tělesa. V případě rámu minibusu byly všechny vazby definovány v bodech zavěšení, jelikož zachycují veškeré síly mezi rámem a nápravami. Zatížení představují většinou pouze tíhové síly, které na rám působí při plné obsazenosti minibusu a pochopitelně směřují dolů.

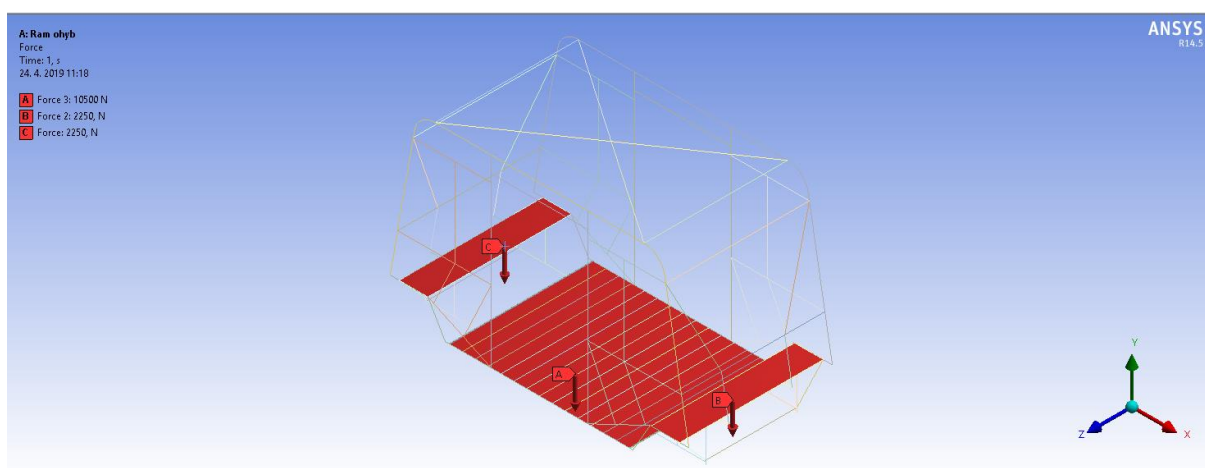
NAMÁHÁNÍ NA OHYB

U kontroly na ohyb byl zamezen posuv ve směru osy y ve všech bodech zavěšení, takže působí jako podpora. Každé kolo je zavěšeno na 3 bodech, kdy spodní dva body na pomocném rámu nesou rameno nápravy a horní bod na rámu podvozku slouží pro uchycení tlumiče pérování s odpružením (obr. 28).



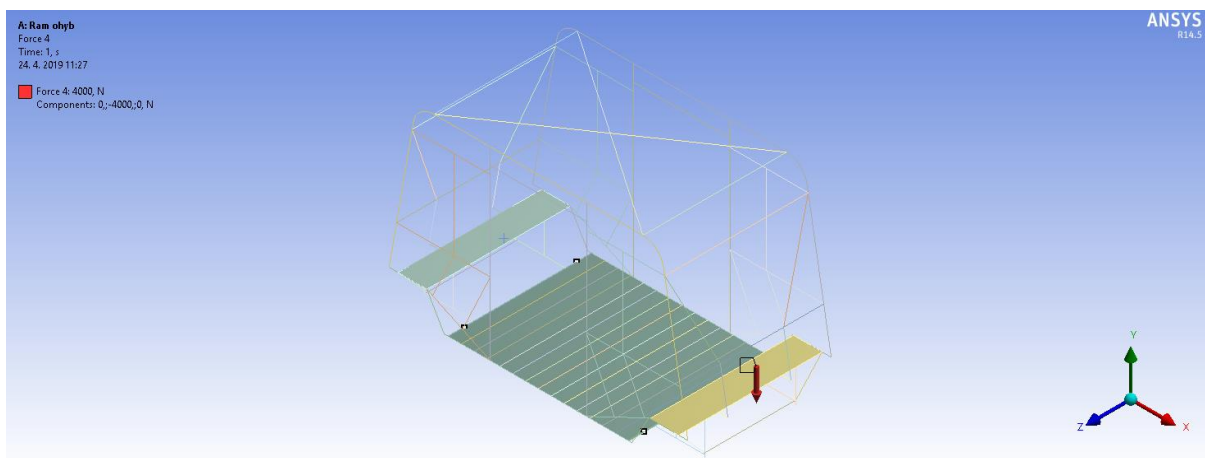
Obr. 28 Vazby modelu při námáhání na ohyb

Největší složku zatížení tvoří váha lidí uvnitř minibusu, kdy 14 stojících cestujících působí svou vahou na podlahu, zatímco 6 sedících cestujících zatěžují plechy pod sedadly. V obou případech se tedy jedná o plošné zatížení. Jak již bylo uvedeno ve výpočtu kapacity baterie, průměrná hmotnost jednoho člověka byla stanovena na 75 kg. Při definování jednotlivých zatížení bylo gravitační zrychlení pro jednoduchost zaokrouhleno na $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Po přepočítání tak na podlahu působí plošná síla 10 500 N a na každý z plechů 2 250 N (obr. 29).



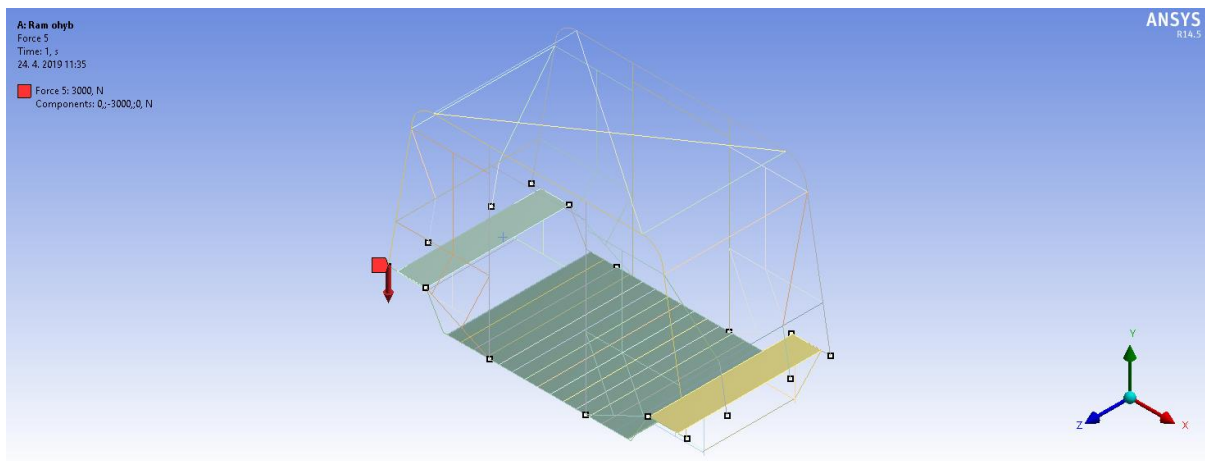
Obr. 29 Zatížení modelu vlivem hmotnosti cestujících

Dále na rám působí tíha baterie, kterou drží aktuátory připevněné k rámu. Působíště této tíhové síly je ve čtyřech bodech v místě uchycení aktuátorů. Hmotnost baterie byla s ohledem na hmotnost jejích článků odhadnuta na 400 kg, takže síla má hodnotu 4000 N (obr. 30).



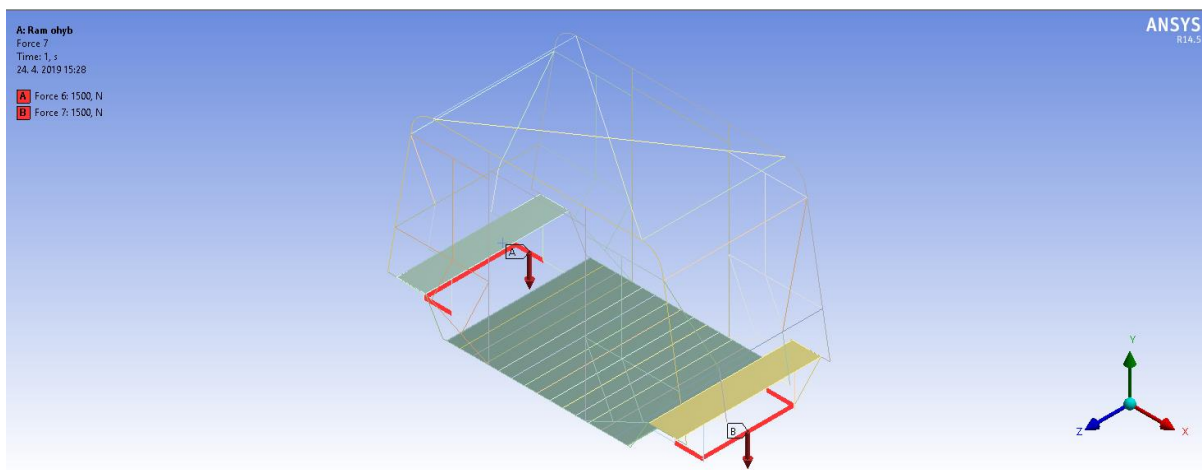
Obr. 30 Zatížení modelu vlivem hmotnosti baterie

Na horním rámu konstrukce chybí karoserie včetně oken, dveří, střechy apod. Celková hmotnost těchto komponent byla odhadnuta na 300 kg, proto musí být tento přírůstek nějakým způsobem zahrnut do pevnostní analýzy. Působíště tomu odpovídající síly 3 000 N leží v bodech, kde se horní rám spojuje s podvozkovým rámem (obr. 31).



Obr. 31 Zatížení modelu vlivem hmotnosti karoserie

Zbývající položkou zatížení podvozkového rámu jsou dva elektromotory umístěné mezi koly na pomocných rámech. Odhadovaná hmotnost jednoho elektromotoru činí 150 kg, takže na každý pomocný rám působí síla 1 500 N (obr. 32).

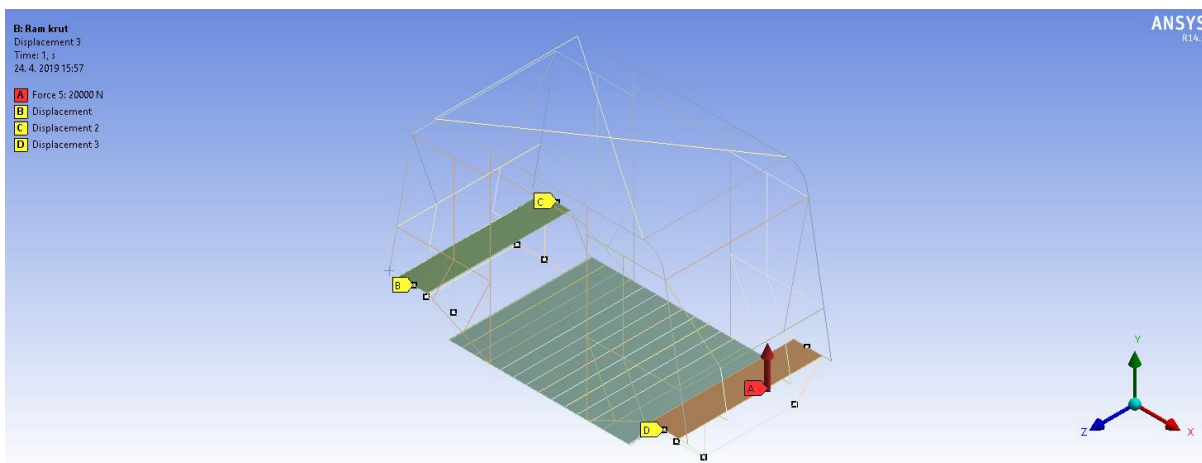


Obr. 32 Zatížení modelu vlivem hmotnosti elektromotorů

NAMÁHÁNÍ NA KRUT

Hmotnostní zatížení jsou stejná, jako byla popsána u namáhání na ohyb. Mění se pouze definice vazeb v jednotlivých místech zavěšení, přičemž v jednom z nich byla vazba nahrazena silou (tab. 2). Konstrukce je tak kromě ohybu namáhána také na krut. Vazby jsou určeny tak, aby měl rám částečnou volnost a mohl se při zatěžování deformovat ve směru osy x a z . Síla působící v kladném směru osy y má velikost 20 000 N, což po přepočítání odpovídá 50 % celkové hmotnosti minibusu a simuluje například najetí kola na obrubník, které má za následek torzní namáhání konstrukce.

Tab. 2 Definice vazeb a zatížení modelu při namáhání na krut



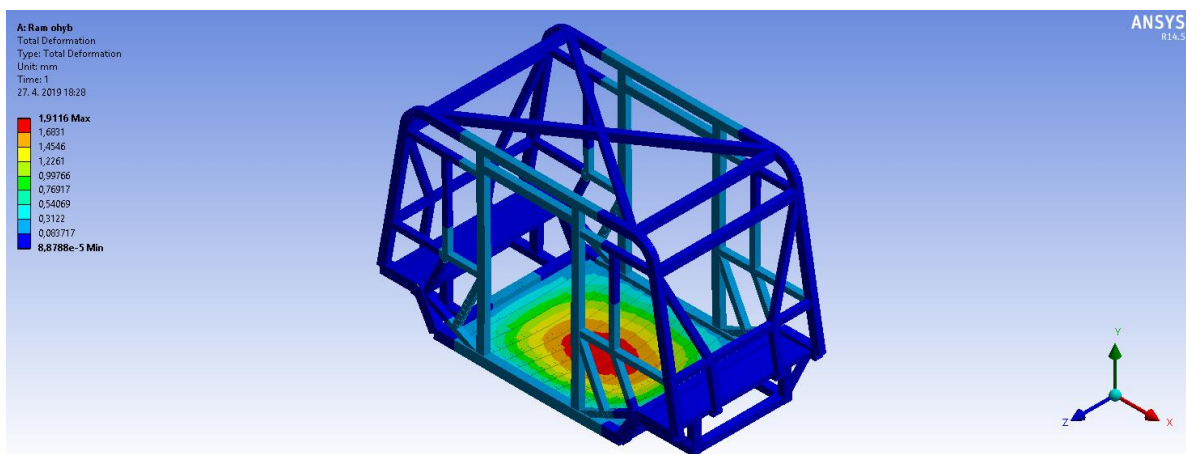
Pozice	Osa		
	x	y	z
A	-	20 000 N	-
B	0	0	0
C	0	0	-
D	-	0	0

4.2.6 VÝSLEDKY

Výstupem této statické pevnostní analýzy jsou hodnoty maximální deformace a maximálního napětí na zatěžované konstrukci, které nesmí překročit určité meze. Maximální dovolená hodnota deformace je subjektivní a vždy závisí na konkrétním případě. S ohledem na určitou pružnost materiálů a velikost spár mezi částmi karoserie byla v tomto případě stanovena na 3 mm. Limitní hodnotu napětí tvoří mez kluzu materiálu, kdy po jejím překročení dochází k nevratné plastické deformaci. Celá konstrukce je vyrobena z konstrukční oceli S355J2, která má mez kluzu 355 MPa.

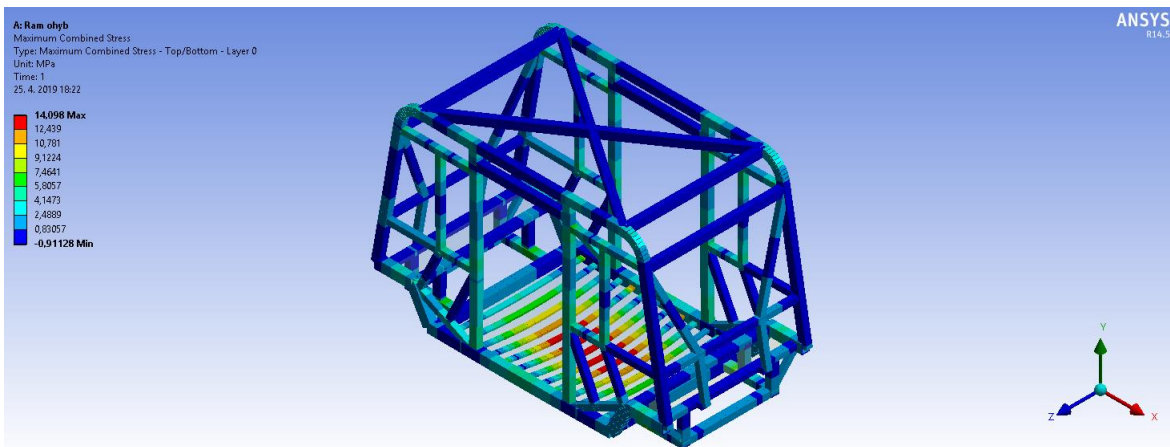
NAMÁHÁNÍ NA OHYB

Jak se předpokládalo, největší průhyb se nachází ve středu podlahy, která se deformuje pod vahou stojících cestujících (obr. 33). Díky vyztužení podlahy není tato deformace příliš velká a dosahuje pouze 1,91 mm. Od tohoto místa se průhyb zmenšuje a na podvozkovém rámu má hodnotu zanedbatelných cca 0,19 mm ve středu podélných nosníků.



Obr. 33 Deformace při námáhání na ohyb

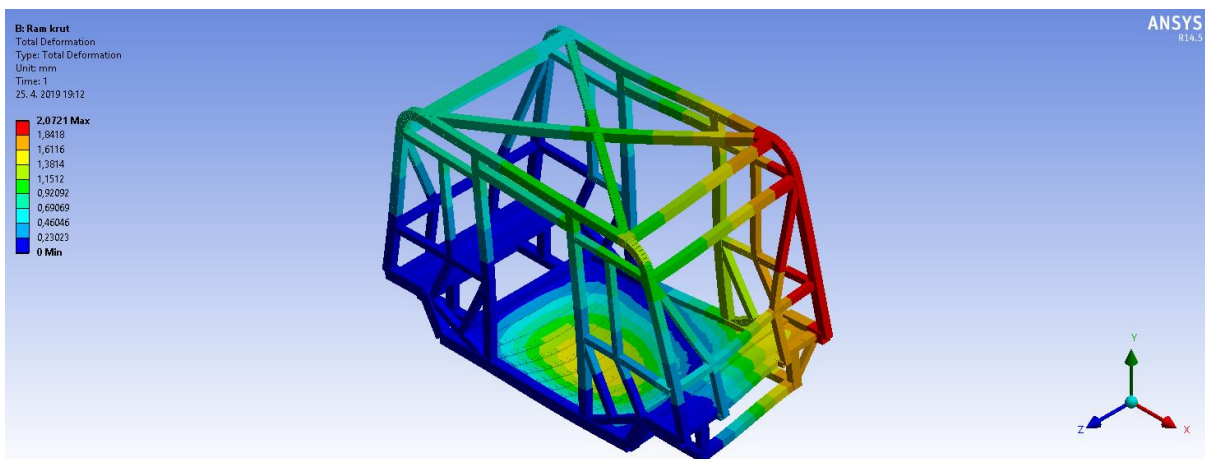
V místě maximálního průhybu je také maximální napětí o velikosti 14,01 MPa, tedy hluboko pod mezí kluzu (obr. 34). Co se týče samotného podvozkového rámu, největší napětí o velikosti 7,8 MPa se nachází v místě uchycení ramen.



Obr. 34 Napětí při namáhání na ohyb

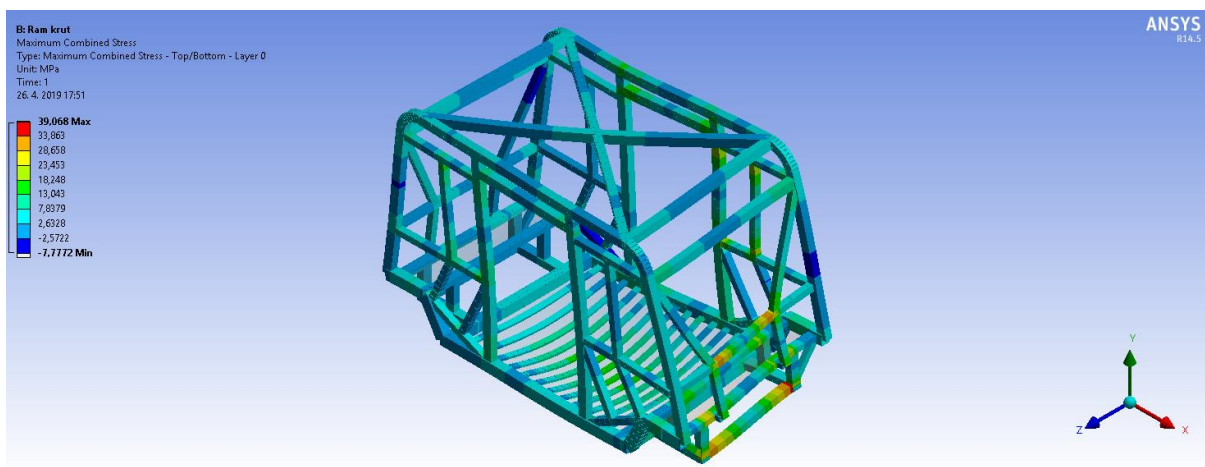
NAMÁHÁNÍ NA KRUT

Jak působí síla v zavěšení jednoho kola, přenáší se deformace konstrukcí v blízkosti této oblasti až na rám karoserie a největší hodnoty 2,07 mm dosahuje v jeho nejvyšším bodě (obr. 35). Průhyb podlahy se oproti namáhání pouze na ohyb zmenšil a podle barevné škály se pohybuje okolo 1,5 mm.



Obr. 35 Deformace při namáhání na krut

Nejvíce namáhanou částí je však pomocný rám, na jehož příčný nosník působí maximální napětí 39,07 MPa (obr. 36).



Obr. 36 Napětí při namáhání na krut

SROVNÁNÍ

První a druhý návrh byly také podrobeny statické pevnostní analýze s patřičnými úpravami hodnot zatížení s ohledem na chybějící části. Pro srovnání byly vytvořeny tabulky maximálních deformací a napětí u jednotlivých návrhů jak při namáhání na ohyb (tab. 3), tak v případě namáhání na krut (tab. 4).

Pokud se jedná o ohyb, nejmenší deformace dosahuje první návrh, jelikož nemá podlahu a plechy pod sedadly, které se pod tíhou cestujících prohýbají více než profily. Maximální deformace u druhého návrhu to jasně dokazuje. Přidáním rámu karoserie u finálního návrhu se konstrukce zpevnila a došlo ke snížení deformace. Hodnota maximálního napětí s postupným vývojem konstrukce klesá, přičemž u prvního návrhu se jeho maximum nachází na pomocném rámu, kdežto u dalších dvou je ve středu podlahy.

Tab. 3 Porovnání výsledků u namáhání na ohyb

	Maximální deformace [mm]	Maximální napětí [MPa]
První návrh	0,84	15,0
Druhý návrh	2,42	14,3
Finální návrh	1,91	14,1

U krutu došlo k mírnému navýšení maximální deformace i napětí u druhého návrhu kvůli většímu rozložení váhy cestujících na plochy. Síla působící v místě jednoho kola tak namáhá rám více než u prvního návrhu. Výrazného zlepšení však dosáhl finální návrh, u kterého se podařilo snížit hodnoty obou veličin téměř na polovinu oproti druhému návrhu.

Tab. 4 Porovnání výsledků u námáhání na krut

	Maximální deformace [mm]	Maximální napětí [MPa]
První návrh	3,63	72,3
Druhý návrh	4,03	72,7
Finální návrh	2,07	39,1

Z výsledků statické pevnostní analýzy je patrné, že dané limity maximální deformace a napětí nebyly překročeny ani při ohybovém, ani při torzním namáhání.

ZÁVĚR

Na základě současného stavu poznání představeného v úvodní části práce byly provedeny základní výpočty potřebného bateriového bloku, návrh jeho uchycení k podvozkovému rámu a řešení robotizované výměny. Následně byla navržena konstrukce symetrického podvozkového rámu minibusu a ověřena statickými pevnostními výpočty.

Klíčovým parametrem bateriového bloku je jeho kapacita, přesněji počet bateriových článků o určité kapacitě. Pro určení potřebné kapacity bylo nutné vypočítat práci, kterou musí elektrický minibus vykonat během svého provozu na dané trase. Proto byly vypočítány všechny jízdní odpory působící během jízdy proti pohybu, které bylo nutné aplikovat na jízdu po reálné trase. Jelikož má minibus sloužit hlavně studentům v rámci univerzitního kampusu, byla vybrána trasa od kolejí Pod Palackého vrchem přes zastávku Podnikatelská až k Fakultě strojního inženýrství a zpět. Byla provedena její analýza s ohledem na úhel sklonu vozovky a potřeby akcelerace a brzdění vozidla. Podle toho byla rozdělena na úseky s příslušnými jízdními odpory, ze kterých byla zjištěna tažná síla a po vynásobení s dráhou také práce. Součet prací na jednotlivých úsecích dal její celkovou hodnotu 2,135 MJ. Následným vynásobením počtem jízd a převedením jednotek byla získána minimální kapacita bateriového bloku 21,94 kWh. Tato hodnota byla poté vydělena jmenovitým napětím baterie pro určení minimální kapacity v ampérhodinách, která činí 6,858 kAh. Na závěr výpočtu zbývalo zjistit, kolik je potřeba článků bateriového bloku o kapacitě 400 Ah. Podíl vypočtené minimální kapacity a kapacity jednoho článku vedl k výsledku 18 potřebných článků bez využití rekuperace brzděné energie.

S ohledem na rozměry bateriového článku, vytvoření kompaktní konstrukce a zachování určité rezervy energie byl vymodelován bateriový blok s 20 články o celkové kapacitě 25,6 kWh, který bude umístěn pod podlahou minibusu, tak aby k němu byl snadný přístup a byl jednoduše vyměnitelný. Pro uchycení baterie k podvozkovému rámu byly navrženy čtyři elektrické aktuátory připevněné k rámu, které drží blok pomocí kolíků zasunutých v pryžových pouzdrech bateriové skříně. Návrh byl ověřen pevnostním výpočtem kolíků namáhaných na ohyb a stříh, jehož výsledkem byla vysoká bezpečnost 10,51. V závěru této kapitoly byl popsán postup automatické výměny bateriového bloku.

Podle rozměrů bateriového bloku byla navržena symetrická konstrukce obvodového rámu podobná současným elektrickým autobusům. Během návrhu bylo zohledněno umístění všech hlavních komponent, zejména bateriového bloku, elektromotorů a náprav. Na této jednoduché konstrukci byla provedena statická pevnostní analýza metodou konečných prvků v programu Ansys Workbench s ohledem na ohybovou a torzní tuhost. Sledujícími faktory byly v tomto případě redukováné napětí a celkové deformace. Limitní hodnotu v případě redukováného napětí představovala mez kluzu materiálu 355 MPa. Maximální dovolená deformace byla stanovena na 3 mm s ohledem na pružnost určitých materiálů a šířku spár mezi jednotlivými částmi karoserie. V průběhu analýzy se ukázalo, že rozhodující veličinou bude maximální deformace při namáhání na kurt, jelikož ostatní napětí a deformace zdaleka nedosahovaly svých mezních hodnot. První návrh konstrukce dosahoval maximální deformace 3,63 mm, tedy více než povoloval daný limit, proto byla konstrukce upravena s cílem zlepšit její torzní tuhost. Po přidání plechů nad nápravy a ocelové podlahy s výztuhami, které umožňovaly reálnější simulaci zatížení od tíhy cestujících byla hodnota deformace 4,03 mm, tedy vyšší než u předchozího návrhu. Důvodem bylo větší rozložení hmotnosti cestujících na plochy plechů oproti prvnímu návrhu, kde tíha cestujících působila na nosníky. Nakonec tedy nezbyvalo nic jiného, než konstrukci doplnit o horní rám karoserie, který se ukázal jako stěžejní prvek torzní tuhosti celé konstrukce a s jeho pomocí se již podařilo maximální deformaci snížit na 2,07 mm.

Maximální redukované napětí při statickém zatížení 39,1 MPa u finálního návrhu představuje dostatečnou rezervu pro spolehlivost rámu z hlediska únavy při dynamickém zatěžování v reálném provozu.

Pro snížení hmotnosti konstrukce a s tím související navýšení dojezdu minibusu by bylo možné v rámci inovace použít pro některé části rámu lehčí materiál při zachování celkové tuhosti. Pro tento účel se nabízí některá ze slitin hliníku, jejichž nevýhodou ovšem je obtížná svařitelnost a vysoká cena. Na tuto práci mohou v budoucnu navázat návrhy ostatních komponentů minibusu, zejména náprav, elektromotorů, karoserie nebo bateriového bloku.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] BERETTA, Joseph. *Automotive electricity: electric drives*. Hoboken, NJ: J. Wiley, 2010, 304 s. ISBN 978-1-84821-095-0.
- [2] BARTON, David C a John D FIELDHOUSE. *Automotive chassis engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2018, xiii, 327 stran : ilustrace (převážně barevné). ISBN 978-3-319-72436-2.
- [3] JAN, Zdeněk, Bronislav ŽDÁNSKÝ a Jiří ČUPERA. *Automobily: Podvozky*. 2., aktualiz. vyd. Brno: Avid, 2009. ISBN 978-80-87143-11-7.
- [4] HLAVOVÁ, Vendula. *Měření jízdních manévřů vozidel hromadné přepravy osob, pro stanovení komfortní a bezpečné jízdy* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Ústav soudního inženýrství, 2017 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/100316>. Diplomová práce. Vedoucí práce Stanislav Tokař.
- [5] OSLIZLO, Aleš. *Principy konstrukce aerodynamického tvaru karoserie vozidel* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2008 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/12933>. Bakalářská práce. Vedoucí práce Marián Laurinec.
- [6] HØYER, Karl Georg. The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars. *Utilities Policy* [online]. 2008, **16**(2), 63-71 [cit. 2019-05-11]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jup.2007.11.001>. ISSN 0957-1787. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957178707000768>
- [7] SCROSATI, Bruno, Jürgen GARCHE a Werner TILLMETZ. *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles* [online]. 1. Woodhead Publishing, 2015, **number 80**, 546 s. [cit. 2019-05-11]. ISBN 978-1-78242-377-5. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=iEmdBAAAQBAJ&dq=Advances+in+Battery+Technologies+for+Electric+Vehicles&lr=&hl=cs&source=gbs_navlinks_s
- [8] DHAMEJA, Sandeep. *Electric vehicle battery systems* [online]. Woburn: Newnes, 2002, 252 s. [cit. 2019-05-11]. ISBN 978-0-7506-9916-7. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=fhNLk4afdZ0C&dq=Electric+vehicle+battery+system+s+&lr=&hl=cs&source=gbs_navlinks_s
- [9] KURZWEIL, P. a J. GARCHE. 2 - Overview of batteries for future automobiles. *Lead-acid batteries for future automobiles* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2017, s. 27-96 [cit. 2019-05-11]. ISBN 978-0-444-63700-0. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=PXV_CwAAQBAJ&hl=cs&source=gbs_navlinks_s
- [10] Nikl-metal hydridový akumulátor. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 15. 4. 2018. Dostupné také z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Nikl-metal_hydridov%C3%BD_akumul%C3%A1tor
- [11] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel* [online]. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2000, 434 s. : il. ; 23 cm. ISBN 80-238-5273-6.

- [12] Route: ulice Kolejní ⇒ ulice Technická. In: *Mapy.cz* [online]. Praha: Seznam.cz, c1996-2019 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://en.mapy.cz/zakladni?planovani-trasy&x=16.5756706&y=49.2248904&z=18&rc=9mG19x8DWlhGq3bA&rs=stre&rs=stre&ri=79425&ri=80534&mrp=%7B%22c%22%3A111%7D&rt=&rt=&xc=%5B%5D>
- [13] WB-LYP400AHA LiFeYPO4 (3.2V/400Ah). In: *EVPower* [online]. Praha, c2019 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.ev-power.eu/Winston-40Ah-200Ah/WB-LYP400AHA-LiFeYPO4-3-2V-400Ah.html>
- [14] ROUSE, Margaret. Lithium polymer battery (LiPo). *WhatIs.com* [online]. Newton: TechTarget, December 2016 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://whatis.techtarget.com/definition/lithium-polymer-battery-LiPo>
- [15] MCFADDEN, Christopher. Could Ultracapacitors Replace Batteries In Future Electric Vehicles?. *Interesting Engineering* [online]. February, 17th 2019 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://interestingengineering.com/could-ultracapacitors-replace-batteries-in-future-electric-vehicles>
- [16] UPADHYAY, Omprakash. Why battery swapping is not good for electric vehicle. In: *LinkedIn* [online]. Sunnyvale, c2018, October 12, 2017 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/why-battery-swapping-good-electrical-vehicle-omprakash-upadhyay>
- [17] MORAN, Greg. Battery swapping: The future of electric vehicle charging. *Forbes India* [online]. Mumbai, 08, Aug 2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.forbesindia.com/blog/technology/battery-swapping-the-future-of-electric-vehicle-charging/#>
- [18] ROBERTS, David. Electric buses are coming, and they're going to help fix 4 big urban problems. *Vox Media* [online]. Apr 28, 2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.vox.com/energy-and-environment/2017/10/24/16519364/electric-buses>
- [19] Self-driving cars take the wheel. *MIT Technology Review* [online]. Feb 15, 2019 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.technologyreview.com/s/612754/self-driving-cars-take-the-wheel/>
- [20] Přehled vlastností oceli S355J2G3. In: *Bohdan Bolzano* [online]. Kladno, c2019 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/nelegovane-konstrukcni-oceli-podle-en-10025/prehled-vlastnosti-oceli-s355j2drive-s355j2g3>
- [21] ARBUCKLE, Alex Q. 1880-1920 The first electric cars: Before Tesla, there was Edison. In: *Mashable* [online]. c2019 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://mashable.com/2015/07/20/early-electric-cars/?europa=true#xCJQcv1ik75g>
- [22] General Motors EV1. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 10 May 2019 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/General_Motors_EV1

- [23] Vyspělá technologie absorpční skleněná rohož (Absorbent Glass Mat) (AGM) olovokyselina. In: *Varta* [online]. Clarios, c2019 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.varta-automotive.cz/cs-cz/technologie/technologie-baterii-agm>
- [24] RICHARD, Michael Graham. Toyota is Turning Old NiMH Batteries Into New Batteries. In: *TreeHugger* [online]. Narrative Content Group, c2019, October 28, 2010 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.treehugger.com/cars/toyota-is-turning-old-nimh-batteries-into-new-batteries.html>
- [25] CARMEN, Juni. Benefits Of Using Lithium Ion Battery. In: *PC Wheel Weight* [online]. August 31, 2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <http://www.pcwheelweight.com/benefits-using-lithium-ion-battery/>
- [26] MILLER, Peter. Automotive Lithium-Ion Batteries: State of the art and future developments in lithium-ion battery packs for passenger car applications. *Johnson Matthey Technology Review* [online]. Hertfordshire, 2015 [cit. 2019-05-11]. DOI: 10.1595/205651315x685445. Dostupné z: <https://www.technology.matthey.com/article/59/1/4-13/#>
- [27] Supercapacitor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 9 May 2019 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor>
- [28] VOELCKER, John. Standardized Electric-Car Battery Swapping Won't Happen: Here's Why. In: *Green Car Reports* [online]. Mar 18, 2014 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: https://www.greencarreports.com/news/1090933_standardized-electric-car-battery-swapping-wont-happen-heres-why
- [29] LAMBERT, Fred. Tesla wants hundreds of employees testing full self-driving, offers free Autopilot upgrades with new purchases. In: *Electrek* [online]. Sep. 28th 2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://electrek.co/2018/09/28/tesla-employees-testing-full-self-driving-free-autopilot/>
- [30] Kategorie vozidel. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 18. 5. 2016 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Kategorie_vozidel
- [31] HAWKINS, Andrew J. The car of the future isn't a car at all. *The Verge* [online]. Vox Media, Dec 6, 2017 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.theverge.com/2017/12/6/16733944/moia-vw-minivan-shuttle-ridesharing-autonomous>
- [32] *Autonom Shuttle* [online]. In: Villeurbanne: Navya, c2019, s. 24 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://navya.tech/en/autonom-shuttle/>
- [33] Last mile (transportation). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 7 March 2019 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Last_mile_\(transportation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Last_mile_(transportation))

- [34] First-Last Mile Trips: Connect to Public Transit. In: *Active Switch* [online]. Mississauga [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://activeswitch.ca/campus/resources/first-last-mile-trips>
- [35] ČERVENKA, Jiří. Kupředu, elektrická! Automobilový průmysl v Evropě se dramaticky mění. *Euro: Byznys* [online]. Mladá fronta, 21. října 2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.euro.cz/byznys/kupředu-elektricka-1425126>
- [36] GADDY, Ben. Ample Raises \$31M: A Better Place Clone, or a New Way to Charge Electric Cars?. In: *Greentech Media* [online]. Boston, August 10, 2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/ample-a-better-better-place>
- [37] ATWELL, Cabe. Six Lithium-ion Battery Chemistries: Not all Batteries are Created Equal. *Power Electronics* [online]. London: Informa, Apr 24, 2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.powerelectronics.com/alternative-energy/six-lithium-ion-battery-chemistries-not-all-batteries-are-created-equal>
- [38] QUIMBY, Tom. Rivian reveals chassis of 800-hp electric pickup. In: *Hard Working Trucks* [online]. Randall-Reilly, June 19, 2018 [cit. 2019-05-11]. Dostupné z: <https://www.hardworkingtrucks.com/rivian-reveals-chassis-of-800-hp-electric-pickup/>
- [39] MISSENI, Marwin. E-scooter : the future is here !. In: *ID velocity* [online]. 18/04/2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: <https://www.idvelocity.com/escooter/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

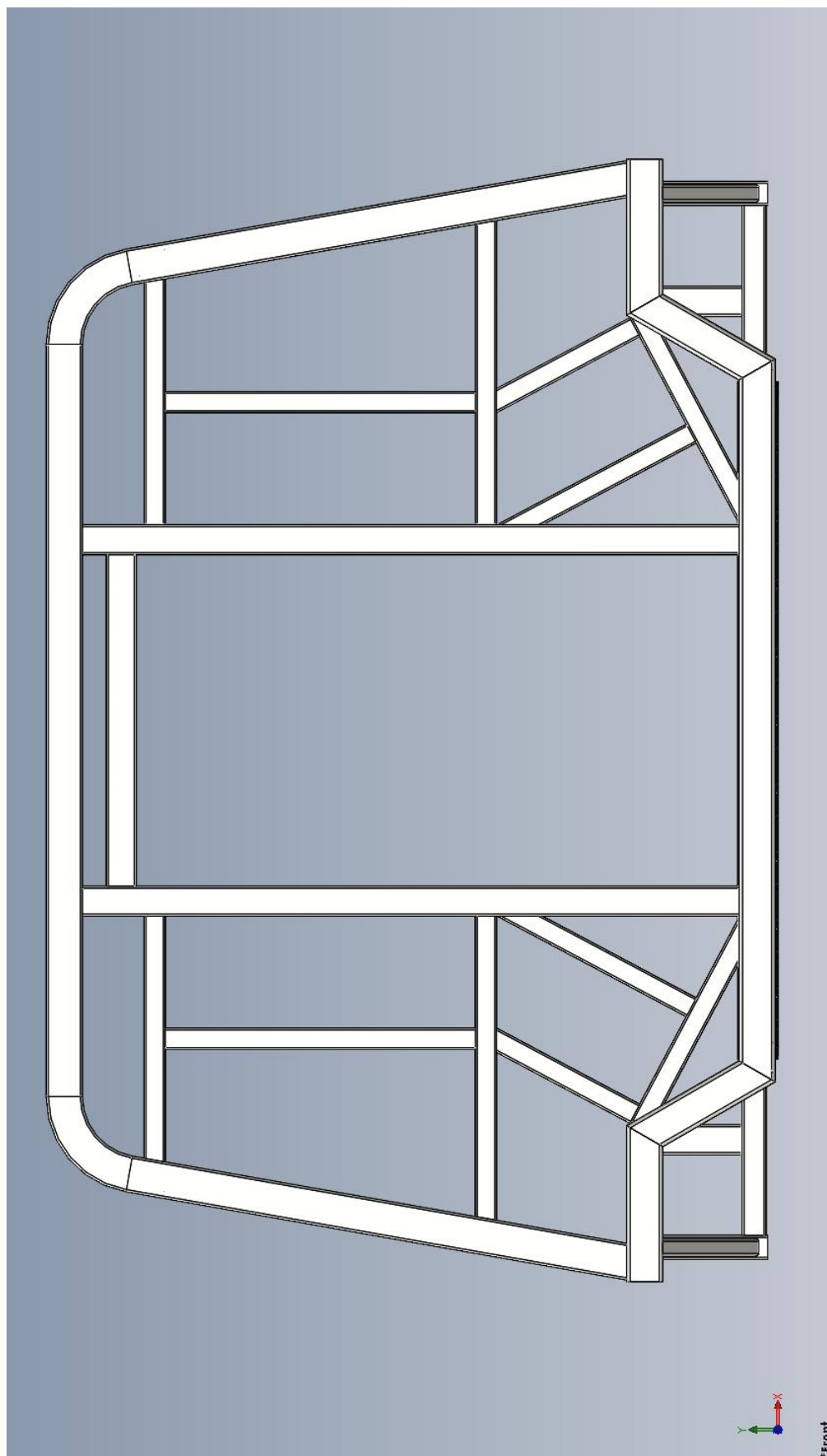
ADAS		Pokročilé asistenční systémy pro řidiče
AGM		Absorpční skelné vlákno (Absorbed Glass Mat)
HMH		Huber-Mises-Hencky
LiCoO ₂		Lithium cobalt oxide
LiFePO ₄		Lithium-železo-fosfát
Li-Ion		Lithium-iont
LiMn ₂ O ₄		Lithium manganese oxide
LiPo		Lithium-polymer
MKP		Metoda konečných prvků
Ni-Cd		Nikl-kadmium
Ni-MH		Nikl-metal hydrid
NiO(OH)		Oxid-hydroxid nikelnatý
R&D		Výzkum a vývoj (Research and Development)
RC		Rádiem řízený (Radio Controlled)
SAE		Society of Automotive Engineers
USA		Spojené státy americké
VRLA		Valve Regulated Lead Acid
VUT		Vysoké učení technické
VW		Volkswagen
WCED		Světová komise pro životní prostředí a rozvoj
a_x	[m·s ⁻²]	Komfortní zrychlení
B_{min}	[-]	Minimální počet článků baterie
C_{bAh}	[Ah]	Minimální kapacita baterie v Ah
C_{bv}	[Wh]	Výsledná kapacita baterie
C_{bWh}	[Wh]	Minimální kapacita baterie ve Wh
C_{ϵ}	[Ah]	Kapacita jednoho článku
c_x	[-]	Koeficient odporu vzduchu
D	[mm]	Průměr kolíku
D_A	[N]	Aerodynamický odpor
d_m	[km]	Dojezd minibusu
E	[J]	Potřebná energie
F_g	[N]	Tíhová síla

F_k	[N]	Síla působící na kolík
F_N	[N]	Přítlačná síla
F_s	[N]	d'Alembertova síla
F_x	[N]	Tažná síla
g	[m·s ⁻²]	Gravitační zrychlení
j	[-]	Počet jízd
k_k	[-]	Bezpečnost
l_1	[mm]	Délka vysunutí kolíku
l_2	[mm]	Délka spojitého zatížení
l_p	[-]	Počet cestujících
m_b	[kg]	Hmotnost baterie
m_{bk}	[kg]	Hmotnost baterie připadající na jeden kolík
m_c	[kg]	Celková hmotnost
$m_{\bar{c}}$	[kg]	Průměrná hmotnost cestujícího
m_e	[kg]	Hmotnost elektromotorů
m_k	[kg]	Hmotnost karoserie
m_l	[kg]	Hmotnost cestujících
M_o	[N·mm]	Maximální ohybový moment
m_p	[kg]	Hmotnost podvozku
q	[N·mm ⁻¹]	Spojité zatížení
r	[m]	Poloměr kola
R_x	[N]	Valivý odpor
s	[m]	Délka trasy
S	[mm ²]	Plocha průřezu kolíku
S_x	[m ²]	Čelní plocha vozidla
t_c	[min]	Celková doba jedné jízdy
$t_{\bar{c}}$	[min]	Doba čekání
t_j	[min]	Doba jedné jízdy
t_p	[h]	Provozní doba
U_j	[V]	Jmenovité napětí baterie
v_{max}	[km·h ⁻¹]	Maximální rychlost vozidla
W	[J]	Práce
W_c	[J]	Celková práce

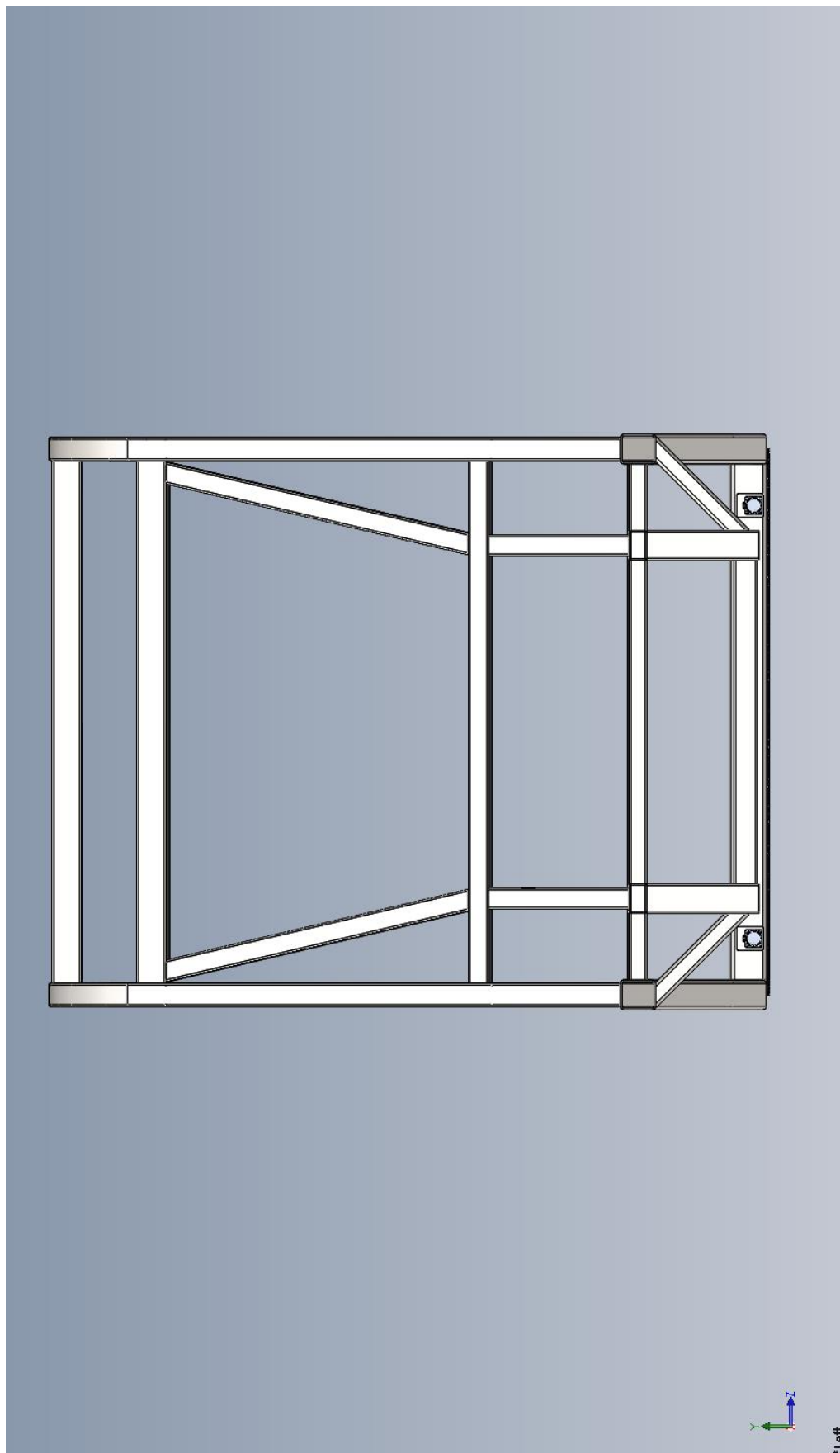
W_o	[mm ³]	Průřezový modul v ohybu
θ	[°]	Úhel stoupání
ξ	[m]	Rameno valivého odporu
$\rho_{v_}$	[kg·m ⁻³]	Hustota vzduchu
σ_d	[MPa]	Dovolené napětí
$\sigma_o_$	[MPa]	Ohybové napětí
σ_{red}	[MPa]	Redukované napětí
τ_s	[MPa]	Smykové napětí

SEZNAM PŘÍLOH

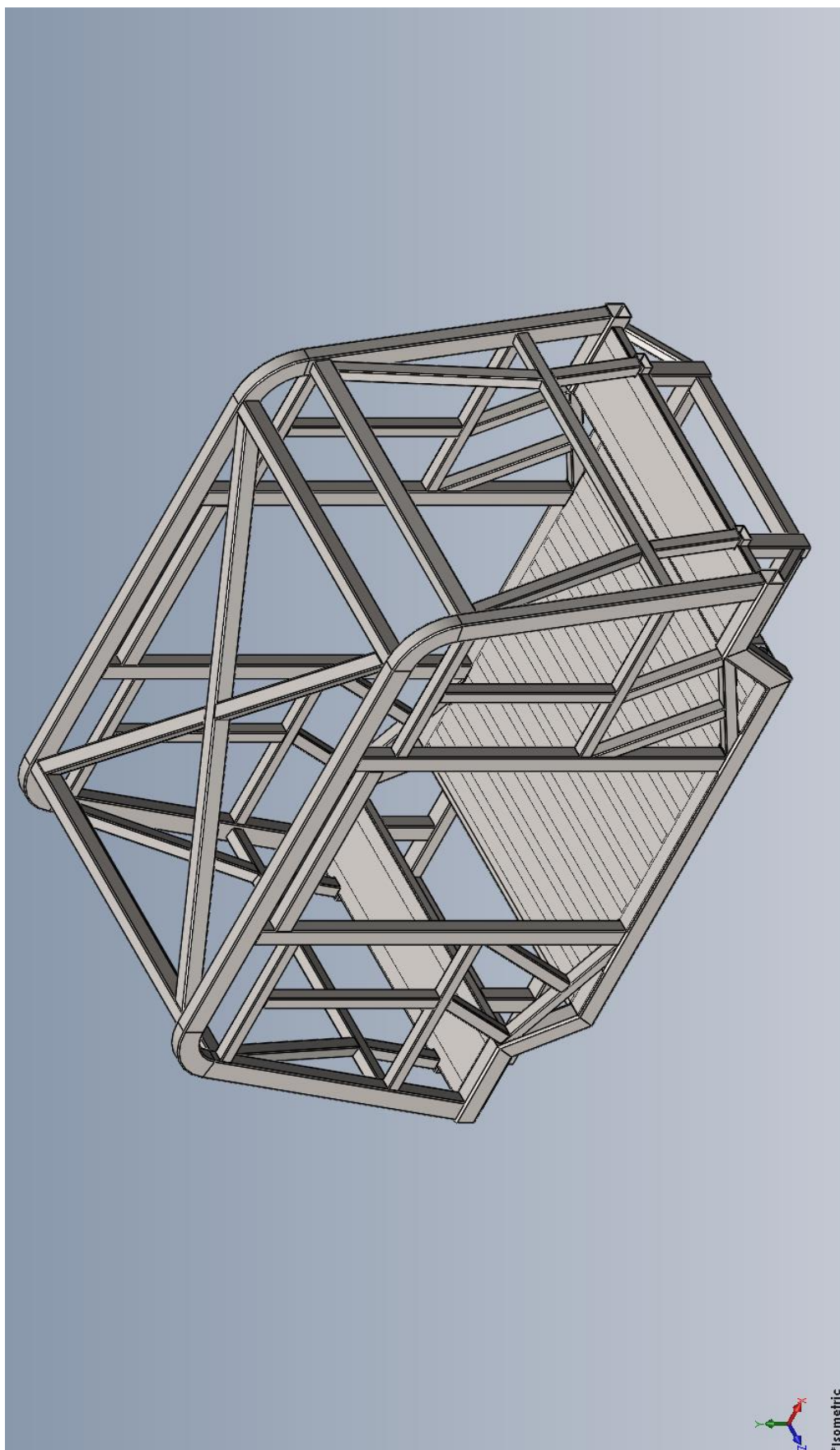
Příloha 1 Rám minibusu-pohled z boku	I
Příloha 2 Rám minibusu-pohled zepředu	II
Příloha 3 Rám minibusu-ISO pohled č. 1	III
Příloha 4 Rám minibusu-ISO pohled č. 2	IV



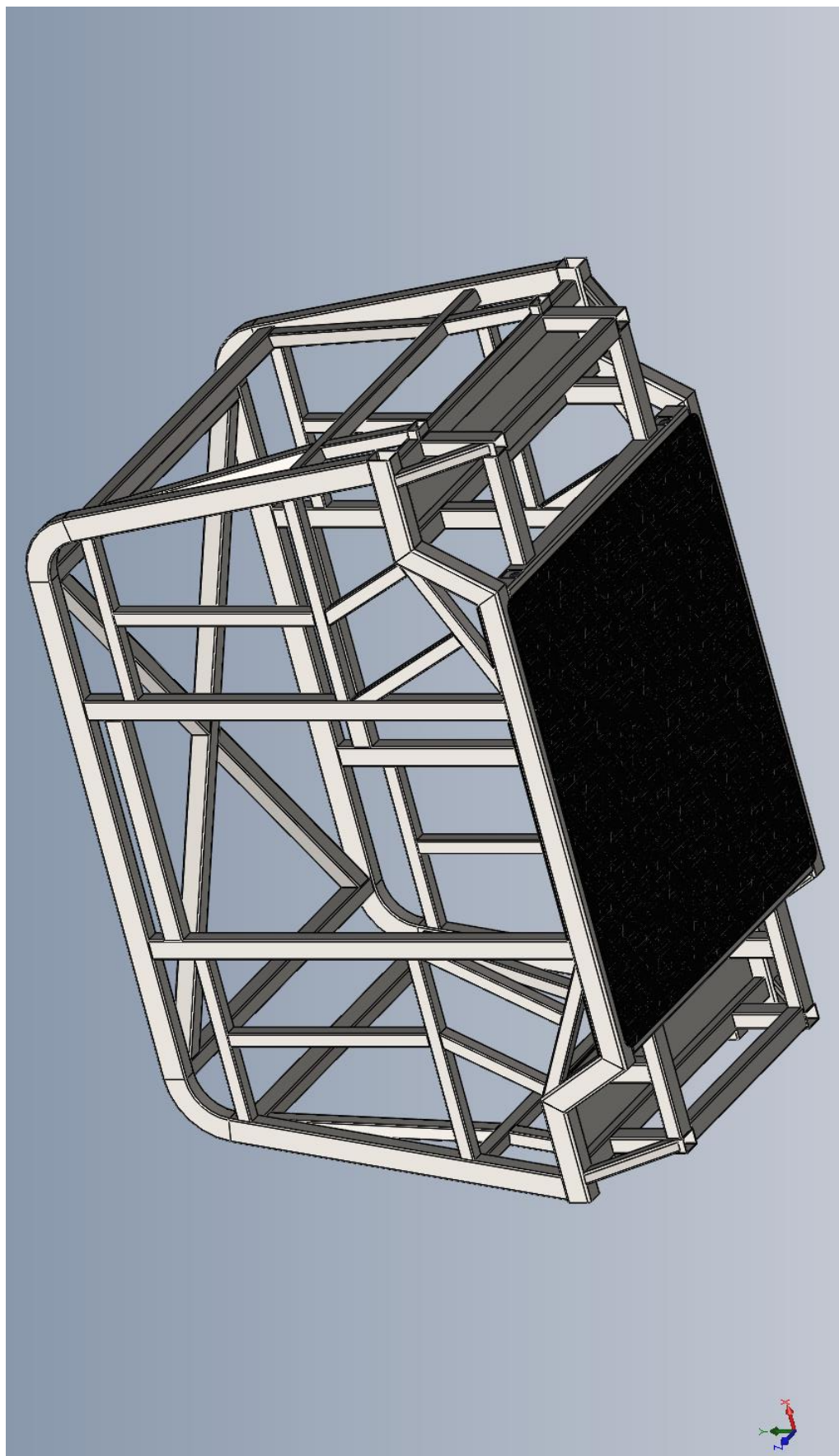
Příloha 1 Rám minibusu-pohled z boku



Příloha 2 Rám minibusu-pohled zepředu



Příloha 3 Rám minibusu-ISO pohled č. 1



Příloha 4 Rám minibusu-ISO pohled č. 2