



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

BUDOUCNOST VEŘEJNÉ DOPRAVY - DESIGN AUTONOMNÍHO MĚSTSKÉHO ELEKTROBUSU

FUTURE OF PUBLIC TRANSPORT - DESIGN OF AUTONOMOUS ELECTRIC CITY BUS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Šmahel

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David John

BRNO 2026

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Martin Šmahel**
Studijní program: Průmyslový design ve strojírenství
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **Ing. David John**
Akademický rok: 2025/26

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:

Budoucnost veřejné dopravy – design autonomního městského elektrobusu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Současné autobusy využívané pro městskou hromadnou dopravu jsou navrhovány s ohledem na přítomnost řidiče a tradiční provozní podmínky. S rozvojem autonomních technologií se však otevírá možnost změnit přístup k návrhu městského autobusu – jak z hlediska designu, tak i způsobu provozu. Hlavní výzvou je nalézt takové řešení, které umožní plně využít potenciál autonomního řízení, a zároveň zajistí bezpečnost, pohodlí a ergonomii cestujících i efektivní začlenění elektrobusu do městského provozu.

Typ práce: vývojová – designérská
Výstup práce: aplikovaný výsledek (Fužit, Fprum, Gprot, Gfunk, R)
Projekt: specifický vysokoškolský výzkum

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je navrhnout design městského autonomního elektrobusu, který využívá možnosti plně autonomního provozu a reaguje na potřeby cestujících, prostředí městského hromadné dopravy a aktuální trendy v dopravě.

Dílčí cíle diplomové práce:

- analyzovat vybrané koncepty a designy městských autobusů, autonomních vozidel a technologií, které využívají,
- vytvořit návrh exteriéru elektrobusu, který bude respektovat rozměrové, funkční a bezpečnostní požadavky určené pro tento typ vozidla,
- vytvořit koncepčně rozložení a vybrané prvky interiéru s ohledem na ergonomické požadavky cestujících,
- zlepšit uživatelskou přívětivost cestujících a ostatních účastníků provozu

Požadované výstupy: průvodní zpráva, sumarizační poster, technický poster, ergonomický poster, designérský poster, fotografie modelu, fyzický model.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<https://www.ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukoncení/>

Seznam doporučené literatury:

DREYFUSS, Henry. Designing for people. New York: Allworth Press, 2003. ISBN 1-58115-312-0.

FIELD, Charlotte a Peter FIELD (eds.). Designing the 21st century: design des 21. Jahrhunderts Le design du 21 siècle. Köln: Taschen, c2001. ISBN 3-8228-5883-8.

LIDWELL, William. a Gerry. MANACSA. Deconstructing product design: exploring the form, function, usability, sustainability, and commercial success of 100 amazing products. Beverly, Mass.: Rockport Publishers, c2009. ISBN 1592533450.

NORMAN, Donald A. Emotional design: why we love (or hate) everyday things. New York: Basic Books, 2005. ISBN 0-465-05136-7.

PELCL, Jiří. Design: od myšlenky k realizaci = from idea to realization. V Praze: Vysoká škola uměleckoprůmyslová v Praze, c2012. ISBN 978-80-86863-45-0.

THOMPSON, Rob a Young Yun KIM. Product and furniture design. New York: Thames & Hudson, 2011. Manufacturing guides. ISBN 0500289190.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2025/26

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá tématem návrhu exteriéru a koncepčně interiéru autonomního elektrobuse určeného pro městskou hromadnou dopravu. Primárním cílem je vytvořit takový návrh, který využívá možnosti autonomního provozu, reaguje na aktuální trendy a bere v potaz potřeby cestujících a ostatních účastníků provozu. Návrh vychází z poznatků získaných při analýze stávajících koncepčních řešení a technologií, které se pro konstrukci návrhu nabízí.

KLÍČOVÁ SLOVA

elektrobus, autonomní vozidlo, městská hromadná doprava, transportní design

ABSTRACT

This master's thesis addresses the exterior design and interior concept of an autonomous electric bus designed for urban public transport. The primary objective is to develop a design that leverages the capabilities of autonomous operation, responds to current trends, and addresses the needs of passengers and other road users. The design is based on insights gained from analysing existing conceptual solutions and technologies available for the vehicle's construction.

KEYWORDS

electric bus, autonomous vehicle, urban public transport, transport design

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠMAHEL, Martin. *Budoucnost veřejné dopravy - design autonomního městského elektrobusu*. Online, diplomová práce. David JOHN (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2026. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/174097>. [cit. 2026-05-12].

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Davidu Johnovi za odborné vedení mé diplomové práce. Poděkování také patří MgA. Jakubu Vlkavcovi, který jako mi jako zástupce Škoda Group poskytl cenné odborné rady a poznatky.

Dále bych rád poděkoval mé snoubence, nejbližší rodině, přátelům, spolužákům a ostatním vyučujícím oboru za podněty a odezvu k této práci a podporu během studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Davida Johna. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů. Pro gramatickou kontrolu textů a správnosti výpočtů, překlady a vysvětlení norem a vyhlášek a úpravu vizualizace na sumarizační poster jsem využil generativních jazykových modelů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	Úvod.....	2
2	Přehled současného stavu poznání.....	3
2.1	Rešeršní metody.....	3
2.1.1	Kritéria pro výběr informačních zdrojů.....	3
2.1.2	Sekundární zdroje.....	3
2.1.3	Rešeršní požadavek a rešeršní strategie.....	3
2.1.4	Výběr relevantních informačních pramenů	4
2.1.5	Metody zpracování získaných dat	4
2.2	Motivační a sociální analýza	5
2.3	Designérská analýza	6
2.3.1	Stručný historický vývoj.....	6
2.3.2	Současný stav poznání.....	9
2.3.3	Autonomní shuttly a robo-taxi.....	14
2.3.4	Futuristické vize	16
2.3.5	Shrnutí designérské analýzy	18
2.4	Technická a legislativní analýza	18
2.4.1	Úrovně automatizace a základní architektura.....	18
2.4.2	Senzory a sběr dat.....	20
2.4.3	Komunikace V2X a integrace do infrastruktury.....	23
2.4.4	Pohon, podvozek a energetika	23
2.4.5	Legislativní rámec a stěžejní normy (výběr)	26
2.4.6	Ergonomické požadavky a inkluzivní design	28
2.5	Identifikace příležitostí	29
3	Analýza problému a cíl práce.....	30
3.1	Analýza problému	30
3.1.1	Název produktu a jeho klasifikace.....	30
3.1.2	Specifikace zákazníka	30
3.1.3	Specifikace spotřebitele.....	30
3.1.4	Specifikace trhu, ceny a použitých výrobních technologií	30
3.2	Cíl práce	32

4	Koncepční návrh	33
4.1	Analýza cílů a specifikace omezení	33
4.1.1	Specifikace cílů.....	33
4.1.2	Specifikace omezení	34
4.2	Technická a funkční analýza	34
4.2.1	Ergonomické aspekty.....	35
4.3	Průzkum variantních směrů.....	36
4.4	Návrh variantních řešení	36
4.4.1	Varianta I.	37
4.4.2	Varianta II.....	38
4.4.3	Varianta III.....	39
4.5	Analýza variant a výběr nejlepší	40
5	Předběžný návrh	41
5.1	Určení tvarů, rozměrů a materiálů.....	41
5.2	Základní rozměry	42
5.3	Vnitřní komponenty a jejich uspořádání.....	42
5.3.1	Řešení pohonu	43
5.3.2	Systémy autonomního řízení.....	44
5.3.3	HVAC jednotka	47
5.3.4	Výpočet kapacity a rozměrů baterie.....	47
5.3.5	Stanovení přibližné celkové maximální hmotnosti	50
5.3.6	Specifikace rozměrů kol a pneumatik.....	51
5.4	Odhad výrobních a provozních nákladů a objemu výroby	52
6	Detailní návrh	54
6.1	Tvarové řešení	54
6.1.1	Perspektivní pohled.....	54
6.1.2	Čelní pohled.....	55
6.1.3	Boční pohled.....	56
6.1.4	Zadní pohled	56
6.1.5	Pohled shora.....	57
6.1.6	Interiér	58
6.2	Konstrukční návrh.....	59

6.2.1	Základní rozměry	59
6.2.2	Konstrukce vozidla.....	59
6.2.3	Funkční prvky	62
6.3	Ergonomické a bezpečnostní řešení.....	73
6.3.1	Ergonomie nástupu do vozidla	73
6.3.2	Ergonomie tlačítek	75
6.3.3	Bezpečnost a hygiena	77
6.3.4	Bezpečnost interiéru a ochrana pasažérů.....	77
6.4	Barevné a grafické řešení	80
6.4.1	Barevné řešení	80
6.4.2	Grafické řešení	81
6.5	Udržitelnost produktu	83
6.5.1	Udržitelnost autonomního elektrobusu.....	83
6.5.2	Udržitelnost konceptu městské hromadné dopravy budoucnosti.....	84
6.6	Vyhodnocení klíčových parametrů.....	85
7	<i>Závěr</i>	86
8	<i>Výsledek výzkumu podle RIV</i>	87
9	<i>Seznam použitých zdrojů</i>	88
10	<i>Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin.....</i>	98
11	<i>Seznam obrázků a grafů</i>	101
12	<i>Seznam tabulek.....</i>	104
13	<i>Seznam příloh.....</i>	105

1 ÚVOD

Technologický vývoj v oblasti dopravy a automatizovaného řízení zažívá za poslední dobu výrazný pokrok. Dnešní technologie nabízí možnosti zařazení autonomních vozidel do běžného provozu, což nabízí své využití také pro městskou hromadnou dopravu. Díky tomu dostává pohled na hromadnou dopravu ve městech nových rozměrů a otevírá možnosti efektivnějšího a inovativního způsobu, jakým může MHD fungovat.

Se snahou o integraci těchto technologií se však objevily nové, doposud neprozkoumané nebo nedostatečně řešené problémy. Ty plynou především ze specifických provozních podmínek autonomních vozidel a z nutnosti jejich pohybu v rámci stávající infrastruktury, kde se pohybují jak další autonomní vozidla, tak běžní řidiči a ostatní účastníci provozu.

Absence lidského řidiče sice nabízí zcela nové přístupy k řešení interiéru a prostorového uspořádání, zároveň to však o to větší potřebu důmyslného návrhu takového vozidla. V prostředí, kde chybí vizuální autorita řidiče, se design vozidla stává hlavním prvkem budování důvěry a pocitu bezpečí mezi strojem a člověkem. Je zřejmé, že nestačí pouze mechanicky integrovat senzory do stávajících karoserií, ale je nutné vytvořit novou vizuální identitu, která bude autonomní funkci přirozeně komunikovat navenek i dovnitř vozidla.

Cílem této diplomové práce je návrh koncepčního designu městského autonomního elektrobusu, vyvíjeného ve spolupráci se společností Škoda Group. Práce se zaměřuje na vytvoření inovativního autonomního vozidla MHD, které reflektuje technologický posun a zároveň nabízí vizi do budoucnosti možností tohoto odvětví dopravy.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Tato kapitola se věnuje současnému stavu poznání v oblasti autonomních vozidel, autonomní hromadné dopravy, městských autobusů a elektrobusů. Představuje výzkumnou část diplomové práce, která zahrnuje metodiku vyhledávání informací, psychologickou a motivační analýzu uživatelů, designérskou analýzu existujících vozidel na trhu a technicko-legislativní rámec. Výsledkem je shrnutí klíčových poznatků, ze kterých bude vycházet koncepční návrh nového elektrobusu.

2.1 Rešeršní metody

2.1.1 Kritéria pro výběr informačních zdrojů

Pro efektivní vyhledávání klíčových zdrojů pak byla definována klíčová slova a pojmy. Tato slova a jejich kombinace v anglickém i českém jazyce byly pak vyhledávány ve vhodných primárních a sekundárních zdrojích. Příkladem klíčových slov jsou například “autonomní vozidlo, autonomous vehicle”, “samořídící systém vozidla, self-driving vehicle system”, “elektrobus, electric bus”, “ergonomie, ergonomics”, “design”, “chytrá města, smart cities”, “konstrukce, construction”. Z nalezených zdrojů byly primárně vybírány odborné články, akademické knihy, patenty a technické listy. Přestože je téma autonomního řízení a jeho aplikace pro městskou hromadnou dopravu je teprve v začátcích, byly preferovány zdroje v rámci posledních let, protože technologie, kterou autonomní systémy využívají se velmi rychle vyvíjí.

2.1.2 Sekundární zdroje

Vyhledávání informačních zdrojů probíhalo pomocí definovaných klíčových slov a rešeršních metod především v databázích ScienceDirect a Google Scholar a Primo. Jako důležité zdroje se také ukázaly patentové a legislativní rejstříky.

2.1.3 Rešeršní požadavek a rešeršní strategie

Pro získání relevantních zdrojů byly využity dvě základní strategie – stavebních kamenů a rostoucí perly.

Strategie rostoucí perly byla využita k postupnému upřesnění vyhledávacího dotazu. Například počáteční obecný pojem “Bus” byl dále rozšiřován přes “Electric bus” až k “Autonomous electric bus for public city transportation”.

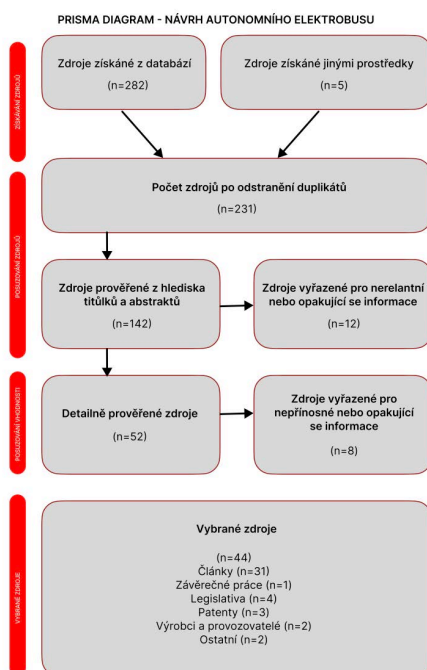
Druhá byla využita strategie stavebních kamenů. Ta spočívala v rozložení širokých témat na základní pojmy a jejich následné kombinování pomocí booleovských operátorů. Tento přístup umožnil přesné vyhledávání například “Autonomous driving AND Bus”, nebo “electric bus NOT driver space”.

2.1.4 Výběr relevantních informačních pramenů

Aby byla zajištěna co nejlepší relevance dat pro analýzu, byly získané zdroje vybírány podle následujících parametrů:

- **Aktuálnost (časový rámec):** Prioritu měly zdroje publikované po roce 2015. Vzhledem k rychlosti vývoje v oblasti senzoriky, baterií a AI jsou starší technické specifikace pro aktuální designérskou praxi často zavádějící.
- **Úroveň autonomie:** Do výběru byly zahrnuty primárně dokumenty řešící vysokou a plnou automatizaci (Level 4 a 5 dle SAE – viz. kapitola 2.4.1).
- **Důvěryhodnost:** Důraz byl kladen primárně na odborné články, studie, důvěryhodné zdroje a oficiální technické listy výrobců.

Detaily výběru a třídění informačních zdrojů byly zaneseny do PRISMA diagramu (obr 2.1).



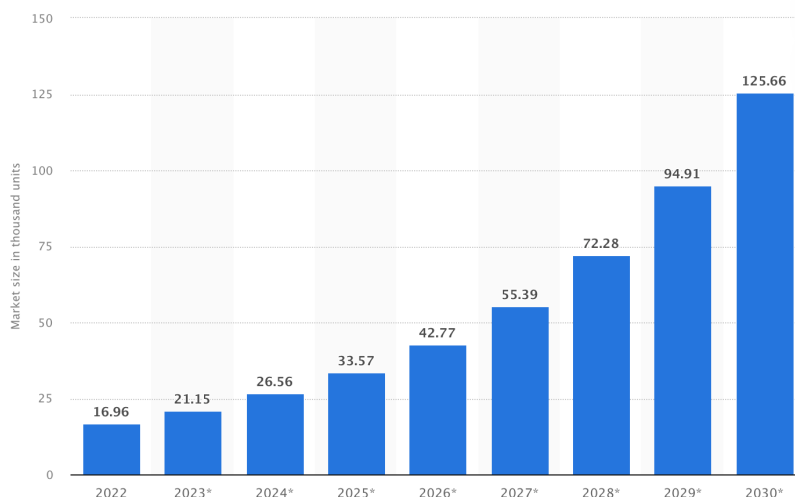
Obr. 2.1 - PRISMA diagram

2.1.5 Metody zpracování získaných dat

Získané zdroje byly rozřazeny podle jejich typu a zaznamenány pomocí citačního manažeru CitacePRO.

2.2 Motivační a sociální analýza

Autonomní vozidla jsou velkým tématem dnešní doby. Jejich podíl na silnicích každým rokem roste a jejich technologie se zdokonalují. Růst trhu s autonomními vozidly potvrzuje i studie, podle níž by se jejich podíl na silnicích měl do roku 2030 globálně zvýšit z aktuálního přibližně 3 % podílu na více než 12 %. [1]



Obr. 2.2 - Graf predikce podílu autonomních vozů na 1000 jednotek do roku 2030 [1]

Analýza provedená pro účely této práce byla zaměřena primárně na typická střední až větší města střední Evropy. Zavedení plně automatizovaných elektrobusů do systému městské hromadné dopravy těchto měst nemusí být motivováno pouze pokrokem technologického vývoje, ale také ekonomickými, bezpečnostními a ekologickými faktory. Provoz a regulace autonomních vozidel jde kupředu a například již dnes je v Česku možné provozovat vozidla s homologizovaným autonomním systémem třetí úrovně za určitých podmínek. Úrovně autonomního řízení jsou blíže rozebrány v kapitole 2.4.1. [2]

Jedním z hojně diskutovaných problémů dnešní doby je množství emisí CO₂ a hlukového smogu produkovaných vozidly se spalovacími motory. Další otázkou je také vysoké množství vozidel v městech a s tím spojená hustota dopravy. Využití elektromobility sice nevyřeší všechny tyto problémy samo o sobě, ale nabízí primárně eliminaci lokálních emisí, zatímco propojení s autonomním řízením umožňuje efektivněji využít stávající infrastrukturu. Do budoucna autonomní provoz navíc může nabídnout teoreticky například redukcí šířky jízdních pruhů, nebo úplnou změnu alespoň části současné koncepce infrastruktury pozemních komunikací.

Integrace autonomně řízených vozidel, a tedy odstranění závislosti provozu MHD na lidském faktoru na jednu stranu znamená příležitost levnějšího a flexibilnějšího a nepřetržitého provozu spojů bez ohledu na počet dostupných řidičů, zároveň ale vznáší sociální otázku eliminace pracovních pozic těchto řidičů. Ačkoliv se práce tohoto téma okrajově dotýká, není to primárním předmětem zadání a cílem výzkumu. Zmíněné ekonomické prospekty u elektrobusů vychází z předpokládaných nižších provozních nákladů a jednodušší údržbě vzhledem k absenci spalovacích motorů a složitých mechanických komponent.

Bezpečnostní přínos pak spočívá primárně v eliminaci lidské chyby, která je nejčastější příčinou dopravních nehod. Systémy založené na strojovém učení s využitím dat z LiDARů, radarů a kamer dokážou zajistit sledování okolí v rozsahu 360° s reakční dobou v řádu jednotek až desítek milisekund, tedy několikanásobně kratší než jakou disponuje běžný lidský operátor. Autonomní systémy také dokážou nebezpečnou situaci vyřešit ve velké většině případů lépe než průměrný řidič. [3]

V psychologické rovině však implementace naráží na bariéru uživatelského přijetí. Absence řidiče jako vizuální autority vyžaduje, aby roli komunikátora převzal design vozidla a rozhraní HMI (Human-Machine Interface). Aby byl zajištěn pocit bezpečí, musí vnější tvarosloví, a komunikační prvky vozidla jasně a srozumitelně interagovat s okolím a chodci. [4]

2.3 Designérská analýza

2.3.1 Stručný historický vývoj

Historie hromadné dopravy a snahy o automatizaci řízení se vyvíjely dlouho odděleně, přičemž k jejich spojení dochází až v poslední době.

Vývoj autobusové městské hromadné dopravy

Počátky hromadné dopravy ve městech sahají až do roku 1622, kdy v Paříži začaly jezdit tzv. Omnibusy, tedy vozy s cestujícími tažené koňským spřežením. Ačkoliv se hromadná doprava ve městech rozšířila až později, byly položeny základy principů městské hromadné dopravy: fixní trasa, jízdní řád a zpoplatněné jízdné. [5]



Obr. 2.3 - Omnibus před londýnskou Národní galerií v Londýně kolem roku 1890 [5]

První elektrické vozidlo určené k přepravě cestujících přišlo na konci 19. století. Jednalo se o malý vlak tažený elektrickou lokomotivou, který vozil návštěvníky berlínské průmyslové výstavy v roce 1879. [6]



Obr. 2.4 - první elektrický vlak v Berlíně roku 1879 [6]

Prvním plně elektrickým autobusem pak byl model MAN 750 HO-M10, který byl schopen přepravit necelou stovku cestujících na vzdálenost 50 km. Zajímavým faktem je, že baterie byla uložena v přívěsu autobusu. [7]



Obr. 2.5 - Autobus MAN 750 HO-M10 [7]

Dnes je městská hromadná doprava nezbytnou součástí infrastruktury moderních měst. V Praze například MHD za rok 2024 přepravilo více než 1,1 miliardy cestujících a tamní dopravní podnik provozuje přes 2800 vozidel a jízdních souprav, z toho téměř 1300 jednotek tvoří autobusy. [8][9]

Vývoj autonomního řízení

Snahy o vytvoření auta bez řidiče nejsou zdaleka jen záležitostí posledních let. Už v roce 1925 předvedl Francis Houdina v New Yorku rádiem řízený vůz American Wonder, který ovládal z druhého auta jedoucího za ním. [10]

Skutečný vědecký posun ale nastal až v druhé polovině 20. století:

Stanford Cart (60. a 70. léta): Jeden z prvních systémů autonomního řízení. Původně projekt vznikl pro výzkum dálkového ovládání měsíčních vozidel. Později bylo však vozítko vybaveno kamerovým systémem a algoritmy pro vizuální navigaci. V roce 1979 dokázal Stanford Cart zcela samostatně projet místností s překážkami. Přestože kvůli omezenému výpočetnímu výkonu trval pohyb přes místnost přibližně 5 hodin, šlo o zásadní milník v praktickém využití počítačového vidění pro autonomní řízení. [11]



Obr. 2.6 - vozítko Stanford Cart [12]

Projekt Navlab (80. léta): Výzkumníci z Carnegie Mellon University začali integrovat počítače a senzory do reálných dodávek. Jejich systémy zvládaly samostatnou pomalou jízdu předměstskými čtvrtěmi. [13]

DARPA Grand Challenge: Tato soutěž autonomních vozidel se konala od roku 2004 v poušti Mojave. Zatímco v prvním ročníku žádný stroj nedojel do cíle, o rok později vítězný vůz zvládl projet 212 km dlouhou trasu v těžkém terénu. Tento úspěch byl pro autonomní řízení zásadním milníkem. [14]



Obr. 2.7 - Vítězný autonomní automobil "Stanley" z roku 2005 [14]

2.3.2 Současný stav poznání

Trh s autonomními elektrobusy pro městskou hromadnou dopravu je v současnosti v poměrně zajímavé fázi vývoje. Zatímco například osobní elektromobily už našly svůj vizuální standard a na silnici je lze poměrně dobře identifikovat, design autonomních elektrobusů zůstává neprobádaným územím. Vývoj se aktuálně neubírá jedním směrem, různí výrobci se vydávají různými směry a snaží definovat novou identitu vozidla, které už nemusí být stavěno kolem pracoviště řidiče. Pro účely této práce byly stávající koncepty rozděleny do tří kategorií podle jejich vzhledu: tradiční autobusy, shuttle busy, robotaxi a futuristické vize.

Tradiční autobusy

Tato skupina zástupců prezentuje autobusy, které buď staví na již stávajících platformách, nebo svým vzhledem zapadají mezi tradičnější designy autobusů.

Mercedes-Benz Future Bus

Vize autobusu budoucnosti z dílny výrobce Mercedes již na první pohled zaujme svým netradičním vzhledem. Výraznými vizuálními prvky jsou především velká okna a osvětelné hrany. Celá konstrukce je založena na sériové platformě Citaro. Částečné autonomní řízení obstarává systém CityPilot pomocí kombinace kamer, radarů a GPS modulů. Pohon je řešen naftovým spalovacím motorem. Dveře autobusu jsou neobvykle umístěny uprostřed vozu, což podle výrobce zrychluje tok pohybu cestujících při nástupu a výstupu z vozidla. Vzhled interiéru nese stejnou logiku designu jako zbytek vozidla. Je koncipován netradičně s velkými organicky vzhlížejícími sedačkami. Autobus je vybaven připojením V2I, což mu umožňuje komunikovat především se semaforey a chytrými křižovatkami v provozu. Rozměry autobusu jsou přibližně (2,5 x 3,1 x 12) m. [15][16]

Osobní hodnocení

Mercedes-Benz Future Bus byl jedním z prvních, který mě při rešerši zaujal. Ačkoliv je na pohled blíže spíš tradičnější koncepci autobusu, za což vděčí především své sériové platformě, jeho celkový zjev nese jisté prvky futuristického designu. Co už mě příliš nezaujalo byly detaily řešení rozložení funkčních prvků autobusu. Vnitřní rozložení sice vypadá zajímavě, přináší však znovu již vyřešené problémy uspořádání a maximálního využití vnitřní plochy. Organická sedadla s velkými rozestupy jistě nabídnou zajímavý zážitek cestujícím, avšak za cenu toho, že se jich do autobusu vejde výrazně méně oproti klasické koncepci.

Co mě také překvapilo byla volba použití velkého spalovacího dieselového motoru. S ohledem na již zmíněnou platformu a další sériově vyráběné díly to sice dává smysl, čekal jsem však že autobus s označením “future” ve svém názvu bude využívat elektrického pohonu. Na závěr hodnocení je nutné podotknout, že se jedná o koncept a Mercedes uvedl v posledních letech na trh nové modely řady eCitaro, která na Future Bus navazuje a řeší většinu neduhů, které jsem Future Busu vytýkal.



Obr. 2.8 - Mercedes Benz Future Bus: Extériér [17]



Obr. 2.9 -Mercedes Benz Future Bus: Interiér [17]

Volvo 7900 Electric Autonomous

Elektrobus v podání výrobce Volvo je plně elektrický autonomní autobus s kapacitou až 80 cestujících v základní verzi a 160 cestujících ve verzi prodloužené. Pro autonomní řízení využívá systém Ride Pilot, který pomocí kamer, radarů a 360° lidarů detekuje jízdní pruhy a plynule přizpůsobuje jízdu aktuálnímu provozu. Jeho design je čistě účelný a tvarově se drží klasické koncepce městských autobusů. Interiér nabízí prostor pro až 80 cestujících. Technologickou zajímavostí tohoto modelu je způsob dobíjení – využívá pantografové nabíjení, kdy stačí, aby autobus zastavil v přesné pozici pod nabíjecí stanicí, a trolej se k němu automaticky shora připojí. Baterie dle technických údajů výrobce dodá energii na až 200 km dojezu. U kratší verze, které se tato řešerše primárně věnuje je k dispozici pro nástup do vozidla trojice dveří. Rozměry základní verze elektrobusu jsou přibližně (2,5 x 3,2 x 12) m. [18]

Osobní hodnocení

Myslím, že hodnotit tento elektrobus z hlediska designu je nutné s ohledem primárně na jeho funkci. Vzhledově se totiž nesnaží o inovaci, nebo úplné odlišení od jiných autobusů. Koncepce je však dle mého názoru řešena intuitivně a funkčně. Interiér je světlý a nepůsobí stísněně. Zaujalo mě také řešení nabíjení pomocí pantografu.



Obr. 2.10 - Volvo 7900 Electric Autonomous [18]

Arrival Bus

Britský projekt Arrival Bus je vize designu elektrobusu navržena s maximálním důrazem na co nejnižší náklady na výrobu a údržbu. Toho je dosaženo pomocí modulárního přístupu k výrobě – vozidlo využívá převážně ploché panely karoserie, které lze v případě potřeby snadno vyměnit, nebo nahradit. Design vozu je spíše minimalistický s velkými prosklenými plochami a LED panely po obvodu. Jelikož jde zatím o koncept s ambicemi sériové výroby, nejsou konkrétně specifikované parametry jako kapacita, dojezdová vzdálenost, nebo přesné rozměry. [19]

Osobní hodnocení

Projekt Arrival mě velmi zaujal. Jsem si vědom toho, že se jedná spíše o představení vize, tudíž se případný výsledek může od tohoto konceptu lišit. Pokud mám však hodnotit elektrobus v jeho představené formě, líbí se mi jeho jednoduchý, ale atraktivní vzhled. Vnější tvar sice není vzhledem k použití panelů moc protvarovaný a celkový tvar se příliš neodlišuje od klasických autobusů. Tvarová koncepce je víceméně kvádrová, to však dává více vyniknout informačním LED panelům po obvodu horní hrany. Interiér naopak působí vzdušně, prosvětleně a funkčně. Výrobce navíc ukázal několik variant modulárního řešení rozložení sedaček, což zlepšuje variabilitu pro různá města a linky.



Obr. 2.11 - Arrival Bus: Exteriér [20]



Obr. 2.12 - Arrival Bus: Interiér [20]

2.3.3 Autonomní shuttly a robo-taxi

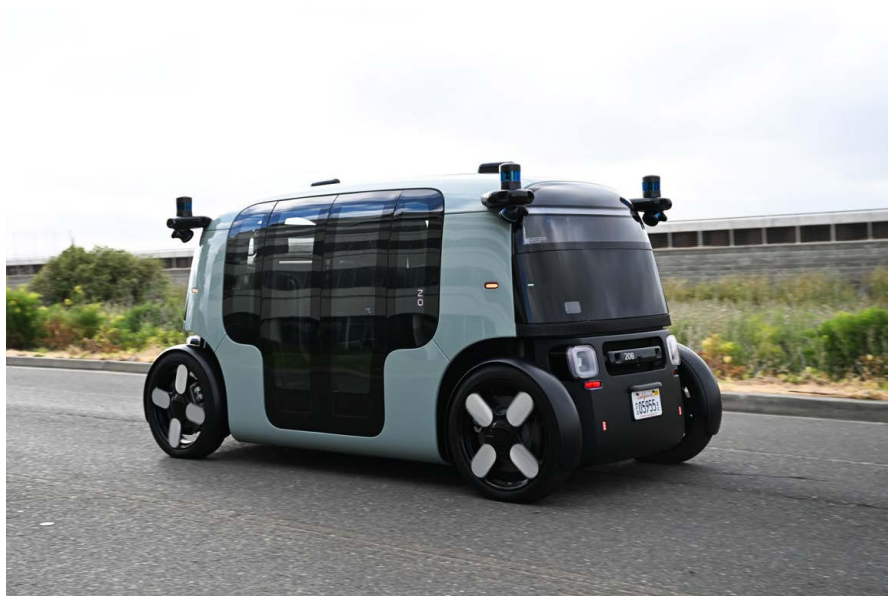
Tato skupina vozidel je určena spíše pro dopravu menšího počtu osob, nebo zásilek na kratší vzdálenosti, často v uzavřených kampusech nebo na letištích. Do analýzy je tato kategorie zařazena především proto, že i menší vozidla mohou být inspirací pro tvorbu designu větších jednotek.

Zoox

Zoox je plně autonomní robotické taxi společnosti Amazon, určené pro až 4 cestující. Z designového hlediska je vozidlo striktně oboustranně symetrické a může plynule jezdit v obou směrech. Design kombinuje měkké linie a přiznané funkční prvky s kontrastní kombinací pastelové a černé barvy. Autonomie je zajištěna kombinací kamer, radarů a výrazných lidarů. Dle dat výrobce je vozítko schopné až šestnácti hodin provozu díky baterii o kapacitě 133 kWh. Vzhledem k malým rozměrům a systému všech čtyř zatáčecích kol se tak Zoox dokáže pohybovat i v náročnějších podmínkách. V interiéru se nachází dvojice protilehlých sedaček vybavených ovládacími displeji, bezpečnostními pásy, nebo také držáky pití. [21]

Osobní hodnocení

Osobně se mi tento koncept malého autonomního vozítka velmi líbí a myslím si, že toto odvětví má samo o sobě slibnou budoucnost dopravy ve městech třeba i jako doplněk k velkokapacitním vozidlům. Zoox navíc dokázal navrhnout design, který na první pohled komunikuje svou autonomitu a nepůsobí zbytečně agresivním futuristickým dojmem. Design je dle mého názoru čistý a účelný. Použité materiály a barvy působí prémiově, což také napomáhá důvěře uživatelů. Kladně hodnotím také využití systému všech čtyř zatáčecích kol.



Obr. 2.13 – Zoox: exteriér [22]



Obr. 2.14 - Zoox: interiér [23]

Aurrigo Auto-Shuttle

Tento model autonomního mikrobusu byl nasazen v rámci projektu „Jízda budoucnosti“ na pražském a brněnském výstavišti v roce 2023. Konstrukce je navržena pro kapacitu 10 osob (z toho 8 sedících) s vyhrazeným prostorem pro vozíčkáře a nájezdovou rampou. Vozidlo dosahuje maximální rychlosti 20 km/h s dojezdem přibližně 120 km na jedno nabití. Design vozidla je explicitně podmíněn autonomní funkcí. O autonomní řízení se stará kombinace kamer a lidarů. [24]

Osobní hodnocení

Měl jsem to štěstí, že jsem tento mikrobuse mohl tehdy na brněnském výstavišti vidět na vlastní oči. Je zjevné, že jeho design se nesnaží skrýt, že se jedná o autonomní vozidlo. Na druhou stranu na mě působí jako dva odlišné produkty pouze jednoduše spojené do jednoho – běžný mikrobuse a obal, do kterého je zasazen. Tím však karoserie získává na můj vkus až příliš mnoho ostrých hran vystupujících hran. Rozumím, že jelikož jde zatím o vyvíjený koncept, není kladen důraz na vyhlazený celkový vzhled a jde primárně o funkčnost. Navíc narozdíl od například vozítka Zoox, které je provozováno v Americe, je v Evropě, kde je Aurrigo shuttle prezentován, mnohem vyšší požadavek na splnění bezpečnostních norem, takže mě těší, že alespoň v nějaké formě se u nás tyto koncepty mohou vyvíjet a testovat.



Obr. 2.15 - Aurigo Auto-Shuttle [25]

2.3.4 Futuristické vize

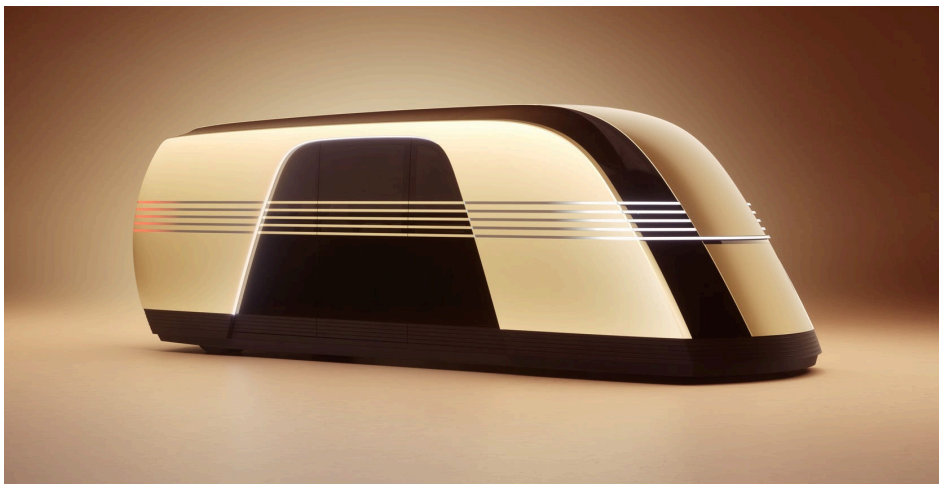
Poslední kategorie je věnována futuristickým vizím a konceptům, které mají zatím před sebou dlouhou cestu do reálného provozu. Tyto vize mohou někdy ukazovat zajímavé a nečekané směry a inovace, ale naopak mohou také ukazovat omezení, kterým je při návrhu potřeba předcházet.

Tesla "Robovan"

Autonomní elektrobuses od firmy Tesla je konceptem představeným v roce 2024. Převážná kapacita je 20 osob, nebo může elektrobuses sloužit k dopravě předmětů. Design celého vozidla je velmi netradiční a nepochybně se vymyká zažité koncepci vzhledu dopravních prostředků. Dominantou jednoduchého tvaru jsou horizontální linie se zabudovanými světly. [26]

Osobní hodnocení

Tesla Robovan je dle mého názoru příkladem formy vítězí nad funkcí je koncept autobusu od společnosti Tesla. Ačkoliv vozidlo působí na první pohled velmi futuristicky, trpí z hlediska designu pro veřejnou dopravu zásadními nedostatky. Vozidlo má poměrně malá boční okna, což u některých cestujících může vyvolat pocit stísněnosti. Neefektivní je rovněž komunikace s okolními účastníky provozu, extrémně nízká světlá výška a zcela zakrytá kola, která by v reálném městském provozu s obrubníky a ostrými zatáčkami vedla ke špatné manévrovatelnosti. Robovan údajně disponuje systémem přizpůsobení výšky vozidla podle vozovky, tato funkce však nebyla zatím reálně prezentována. Také nástupní a výstupní prostor pro větší množství cestujících je u tohoto konceptu velmi omezený. Je samozřejmě jasné, že se jedná o koncept, který měl za cíl spíše zaujmout a ukázat vývoj technologie.



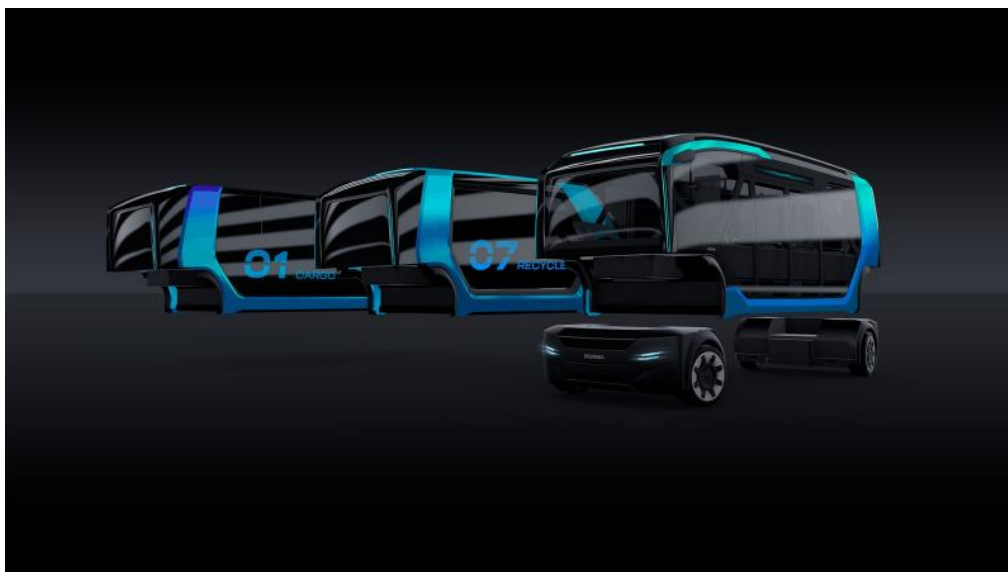
Obr. 2.16 - Tesla "Robovan" [27]

Scania NXT

Scania NXT je koncept plně elektrického autonomního elektrobusu určeného pro zhruba 40 cestujících. Jde o poměrně inovativní koncept, který reaguje na potřeby různorodé městské dopravy. Systém umožňuje na jeden sdílený podvozek nasadit různé moduly – vozidlo se tak může přes den využívat pro přepravu osob a v noci obstarávat na rozvoz zboží nebo svoz odpadu. Exteriér kombinuje hladké linie s rozsáhlými okny. [28]

Osobní hodnocení

Koncept tohoto elektrobusu se mi líbí. Myšlenka modularity je velice atraktivní a pokud by se podařilo koncept dostat do funkčního stavu s rozumnými náklady na provoz – a to zejména na výměnu modulů, může být Scania NXT průkopníkem modulárních městských vozidel.



Obr. 2.17 - Scania NXT [28]

2.3.5 Shrnutí designérské analýzy

Z provedené analýzy je patrné, že většina klasických autobusů s autonomními systémy staví na zaběhlé koncepci vzhledu vozidla. Naopak menší shuttle busy, nebo futuristické vize přináší nové zajímavé prvky, jako je například oboustranná symetrie, netradiční koncepce, lepší zabudování senzorů autonomního řízení, nebo odvážnější tvary. Z celkové analýzy trhu také vyplynulo, že standardní dojezdy městských elektrobusů se pohybují převážně v rozmezí od 50 do 150 km, od toho se pak odvíjí doba provozu na jedno nabití přibližně od 2 do 8 hodin.

2.4 Technická a legislativní analýza

Pro návrh městského autonomního elektrobusu je důležité brát v potaz nejen jeho mechanické komponenty, ale také systémy, které nahrazují lidského řidiče, a legislativní rámec, který tyto systémy reguluje. Tato kapitola shrnuje technologie, legislativy a vyhlášky, které design ovlivňují.

2.4.1 Úrovně automatizace a základní architektura

Z hlediska mezinárodně uznávané stupnice SAE International se autonomní vozidla dělí do šesti úrovní na stupnici od úrovně 0 po úroveň 5. Stupnici úrovní lze interpretovat následovně:

Level 0 (nulová automatizace)

Veškeré úkony řízení provádí řidič. Auta této úrovně sice často disponují varovnými, nebo bezpečnostními systémy jako ABS, nebo asistent jízdy v pruhu, aktivně však tyto systémy do řízení nezasahují. [29]

Level 1 (asistenční systémy)

Vozidla se systémy první úrovně sice stále vyžadují plnou kontrolu řidiče nad vozidlem, nabízí již ale asistenční systémy jako například adaptivní tempomat. [30]

Level 2 (částečná autonomie)

Na této úrovni již vozidla dokážou provádět více různých úkonů řízení zároveň. Mohou ovládat akceleraci, brždění a zatáčení. Řidič však stále musí aktivně sledovat situaci a v případě potřeby zasáhnout. [29][30]

Level 3 (podmíněná automatizace)

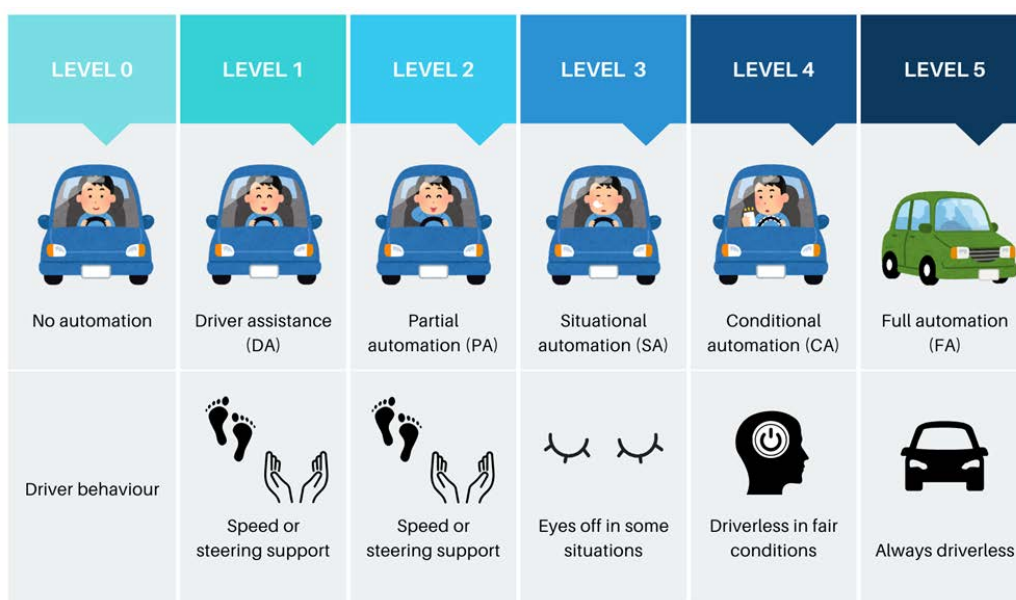
Úroveň tři již nabízí úplné automatizované řízení za určitých podmínek, například na dálnicích. Řidič nemusí aktivně sledovat provoz, ale musí být připraven zasáhnout ve složitých situacích, pokud jej systém upozorní. [29]

Level 4 (vysoká míra automatizace)

Vozidla této úrovně již mohou jezdit sama bez řidiče za specifických podmínek definovaných souborem ODD (operational design domain). Systém řízení si je již schopen poradit i se složitějšími situacemi. Často jsou tato vozidla vzdáleně napojena na kontrolní centrum, které může v situaci, která je pro vozidlo neřešitelná převzít dočasně řízení. [29]

Level 5 (plná automatizace)

Na této úrovni již vozidlo dokáže samo plnit veškeré řidičské úkony a umí řešit složité dopravní situace za jakýchkoliv podmínek. [29]



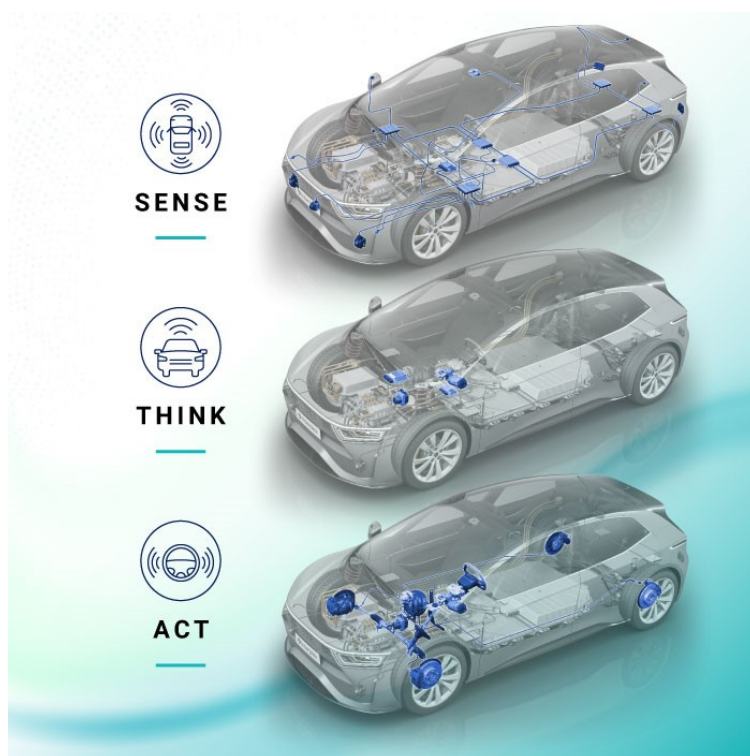
Obr. 2.18 - Úrovně autonomie [29]

Pro návrh autonomního elektrobuse, kterým se zabývá tato diplomová práce je předpokládána dostupná a plně funkční technologie autonomního řízení úrovně 5, tedy plná automatizace. To především proto, že se jedná o vizi do budoucnosti.

Princip fungování autonomního řízení

Princip automatizovaného řízení se typicky skládá ze tří základních funkčních bloků [31]:

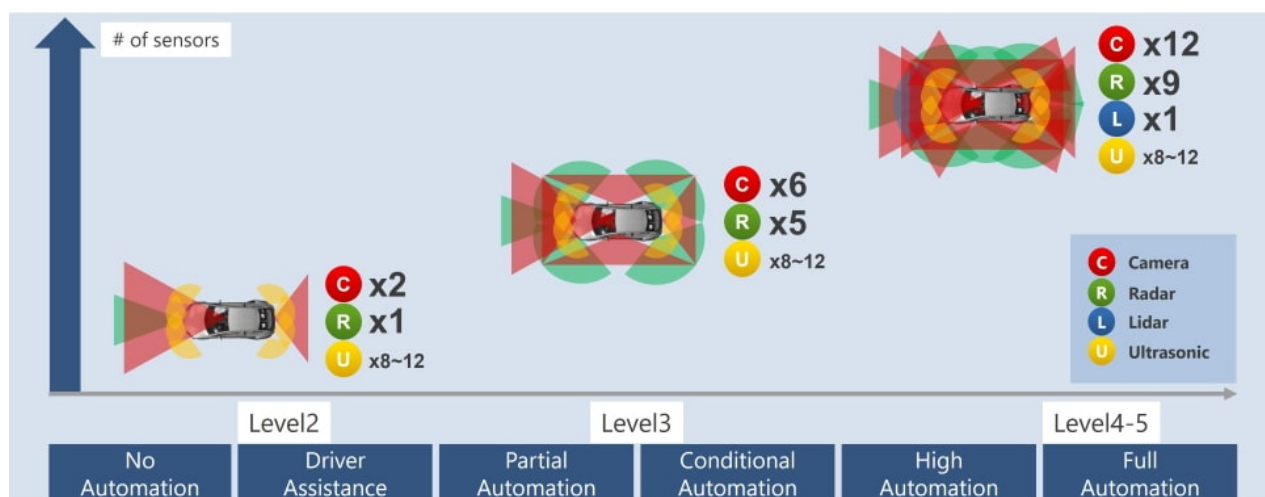
- **Sběr dat (Sense):** Získávání dat o okolním prostředí pomocí senzorů.
- **Rozhodování (Think):** Zpracování získaných informací, plánování trasy a rozhodování o konkrétních manévrech pomocí algoritmů umělé inteligence.
- **Činnost (Act):** Realizace pohybů vozidla (akcelerace, brzdění, zatáčení).



Obr. 2.19 - Vizualizace jednotlivých úkonů autonomního vozidla a částí, které kroky vykonávají [32]

2.4.2 Senzory a sběr dat

Bezpečný provoz v hustém městském prostředí vyžaduje kombinaci senzorů, které vozidlu poskytují vizuální a informační 360 ° pokrytí nezávisle na světelných a povětrnostních podmínkách. Čím vyšší stupeň autonomie vozidla, tím větším počtem senzorů musí disponovat.



Obr. 2.20 - graf vizualizace počtu senzorů v závislosti na úrovni autonomie [33]

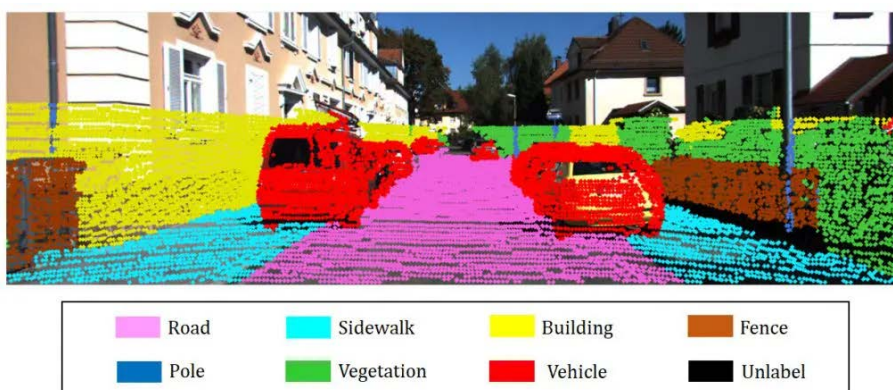
Senzory potřebné pro provoz autonomního elektrobusu jsou:

LiDAR (Light Detection and Ranging)

LiDAR využívá laserové paprsky k měření přesné vzdálenosti okolních předmětů a vytváření detailních 3D mračen bodů (point clouds). Poskytuje vysoce přesná prostorová data, což je základem pro detekci překážek v provozu. Nevýhodou LiDARu je nižší spolehlivost v hustém dešti nebo mlze a jeho vysoká pořizovací cena. [34]



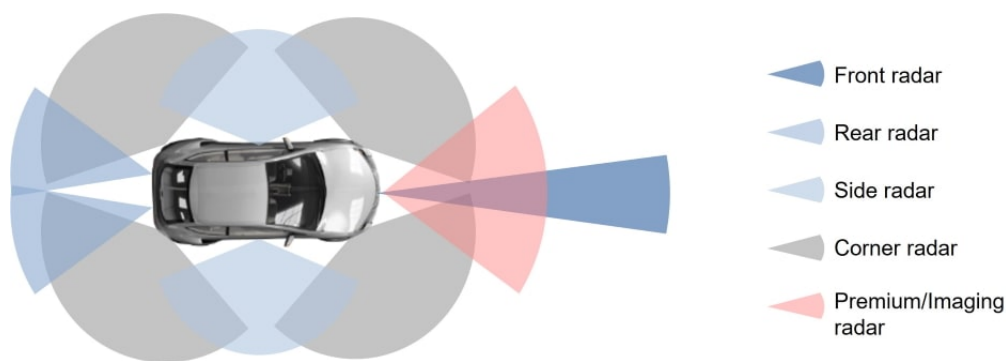
Obr. 2.21 - Umístění LiDARu v čele tramvaje výrobce Škoda Group [35]



Obr. 2.22 - vizualizace dat získaných LiDARem (barevně odlišené jsou jednotlivé překážky a silnice) [34]

Radarové systémy

Radar využívá elektromagnetické vlny pro detekci objektů na různé vzdálenosti a měření jejich relativní rychlosti. Na rozdíl od LiDARu nejsou radary ovlivněny špatnou viditelností, což z nich činí nepostradatelný prvek plně autonomního systému. Nevýhodou radarů na delší vzdálenosti je nízký úhel rozsahu a náchylnost k šumu dat v důsledku falešných odrazů od některých ploch. [36]



Obr. 2.23 - vizualizace umístění radarů na vozidle pro pokrytí 360° rozhledu [33]

Kamerové systémy

Optické kamerové systémy jsou nezbytné pro rozpoznávání prostředí a dotvoření celkového obrazu, který elektrobuses “vidí”. Umožňují klasifikaci objektů, čtení vodorovného značení a detekci barev na semaforech. Kamery jsou podobně jako radary rozmístěny na vozidle tak, aby pokrývaly jeho celkové okolí. [37]

GNSS, odometrie a IMU

Pro přesnou lokalizaci autonomních vozidel v prostředí se běžně využívají satelitní systémy GNSS v kombinaci s měřicími jednotkami a odometrií. Vzhledem k tomu, že běžná GPS může odchylku až několik metrů, jsou data doplňována o mapy s vysokým rozlišením a algoritmy SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). [38]

Výsledek sběru dat

Proces, při kterém řídicí jednotka vozidla (např. pomocí hlubokých neuronových sítí) spojuje data z kamer, LiDARů a radarů do jednoho komplexního a vysoce spolehlivého obrazu reality, se nazývá fúze dat (Sensor Fusion). [39]

2.4.3 Komunikace V2X a integrace do infrastruktury

Aby autonomní elektrobus mohl efektivně fungovat v rámci infrastruktury a provozu města, je praxí, aby byl propojen se svým okolím prostřednictvím komunikačního rozhraní V2X (Vehicle-to-Everything). Vozidlo tak může sdílet informace s okolními zařízeními. Ať už se jedná o ostatní vozidla, chytré semaforey, zastávky, nebo v teorii dokonce i mobilní zařízení chodců, nebo cyklistů. Například zastávka tak může sdílet s blížícím se autobusem třeba informace o počtu čekajících osob a semafor může autobus informovat o aktuálních fázích. Klíčovou funkcí, kterou rozhraní V2X umožňuje, je preference vozidla na křižovatce. Elektrobus blížící se ke křižovatce předá semaforu informace o své poloze, rychlosti a očekávaném čase příjezdu, na základě čehož může semafor například prodloužit fázi zelenou nebo zkrátit červenou. Výsledkem je plynulejší průjezd vozidla, zkrácení cestovního času a úspora energie díky eliminaci zbytečného brzdění a rozjíždění. Technologie V2X tak umožňuje vytvoření propojeného ekosystému chytrého města. [40][41]



Obr. 2.24 - Vizualizace komunikace V2X [41]

2.4.4 Pohon, podvozek a energetika

Podvozek, umístění a dobíjení baterie

Podvozek je základním stavebním kamenem vozidla. U elektrických vozidel, především pak osobních elektromobilů je běžná praxe využití tzv. skateboardové architektury, kdy jsou hlavní komponenty pohonu, a především pak baterie ukryté v podvozku. [42]

Narozdíl od osobních automobilů je však situace u koncepce autobusu jiná, a to z několika důvodů. Především je důležité vzít v potaz, že autobusy určené pro MHD jsou často nízkopodlažní a baterie v podvozku jeho tloušťku minimálně v určité části zvýší a tím také zmenší prostor pro cestující. Dalšími faktory jsou pak bezpečnost, servisovatelnost a možnosti nabíjení. Baterie uložená na střeše elektrobuse je lépe dostupná, servisovatelná a lépe se dobíjí pomocí pantografového systému, který je standardním řešením pro tzv. opportunity charging – krátké vysokovýkonné dobíjení vozidla v průběhu provozu (typicky na konečných zastávkách), díky kterému lze použít menší a lehčí baterii bez snížení denního dojezdu vozidla. V případě nehody je pak díky poloze baterie na střeše menší pravděpodobnost jejího přímého poškození a v případě požáru nebude bezprostředně přímo ohrožovat cestující uvnitř vozidla. V neposlední řadě lze baterii na střeše částečně chladit využitím proudění vzduchu. Uložení baterie na střeše s sebou nese i nevýhody jako je vyšší těžiště a nutnost pevného rámu, aby baterii na střeše unesl. [43][44]



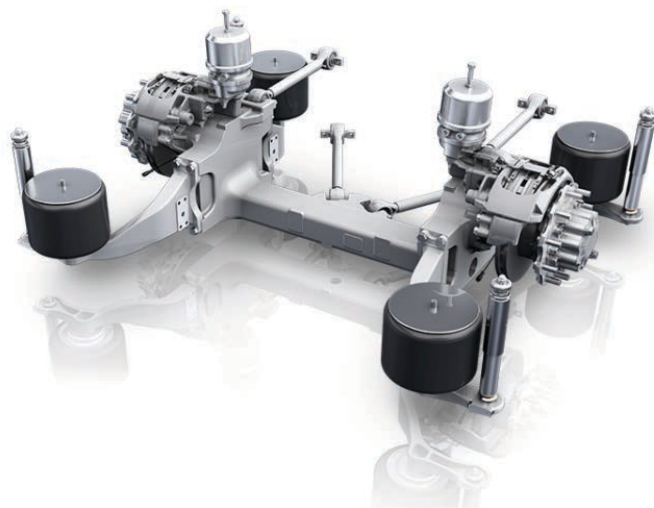
Obr. 2.25 - Pantografové nabíjení [44]

Koncepce pohonu a náprav

Běžná koncepce pohonného systému u většiny osobních silničních vozidel je rozdělení náprav na hnací a hnanou. Přední náprava pak obstarává zatáčení. Také u elektrických vozidel je tato koncepce často využívána. Díky větší jednoduchosti a menším rozměrům komponent se však nabízí nové možnosti. Každá z náprav, nebo dokonce každé kolo může mít svůj dedikovaný elektromotor a také může být dokonce každé kolo zatáčecí. Takové řešení je však značně dražší a konstrukčně náročnější, a proto není u konvenčních elektromobilů tak často využíváno. U městských nízkopodlažních autobusů se však často využívají portálové nápravy, u kterých vzniká prostor pro průchozí nízkopodlažní podlahu mezi koly. Moderní elektrobusey tuto koncepci kombinují s integrací elektromotorů přímo do kol (např. ZF AVE 130), čímž propojují výhody nízkopodlažní konstrukce s nezávislým pohonem každého kola. [45]

U autonomního vozidla úrovně 5 je také nutné využití systému drive by wire, kdy jsou úkony řízení, ovládané čistě elektronickými impulsy bez mechanických úkonů. Tento systém je velice přesný. Vyžaduje taktéž méně prostoru v konstrukci vozidla. [46]

U městských nízkopodlažních autobusů je často využívaným systémem kneeling – pomocí pneumatického odpružení může autobus snížit svou nástupní hranu a umožnit tak lepší nástup do vozidla. [47]



Obr. 2.26 – Nízkopodlažní portálová náprava ZF AVE130 [48]

Elektromotor

Základem pohonu elektrických vozidel je elektromotor. Princip jeho technologie spočívá v přeměně elektrické energie na mechanickou prostřednictvím elektromagnetické indukce. Elektromotor je tvořen dvěma hlavními částmi – statorem a rotorem. Průchodem střídavého proudu vinutím statoru vzniká točivé magnetické pole, které interaguje s polem rotoru a generuje krouticí moment přímo na hřídeli motoru. Důležitým prvkem pohonu je výkonový invertor, který transformuje stejnosměrný proud (DC) z trakční baterie na střídavý (AC) s proměnnou frekvencí a amplitudou, čímž je přesně definován výkon a otáčky motoru. Velkou výhodou využití elektromotorů pro autonomní autobus je jejich přesné ovládání a maximální točivý moment za malých otáček. [49][50]

Brzdy

Brzdy jsou nezbytnou součástí každého vozidla. Přestože elektrická vozidla mohou využívat brzdění samotnými elektromotory – rekuperace, je nutné, aby měla i brzdy pro případy, kdy samotné elektromotory nestačí, například při nouzovém brzdění. [51]

Energetika a baterie

Baterie je v elektrických vozidlech nezbytným komponentem pohonné soustavy. Dodává potřebnou energii nejen elektromotorům, ale také dalším komponentům vozidla a prvkům systému autonomního řízení.

S ohledem na provozní a bezpečnostní nároky elektrobuse je kladen velký důraz na výběr vhodné technologie článků. Z dostupných technologií se pro účel elektrobuse nabízí technologie LFP (LiFePO₄). Tyto baterie neobsahují kobalt, což zvyšuje jejich ekologičnost. Nabízejí stabilní výkon a rychlé nabíjení. Vyznačují se vysokou tepelnou stabilitou a nízkým rizikem samovznícení, což je pro bezpečnost cestujících v autonomním voze bez dozoru řidiče prioritou. [52]

Baterii v elektrobuse je nutné chladit, aby bylo dosaženo jejího optimálního výkonu a bylo předejito přehřátí nebo výrazné degradaci kapacity. Existuje několik způsobů chlazení od proudění vzduchu, přes chlazení integrované v baterii až po separátní dedikované chladicí zařízení. Nezbytným komponentem k baterii je inverter napětí, který mění stejnosměrný proud z baterie na proud střídavý, který je pak dodáván to elektromotorů. [53][54]

Klimatizace (HVAC)

Pro zajištění komfortu přepravovaných osob je nutné, aby elektrobuse disponoval jednotkou pro úpravu místního vzduchu. Tyto jednotky, označované zkratkou HVAC (z anglického heating, ventilation, air conditioning) obstarají buď chlazení v letních měsících, nebo topení v měsících zimních. Moderní HVAC jednotky určené pro elektrobuse umožňují napojení na chladicí okruh baterie a invertoru, díky čemuž může být generované teplo využité k vytápění vnitřního prostoru kabiny. [55][56]

2.4.5 Legislativní rámec a stěžejní normy (výběr)

Zavedení vozidel bez řidiče do běžného provozu v ČR a dalších zemích Evropské unie je striktně podmíněno rozsáhlými legislativními předpisy. Tato kapitola proto definuje schvalovací procesy, bezpečnostní integritu a fyzické limity vozidla dle evropské a české legislativy.

Autonomní provoz a kyberbezpečnost systémů

Prováděcí nařízení komise (EU) 2022/1426: Stanovuje technické specifikace pro schvalování plně automatizovaných vozidel. Vyžaduje implementaci vzdáleného dohledu dle konceptu human-in-the-loop. [57]

UNECE R155 a R156: Povinná certifikace pro kybernetickou bezpečnost a management softwarových aktualizací. [58][59]

Funkční bezpečnost vozidla

ISO 26262: zaměřuje se na funkční bezpečnost silničních vozidel. Jejím hlavním cílem je minimalizovat rizika spojená s poruchami elektrických a elektronických systémů prostřednictvím stanovení požadavků na integritu a procesy pro eliminaci systematických i náhodných poruch. [60]

ISO 21448 (SOTIF): Definiuje bezpečnost v situacích bez poruchy (např. omezení senzoriky za špatné viditelnosti). Vozidlo musí při nejistotě automaticky přejít do režimu minimálního risku (MRC). [61]

Rozměrové požadavky

Fyzické limity vozidla v zemích EU stanovuje Směrnice Rady 96/53/ES. Další parametry pak pro ČR specifikuje Vyhláška 209/2018 Sb.

- **Rozměry:** Maximální šířka 2,55 m, výška 4,00 m. Délka pro samostatné vozidlo max. 12,00 m. [62][63]
- **Manévrovatelnost:** Vozidlo musí opsat dráhu v mezikruží o vnějším poloměru 12,50 m a vnitřním poloměru min. 5,30 m. [62][63]
- **Hmotnost:** Tlak na hnací nápravu max. 11,5 t. Pro elektrobusy platí výjimka – navýšení celkové hmotnosti o hmotnost akumulátorů (max. +2 t) bez snížení užitečné nosnosti. [62]

Osvětlení a světelná signalizace

Světla autonomních vozidel již neplní pouze pasivní funkci zajištění viditelnosti pro řidiče, stávají se důležitým prvkem, který umožňuje komunikaci vozidla s jeho okolím. Osvětlení autonomních vozidel však stále musí splňovat parametry určené normami.

EHK OSN č. 48 a č. 148: tyto normy stanovují parametry pro návrh, prostorové umístění a parametry veškerých vnějších světelných zařízení (světlomety, směrová, brzdová a obrysová světla). [64][65]

SAE J3134: ačkoliv se nejedná o povinnou normu, tento standard řeší problematiku odlišení vozidla řízeného člověkem od autonomního systému. K této signalizaci je využito světel tyrkysové barvy umístěných do předních a zadních světlometů. [66]



Obr. 2.27 - Tyrkysové podsvícení autonomně řízeného vozidla [67]

2.4.6 Ergonomické požadavky a inkluzivní design

Při návrhu plně automatizovaného vozidla pro městskou hromadnou dopravu (vozidla třídy I) je nezbytné dodržovat normy pro přístupnost a ergonomii. Návrh interiéru a uživatelského rozhraní podléhá metodice ISO 9241-210 (Human-centered design), celková konstrukce a bezpečnost se pak musí řídit také homologačním předpisem EHK OSN č. 107. [67][68]

Nástupní prostor a bezbariérovost

Konstrukce: Vozidlo třídy I. (městský autobus) musí mít, pokud je nízkopodlažní, min. 35 % nízkopodlažní plochy pro cestující bez schodů. [68]

Výška nástupu: Max. 340 mm od vozovky. Systém kneeling může umožnit snížení o dalších až 80 mm. [67]

Dveře a rampa pro vozíčkáře: Čistá šířka dveří min. 900 mm. Integrovaná rampa o šířce min. 800 mm, nosnosti 300 kg a maximálním sklonu cca 8 %. [67]

Sedadla

Design vychází ze standardizovaných ergonomických rozměrů 95P.

Výška sedáku by měla být v rozmezí 400–500 mm, hloubka min. 350 mm. Šířka vyhrazeného prostoru pro jednoho cestujícího min. 400 mm. Sedák musí mít sklon 3-5° směrem dozadu. Zádové opěradlo pro městské trasy tak má mít ideálně 100-105° vůči sedáku. [67]

Inkluzivní prostředí HMI (Human-Machine Interface)

Multimodální zpětná vazba: Informace o manévrech a stavu dveří musí být duplikovány. Vizuální signál musí být doplněn zvukovým o frekvenci 800-1500 Hz. [67]

Vizuální přístupnost: Nesmí být použita barva jako jediný nosič informace prvků, které svou funkcí komunikují důležité akce. [67]

Orientace: Interiér musí obsahovat texturované vodící linie a nouzová tlačítka s hmatovým reliéfem a Braillovým písmem. [67]

2.5 Identifikace příležitostí

Častým problémem současných autonomních elektrobusů je jejich vizuální konzervatismus – většinou jde o běžné vozy pouze osazené senzory. Inovační příležitostí je tedy návrh designu, který by sice autonomii komunikoval jako primární funkci, ale namísto pouhého umístění senzorů autonomního řízení na karoserii vozidla se nabízí integrovat a skrýt je přímo do těla elektrobusu a zachovat tak čistý vnější tvar. Absence kabiny řidiče dále otevírá prostor pro nové konstrukční a prostorové uspořádání. V neposlední řadě je nutné, aby vozidlo dokázalo efektivně komunikovat s ostatními účastníky provozu a cestujícími. Důležitost těchto dvou aspektů, tedy srozumitelné komunikace autonomního charakteru vozidla navenek a jeho interakce s okolím i cestujícími, potvrdily také neformální rozhovory s vybranými potenciálními uživateli z okruhu autora. Hlavními příležitostmi této práce je tedy navrhnout design, který tyto získané poznatky využije a nabídne nový koncept vozidla městské dopravy.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

V této kapitole je definována základní klasifikace navrhovaného autonomního elektrobusu, specifikace cílových skupin uživatelů a vymezení trhu. Kapitola také popisuje stanovené konkrétní cíle této diplomové práce.

3.1 Analýza problému

3.1.1 Název produktu a jeho klasifikace

Produktem je městský autonomní elektrobus určený pro systémy hromadné dopravy (MHD). Jedná se o plně elektrické autonomní vozidlo s využitím systémů autonomního řízení úrovně 5 – tedy úplná samostatná autonomie.

3.1.2 Specifikace zákazníka

Zákazníky jsou města a dopravní podniky, jejichž cílem je zajištění spolehlivé, udržitelné a efektivní veřejné dopravy. Pro tyto zákazníky je hlavní, aby byly elektrobusy spolehlivé, náklady na jejich pořízení a provoz ekonomicky výhodné a aby celá infrastruktura dokázala saturovat transportní nároky daného města.

3.1.3 Specifikace spotřebitele

Uživatel je typicky osoba využívající MHD k přesunu mezi dvěma lokacemi. U této skupiny uživatelů je kladen důraz na ergonomii, srozumitelnost ovládacích prvků a vizuální a zvukové komunikace a celkový uživatelský zážitek z jízdy.

3.1.4 Specifikace trhu, ceny a použitých výrobních technologií

Trh

Cílovým trhem je Česká republika a dále také širší region evropských měst s rozvinutou infrastrukturou umožňující provoz autonomních vozidel.

Cena

Odhadovaná cena nového konceptu se může pohybuje v řádech desítek milionů korun, přičemž jednotková cena u malé série (10–30 ks) je odhadována mezi 10 až 20 miliony Kč v závislosti na použitých materiálech a výrobních postupech. Důležitým faktorem, který také může cenu zásadně ovlivnit je také marže prodejce a případné náklady na dopravu, servis a investice do potřebné infrastruktury k provozování elektrobusu.

Technologie

Výroba elektrobusu předpokládá montáž jednotlivých konstrukčních celků (rámu, karoserie, podvozku a interiéru) na nosnou ocelovou rámovou konstrukci. Tento přístup umožňuje efektivní malosériovou výrobu, variabilitu konfigurací a snadnou servisovatelnost. Návrh dále vyžaduje využití pokročilých technologií zajišťujících autonomní provoz – zejména senzorů (LiDARů, kamer, radarů a ultrazvukových senzorů), centrální řídicí jednotky, náprav s elektromotory a baterií.

3.2 Cíl práce

Cílem diplomové práce je navrhnout design městského autonomního elektrobusu, který využívá možnosti plně autonomního provozu a reaguje na potřeby cestujících, prostředí městské hromadné dopravy a aktuální trendy v dopravě.

Dílčí cíle diplomové práce:

- Analyzovat vybrané koncepty a designy městských autobusů, autonomních vozidel a technologií, které využívají.
- Vytvořit návrh exteriéru elektrobusu, který bude respektovat rozměrové, funkční a bezpečnostní požadavky určené pro tento typ vozidla.
- Vytvořit koncepčně rozložení a vybrané prvky interiéru s ohledem na ergonomické požadavky cestujících.
- Zlepšit uživatelskou přívětivost cestujících a ostatních účastníků provozu.

4 KONCEPČNÍ NÁVRH

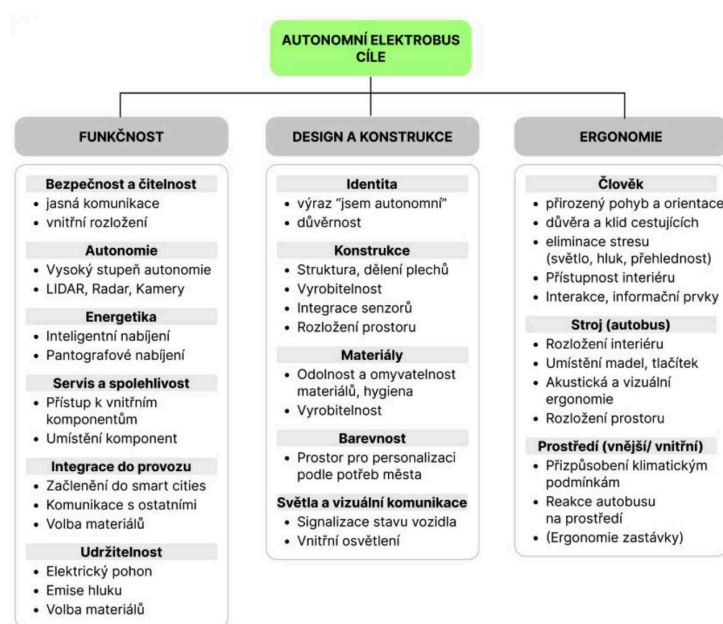
V této kapitole práce jsou popsány a porovnány tři varianty, které byly postupně vytvořeny na základě skic, hmotových studií a předchozího výzkumu a poznatků z analýzy. Kapitola dále zahrnuje technickou a funkční analýzu a výběr varianty, která nejlépe vyhovuje stanoveným parametrům. Na základě této varianty pak je v dalších kapitolách rozpracovávána varianta finální.

4.1 Analýza cílů a specifikace omezení

Cíle a omezení byly zobrazeny ve schématech cílů a omezení (Obr. 4.1 a Obr. 4.2). Byly porovnávány různé parametry na základě jejich důležitosti a náležitosti k návrhu rozdělené do následujících základních kategorií: ergonomie, design a konstrukce, funkčnost.

4.1.1 Specifikace cílů

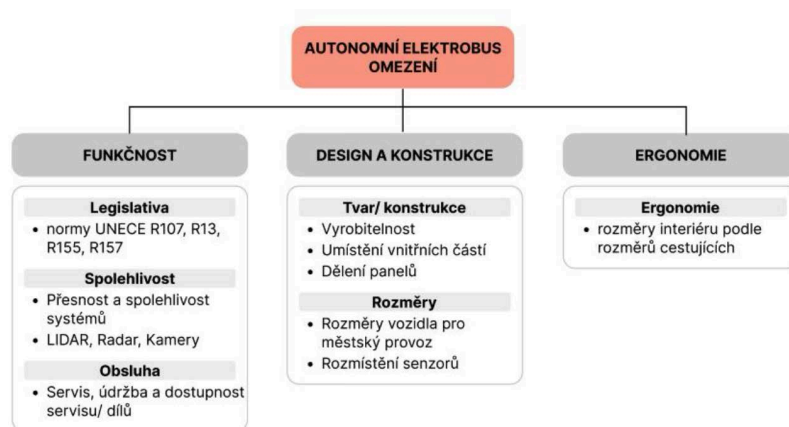
Na následujícím obrázku (Obr. 4.1) je zobrazené první schéma specifikující cíle. Každá z kategorií má své podkategorie, ve kterých jsou dále jmenované konkrétní cíle. Schéma sloužilo ke shrnutí všech cílů, které by mohl návrh splňovat, ne všechny se však nutně promítly do všech variantních skic a řešení.



Obr. 4.4.1 - Schéma cílů

4.1.2 Specifikace omezení

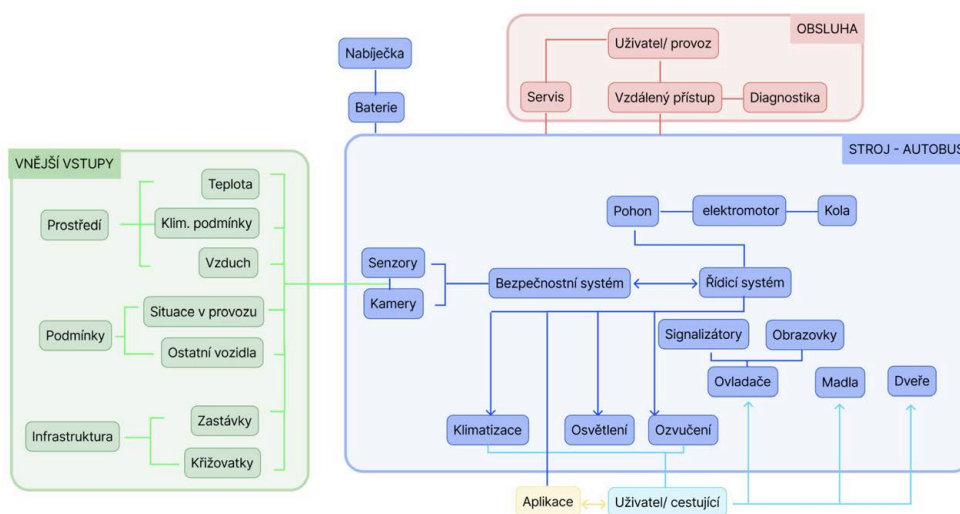
Na dalším obrázku (Obr. 4.2) je zobrazené druhé schéma specifikující omezení návrhu. Každá z kategorií má opět své podkategorie, ve kterých jsou dále jmenované konkrétní omezení.



Obr. 4.4.2 - Schéma omezení

4.2 Technická a funkční analýza

Technická a funkční analýza je zobrazena pomocí schématu tzv. glassboxu (Obr. 4.3). Ten znázorňuje vzájemné vztahy jednotlivých částí a komponent elektrobusu, cestujících, a dalších různých vlivů vnějšího prostředí ovlivňující funkci a provoz elektrobusu.

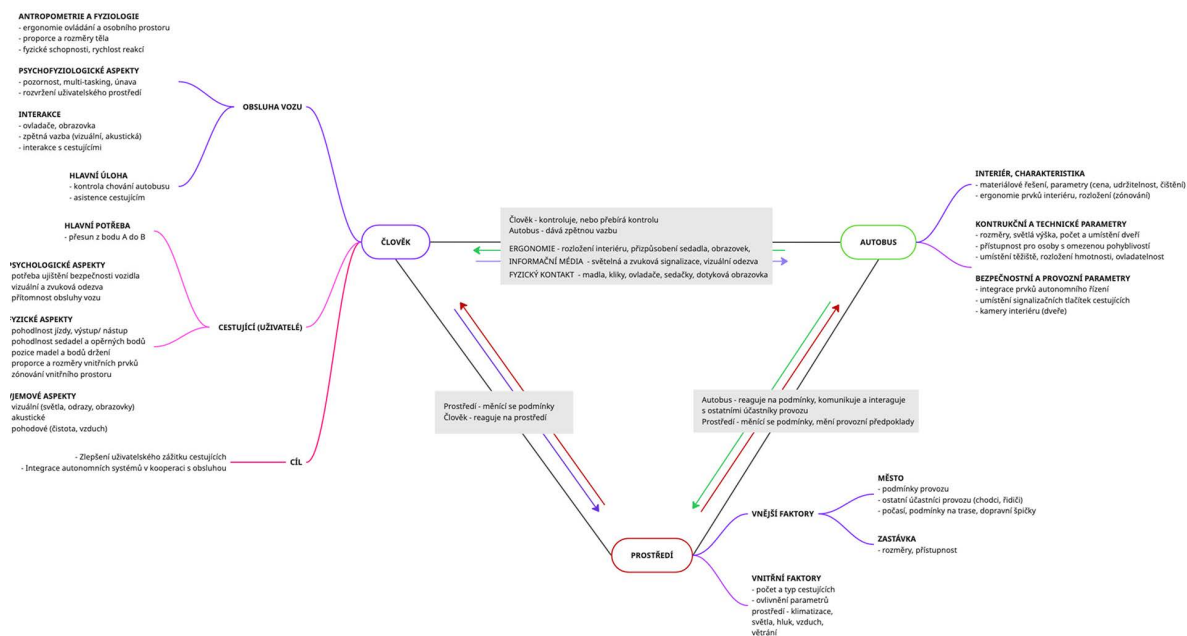


Obr. 4.4.3 - Glassbox

4.2.1 Ergonomické aspekty

Ergoschéma

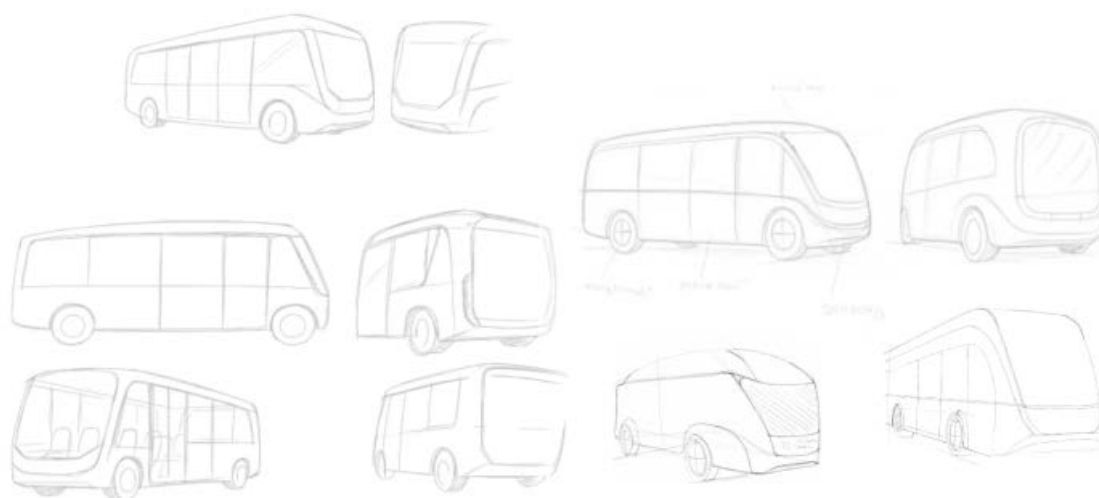
Další částí analýzy je také ergonomické schéma, které se konkrétněji věnuje primárně vztahu Č-S-P, tedy mezi strojem (elektrobusem), člověkem (cestujícím) a prostředím. V ergonomickém schématu jsou definované jednotlivé aspekty každého subjektu a jejich vzájemná propojení a interakce. Z hlediska ergonomie byla návrhu exteriéru a interiéru autonomního elektrobuseu přiřazena ergonomická kategorie I s vynecháním řidičských požadavků, protože je vozidlo autonomní.



Obr. 4.4.4 - Ergonomické schéma

4.3 Průzkum variantních směrů

V první fázi návrhu variantních řešení vznikaly různé skici, nápady a tvarová řešení.



Obr. 4.4.5 - výběr skic z fáze průzkumu variantních směrů

4.4 Návrh variantních řešení

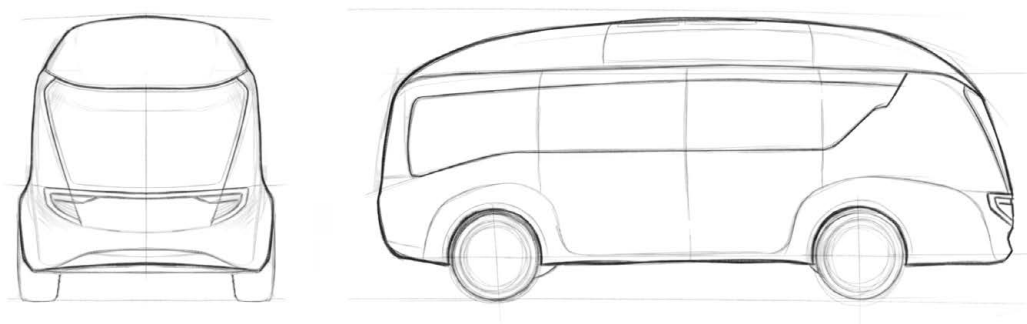
Následující kapitola popisuje tři variantní řešení designu autonomního elektrobusu. Každá z variant měla za cíl přistoupit k návrhu odlišným přístupem, přičemž vybrané směry plynuly převážně z variantních skic a provedené rešerše. Účelem této strategie bylo postupné upřesnění směrů vizuálního přístupu a prozkoumání vybraných.

V této fázi byly specifické parametry elektrobusu určeny pouze orientačně, protože k jejich upřesnění docházelo až později u předběžného návrhu. Tyto parametry zahrnují přesné rozměry, umístění vnitřních komponent a senzorů autonomního systému, rozvor a rozchod kol.

4.4.1 Varianta I.

První varianta, inspirovaná futuristickými vizemi byla zpracována se snahou promítnout do návrhu organický vzhled s využitím měkčích linií a netradičního tvarování. Celkový výraz vozidla tak působí futuristicky a snaží se být kontrastem klasické vizuální identity současných řešení hromadného dopravního prostředku.

Dominantou této varianty je tak právě kontrast mezi ostrými a zaoblenými křivkami, který vytváří dynamický styl celkové kompozice karoserie. Měkké přechody mezi jednotlivými plochami mají také za cíl vyvolat v uživateli pocit přívětivosti, což je, jak bylo zmíněno v rešerši, klíčové pro psychologické přijetí autonomních systémů širokou veřejností. Na druhou stranu je však vhodné se zamyslet, zdali tento fakt platí pro širší cílovou skupinu. Také konstrukce této varianty by byla značně technologicky náročná – komplexní tvarování vnějších panelů by znamenalo zvýšené nároky na výrobu, a případný servis.

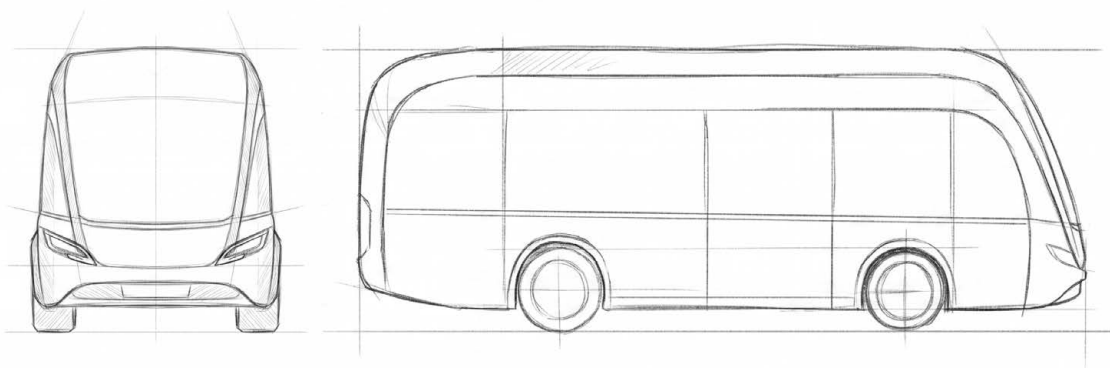


Obr. 4.4.6 - skica varianty I.

4.4.2 Varianta II.

Druhá varianta inspirovaná především tradičnější koncepcí vzhledu autobusů byla zpracována s důrazem na jednodušší vzhled. Hlavním rysem tohoto řešení je tak vizuální jednoduchost a tvarová čistota, která upřednostňuje funkci a efektivitu nad tvarovou složitostí.

Tvar této varianty je definován velkými, méně protvarovanými plochami, což zlepšuje možnosti pro integraci senzorů systému autonomního řízení. Jednoduchost této varianty však představuje i určitá omezení. Tím, že se tvarově drží spíše tradičního vzhledu, nepůsobí celek příliš inovativním dojmem a nemusí být na první pohled jasné, že se jedná o autonomní vozidlo.



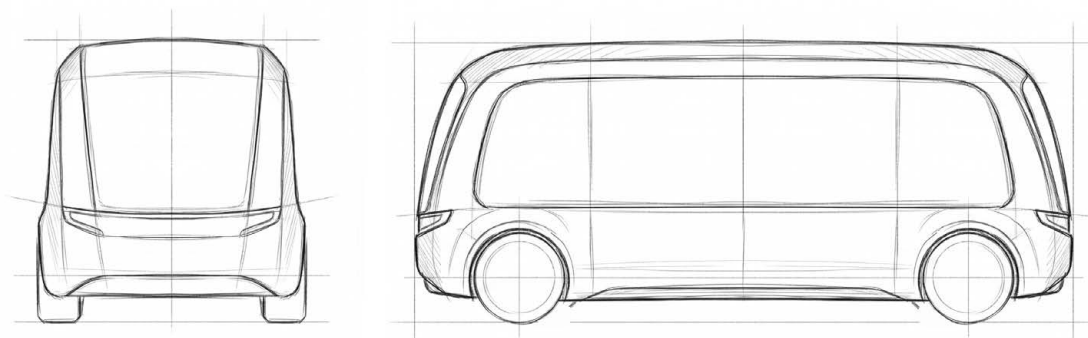
Obr. 4.4.7 - skica varianty II.

4.4.3 Varianta III.

Třetí varianta, inspirovaná vizuálním jazykem menších shuttle busů je založena na přístupu k symetrii v osách podélné i příčné. Výsledný tvar je navržen jako vizuálně oboustranný, čímž se odlišuje od zažitých vzhledů většiny silničních vozidel s definovanou přední a zadní částí. Symetrie podporuje autonomní dojem celého vozidla – svým vzhledem komunikuje, že jeho pohyb není vázán na přítomnost řidiče.

Výhodou tohoto designu je také jeho konstrukční potenciál. Symetrie v obou osách umožňuje vysokou míru unifikace komponentů, což snižuje náklady na vývoj a výrobu forem, zjednodušuje montážní procesy a zefektivňuje logistiku náhradních dílů.

Určitou nevýhodou této varianty je však paradoxně její vizuální čistota a jednoduchost. Absence vizuálních dominant, které obvykle definují identitu vozidla, může způsobit, že bude elektrobus vypadat stroze. Je proto nutné vhodně pracovat s umístěním prvků jako jsou světla, informační panely, nebo barevné řešení.



Obr. 4.4.8 - skica varianty III.

4.5 Analýza variant a výběr nejlepší

Po zpracování tři hlavních variant byly porovnány podle několika zásadních měřítek, která dohromady stanoví variantu nabízející optimální poměr mezi požadovanými parametry. Hodnocení probíhalo na stupnici od 1 do 10, přičemž 1 = nejnižší, 10 = nejvyšší známka.

Hodnocený parametr	Varianta I.	Varianta II.	Varianta III.
Estetika a identita	7	6	8
Integrace senzorů	3	8	9
Konstrukční náročnost	2	5	9
Vnímání autonomie	6	5	9
Funkčnost, ovladatelnost řízení	5	5	9
Originalita návrhu	8	7	5
Celkem (max 60 bodů)	31	36	49

Tab. 4.1 - Srovnání variant

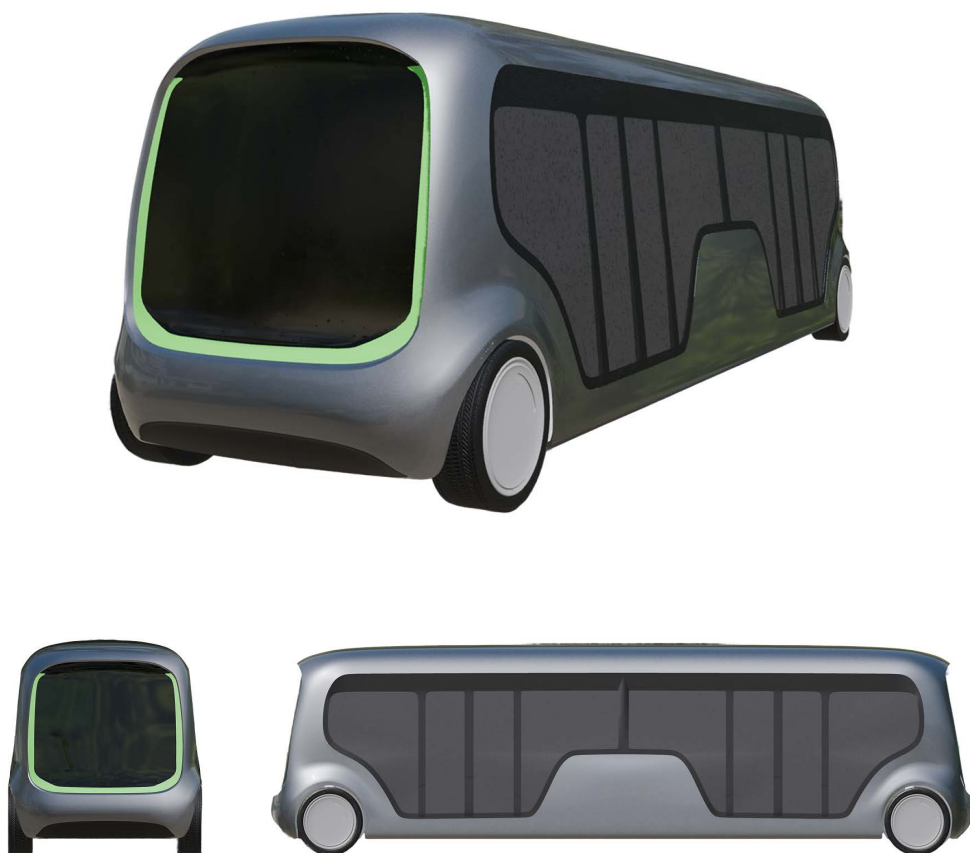
Na základě porovnání vyšlo, že varianta III. odpovídá nejlépe stanoveným parametrům. Zbylé dvě varianty, mají však převahu v originalitě návrhu. Výsledek tohoto srovnání tedy sice nedává jasného favorita, ale ukazuje, že každá z variant má svou silnou stránku. Po zvážení tedy byl přístup k tvorbě finální varianty takový, že sice vychází z varianty III. – tedy nejvýše hodnocené, ale bude si brát inspiraci i ze zbylých dvou variant.

5 PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH

Tato kapitola se věnuje představení předběžného návrhu, který staví na dosavadních návrzích. V této fázi bylo s návrhem experimentováno a byly postupně upřesňovány jeho rozměry, rozmístění vnitřních komponent a dalších specifikací.

5.1 Určení tvarů, rozměrů a materiálů

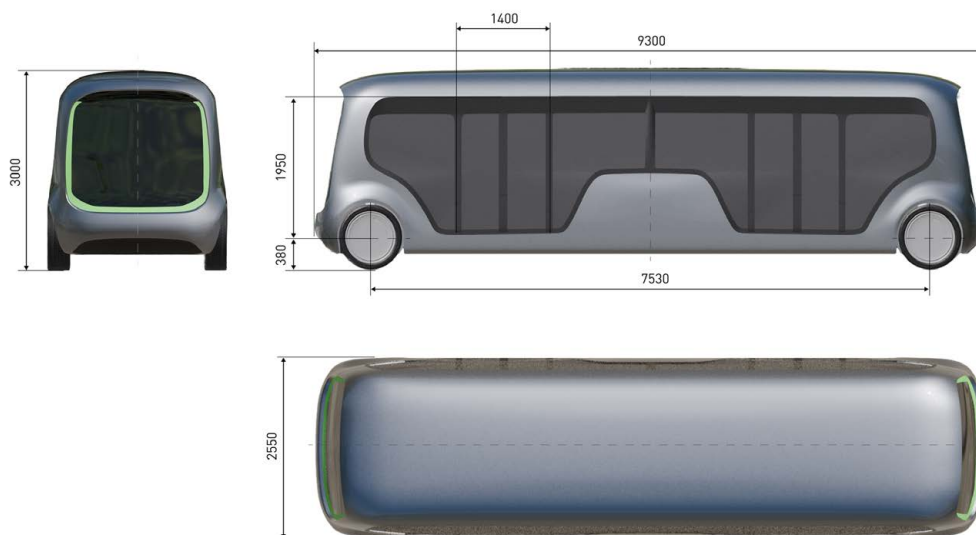
Základní tvar předběžné varianty vychází primárně z logiky varianty III, tedy symetrie ve dvou hlavních osách. Na základě různých pokusů o optimalizaci umístění dveří došlo k posunutí kol až do krajů těla. Také díky tomu působí předběžný návrh více autonomním dojmem. V přední a zadní části jsou umístěna světla, která usnadní na první pohled rozpoznání orientace směru, kterým elektrobuses směřuje. Tento design také na základě různých iterací umožňuje nejlepší rozložení vnitřního prostoru a pozici dveří.



Obr. 5.5.1 základní pohledy na předběžnou variantu

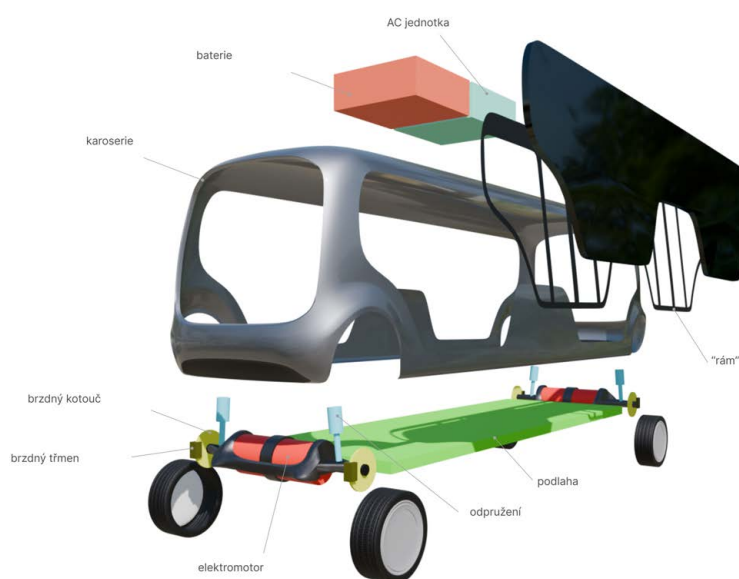
5.2 Základní rozměry

Základní rozměry elektrobusu jsou dané především normami a také vnitřními komponenty. V počátcích byly rozměry spíše orientační, bylo nutné je podrobit kontrole vůči potřebnému prostoru pro cestující v interiéru vozidla.



Obr. 5.5.2 - základní rozměry předběžného návrhu

5.3 Vnitřní komponenty a jejich uspořádání



Obr. 5.5.3 – návrh rozložení vnitřních komponent elektrobusu

Z vnitřních komponent bylo v této fázi důležité uvažovat pro další postup návrhu konkrétně následující komponenty:

- Baterie
- Pohon, nápravy a kola
- HVAC jednotka
- Systémy autonomního řízení

Vzhledem k vzájemné závislosti parametrů komponent bylo nutné určit pořadí ve kterém byly určeny. Dále se v elektrobusech samozřejmě musí nacházet mnoho dalších součástí a komponent, tyto základní jsou však svými rozměry a umístěním natolik důležité, že zásadně ovlivňovaly další směřování návrhu celého designu.

5.3.1 Řešení pohonu

Pro autonomní elektrobuse bylo po důkladné analýze nabídky a technických listů různých výrobců vybráno inovativní řešení využívající samostatných modulů pro pohon každého kola zvlášť od výrobce REECorner. Moduly se skládají z elektromotoru, brzdy, odpružení, řídicí jednotky a montují se na samotný rám vozidla. Pro autonomní elektrobuse je tato koncepce velmi vhodným řešením z několika důvodů. Ovládání modulů je řešeno plně elektricky (steer by wire), nezávislé zatáčení všech čtyř umožňuje malý poloměr zatáčení a dobrou manévrovatelnost, crab-steering (všechna kola zatočí stejným směrem), integraci kneeligu a dobrou servisovatelnost díky možnosti vyjmutí celých modulů. Výsledný rádius zatáčení je pak při uvažovaném rozvoru 7,5m a úhlu zatáčení kol $\pm 25^\circ$ je přibližně 10,5 m, což splňuje podmínky Směrnice Rady 96/53/ES pro městské autobusy, které stanovuje vnější rádius zatáčení maximálně 12,5 m.[62]

Technologie REECorner je v současnosti sériově nasazena u dodávek a lehčích nákladních vozidel, pro segment autobusů zatím existují pouze koncepty. Jelikož tato práce pracuje s konceptem vize, je počítáno s rozšířením této technologie i do segmentu větších, těžších vozidel, včetně elektrobuse. Moduly navíc již dnes splňují výkonové a manévrovací požadavky, jedná se tedy spíše o otázku času a legislativy.

Na základě technických parametrů výrobce a předpokládaného požadovaného výkonu elektrobuse byly specifikovány následující parametry pohonného celku.

Počet poháněných kol	4
Zatáčení, úhel začáteční kola	4WS, $\pm 25^\circ$

Typ elektromotoru	PMSM
Jmenovitý výkon jednoho elektromotoru	90 kW
Celkový výkon pohonu obou náprav	360 kW
Rádus zatáčení kol	$\pm 25^\circ$

Tab 5.1 - Specifikace řešení koncepce pohonu [69]



Obr. 5.5.4 – Modul REECorner [70]

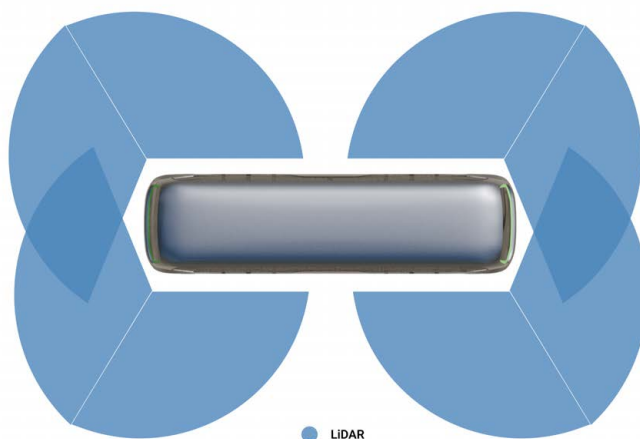
5.3.2 Systémy autonomního řízení

Pro systémy autonomního řízení byla zvolena kombinace senzorů. O snímání 360 stupňů prostoru okolo elektrobuse se bude starat sestava LiDARu doplněných kamerami, z nichž vybrané disponují termovizí a nočním viděním. Data získaná ze senzorů budou doplňovat radary hlídající přesnou vzdálenost od detekovaných překážek.

Umístění senzorů závisí především na požadavcích jednotlivých senzorů a také na prostoru, který předběžný návrh nabízí. Je však nutné zajistit pokrytí celého okolního prostoru elektrobuse bez jakýchkoliv slepých míst. Schématické rozmístění senzorů bylo stanoveno následovně:

LiDAR senzory

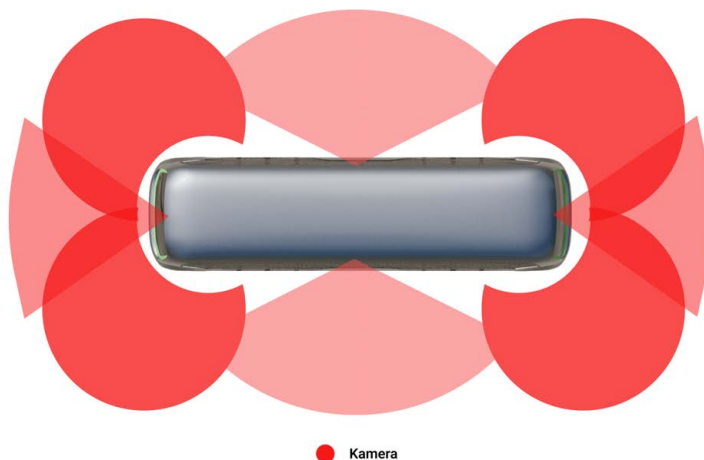
U vozidel takových rozměrů, jako je autobus, není vhodné použití jednoho centrálního LiDAR senzoru na střeše z toho důvodu, že by se nacházel příliš vysoko. Místo toho bylo navrženo rozmístění několika LiDARů do krajních rohů vozidla. Takto bude zajištěno sledování celého prostoru okolo elektrobuse.



Obr. 5.5 - Rozmístění LiDARů

Kamery

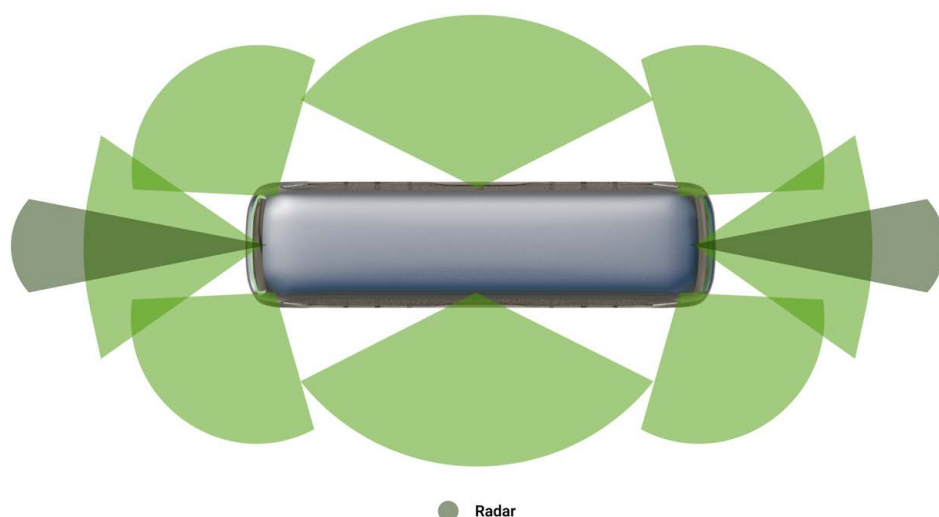
Kamery také musí pokrývat celý prostor okolo vozidla. Nemají však tak velký úhel rozhledu, a tak je nutné využít více jednotek. V přední a zadní části vozidla jsou umístěny termokamery, které zajistí detekci živých objektů za snížené viditelnosti.



Obr. 5.5.6 - Rozmístění kamer

Radary

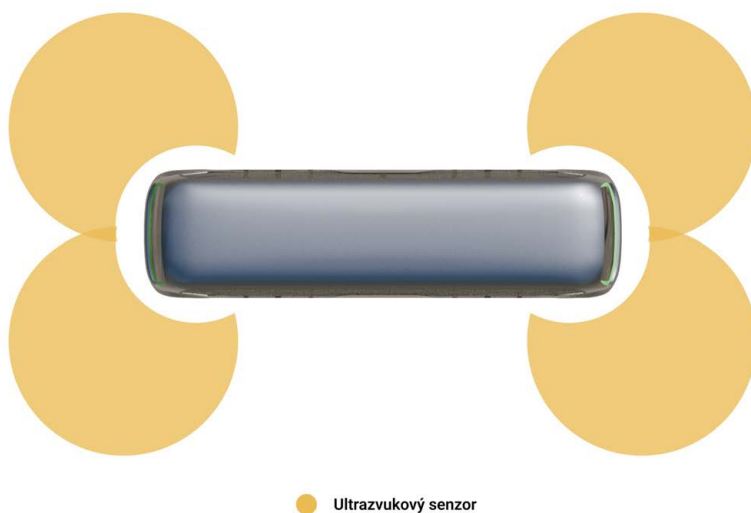
Radary doplňují vidění elektrobusu i za zhoršených vizuálních podmínek. Pro elektrobus bylo navrženo využití kombinace radarů na dlouhou vzdálenost v přední a zadní části a radarů na kratší vzdálenost s větším úhlem záběru sledující zbytek okolí.



Obr. 5.5.7 - Rozmístění radarů

Ultrazvukové senzory

Pro přesné manévrování mezi překážkami nebo při příjezdu na zastávku je sensorika elektrobusu doplněna o ultrazvukové senzory, které budou využity primárně za jízdy při nižších rychlostech. Jsou umístěny v rozích elektrobusu.



Obr. 5.5.8 - Rozmístění ultrazvukových senzorů

5.3.3 HVAC jednotka

Pro místní úpravu vzduchu v prostoru interiéru elektrobusu byla na základě katalogů různých výrobců zvolena jednotka ESA GSA-IE od výrobce Songz. Tato jednotka je určena pro středně velké autobusy a instaluje se na střechu vozidla. [71]

Výkon chladicí kapacity	Až 15 kW
Výkon tepelné kapacity	8 kW
Spotřeba elektrické energie	5–8 kW

Tab. 5.1 - Technické údaje HVAC jednotky ESA GSA-IE [71]



Obr. 5.5.9 - HVAC jednotka ESA GSA-IE [71]

5.3.4 Výpočet kapacity a rozměrů baterie

Pro stanovení potřebné kapacity baterie je nejdříve nutné určit celkovou průměrnou spotřebu elektrické energie. Průměrný provozní výkon byl určen na základě údajů specifikace výrobců, nebo odhadem na základě maximální spotřeby jednotlivých komponent.

Komponenta	Typ napětí	Průměrný provozní výkon
Elektromotory	Vysoké napětí	20 kW
HVAC	Vysoké napětí	5 kW
Autonomní systémy	Nízké napětí	2 kW

Pneumatika (brzdy, kneeling)	Nízké napětí	1 kW
Chlazení pohonného systému	Nízké napětí	1 kW
Světla, obrazovky	Nízké napětí	0,5 kW
Celkem		29,5 kW

Tab. 5.2 - Přepokládaná průměrná spotřeba elektrické energie navrhovaného elektrobuse

Výsledná kapacita baterie pak závisí na požadované době provozu a dojezdové vzdálenosti. Pro městskou hromadnou dopravu v Brně se délka jedné trasy autobusové linky pohybuje v rozmezí přibližně od 2 km do 25 km [72]. Pro délku trasy je tedy ve výpočtu uvažován medián délky trasy linky 12 km. Požadovaná doba provozu je u autonomního elektrobuse specifický údaj. K jejímu stanovení lze přistoupit dvěma způsoby. Prvním přístupem je maximalizace provozní doby na jedno nabití za cenu vyšší hmotnosti baterie a s tím spojených horšími jízdními vlastnostmi vozidla. Druhým přístupem, který počítá s využitím infrastruktury a dostupnosti dalších jednotek elektrobuse je stanovení takové provozní doby, která pokryje časový úsek, ve kterém se ostatní jednotky vozidel mohou dobít na dostatečnou kapacitu a vzájemně se vystřídat. Protože tato práce bere v potaz i provozní podmínky elektrobuse, byl zvolen druhý přístup, tedy stanovení optimální provozní doby. Tato doba pak byla stanovena v rozmezí 4 až 5 hodin provozu, za kterou dokáže elektrobuse při průměrné rychlosti 20 km/h [73] ujet trasu celkem přibližně až 5x (60 km). Je potřeba také počítat rezervu, aby se zabránilo přílišnému vybití baterie a pro případy, kdy bude spotřeba elektrobuse vyšší například důsledkem zimních dní, kdy bude nutné, aby elektrobuse vytápěl vnitřní prostor.

Výpočet potřebné kapacity baterie

Výpočet potřebné kapacity určíme ze závislosti mezi dobou provozu, průměrnou spotřebou elektrické energie a doby provozu.

$$\text{doba provozu (h)} = \frac{\text{kapacita baterie (kWh)}}{\text{průměrná spotřeba elektrické energie (kW)}}$$

Po dosazení známých proměnných a upravení vztahu tak dostaneme teoretickou optimální kapacitu baterie.

$$\text{kapacita baterie (kWh)} = \text{doba provozu (h)} \times \text{průměrná spotřeba elektrické energie (kW)}$$

$$\text{kapacita baterie (kWh)} = 4,5 \text{ h} \times 29,5 \text{ kW}$$

Výsledná teoretická optimální kapacita $\doteq$ 130 kWh.

Pro zpětnou kontrolu výpočtů použijeme porovnání s průměrnou spotřebou elektrické energie elektrobuse Škoda 36 BB na 1 km. [74]

$$\text{Škoda 36 BB průměrná spotřeba el. energie bez klimatizace} = 1,3 \frac{kWh}{km}$$

$$\text{Škoda 36 BB průměrná spotřeba el. energie s klimatizací} = 1,8 \frac{kWh}{km}$$

Výpočet spotřeby elektrické energie návrhu této DP na 1 km:

$$\text{spotřeba} \left(\frac{kWh}{km} \right) = \frac{\text{průměrná spotřeba el. energie (kW)}}{\text{průměrná rychlost} \left(\frac{km}{h} \right)}$$

Uvažujeme průměrnou rychlost elektrobuseu při jízdě ve městě 20 km/h. [73]

$$\text{spotřeba} \left(\frac{kWh}{km} \right) = \frac{29,5 \text{ kW}}{20 \frac{km}{h}}$$

Výsledná vypočtená spotřeba při zapnuté klimatizaci elektrobuseu v je pak 1,475 kWh/km, což odpovídá údajům spotřeby v porovnání s větším dvanáctimetrovým elektrobusem Škoda 36 BB. K výpočtům je však nutné doplnit, že se jedná pouze o orientační předpokládané hodnoty a až testování, nebo detailní výpočet s přesnými komponenty by údaje upřesnil.

Výběr vhodné baterie a její specifikace

Na základě vypočtených parametrů lze již zvolit konkrétní typ baterie. Z katalogů výrobců byla vybrána baterie CATL B161. Důvodem volby je primárně její technologie LFP a s tím spojená dobrá bezpečnost a vysoká životnost. Baterie má jmenovité napětí 3,2 V a kapacitu článku 161 Ah, což odpovídá 515,2 Wh. Hmotnost jednoho článku je 3,1 kg. [75]



Obr. 5.5.10 - článek baterie CATL B161 [75]

Jelikož je jmenovité napětí určené především energeticky nejnáročnějším komponentem – elektromotory, uvažujeme pro výpočet napětí 400 V, což výrobcem stanovené jmenovité napětí. Na základě tohoto údaje lze vypočítat počet článků v sérii. [69]

$$\text{počet článků (n)} = \frac{\text{systémové napětí (V)}}{\text{napětí jednoho článku (V)}}$$

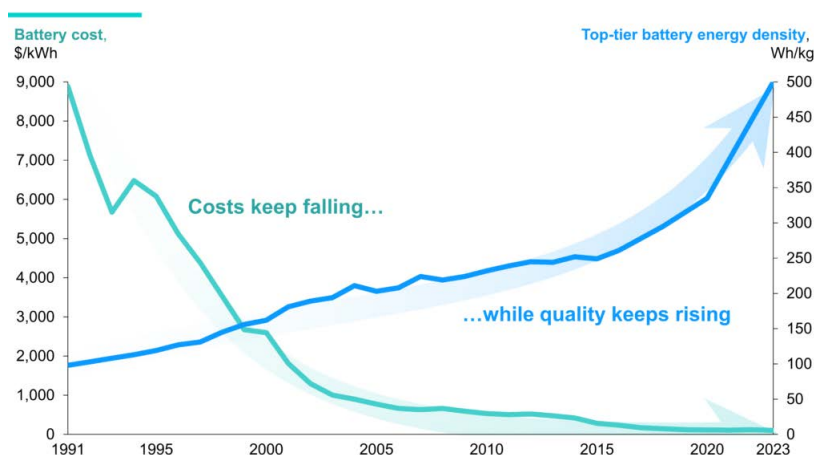
$$\text{počet článků } (n) = \frac{400 \text{ V}}{3,2 \text{ V}}$$

Výsledný počet článků v jedné sérii je tedy 125 ks, což odpovídá kapacitě přibližně 65 kWh. Pro dosažení požadované ideální kapacity použijeme dvě paralelně zapojené větve bateriových článků a získáme kapacitu 130 kWh. Tato hodnota vyhovuje požadované kapacitě a poskytuje případnou rezervu. Bateriový celek je pak uložen v pevném hliníkovém rámu společně s chladicími deskami zajišťujícími optimální provozní teplotu. Baterii lze dobít o 60 % kapacity při nabíjecím výkonu 300 kW za přibližně 15 minut. [75][76]

Objem bateriového celku včetně rámu a chladících desek, vycházející z rozměrů jednoho článku (280 x 82 x 62) mm je přibližně 600 litrů s hmotností přibližně 1000 kg, což je pro elektrobus délky 9 m standardní přijatelná hodnota. [75]

Na závěr tohoto výpočtu je vhodné zmínit, že technologie baterií se velmi rychle vyvíjí a zdokonaluje a jejich cena zároveň klesá. Energetická hustota baterií před 10 lety byla o přibližně 50 % nižší než dnes. V současnosti se také začínají vyvíjet a testovat baterie s pevným elektrolytem (solid-state), který má výrazně vyšší energetickou hustotu, rychlejší nabíjení, vyšší bezpečnost a delší životnost. [77][78]

Lze tak předpokládat, že dojezd navrhovaného elektrobusu může být za pár let několikrát vyšší při stejném objemu baterie.



Obr. 5.5.11 - Graf znázorňující vývoj ceny a energetické hustoty baterií v čase [78]

5.3.5 Stanovení přibližné celkové maximální hmotnosti

Komponenta	Hmotnost (přibližně)
Rám + karoserie + prosklení	5 500 kg
Podvozek + nápravy s elektromotory	2 000 kg
Baterie	1 000 kg

HVAC jednotka, Invertor, Senzory, Řídící jednotka	500 kg
Cestující (při plném obsazení)	Až 3 000 kg
Prvky interiéru (sedadla, madla, světla, obrazovky)	1 000 kg
Celkem	13 000 kg

Tab. 5.3 - Stanovení přibližné hmotnosti elektrobusu

5.3.6 Specifikace rozměrů kol a pneumatik

Pro autobusy je standardním využívaným rozměrem kola R22,5. Pro nízkopodlažní autobusy je vhodnou volbou velikost pneumatiky 275/70 R22,5. Důležitou fyzikální vlastností kola je index nosnosti. Protože byla vypočítaná celková maximální hmotnost 13 tun, tedy 3,25 tuny na jedno kolo, je nutné vybrat pneumatiky s indexem nosnosti minimálně 149. [79][80]

Z katalogu byly vybrány pneumatiky FORTUNE 275/70 R22.5 FC901 CITY BUS ALL, s indexem nosnosti 152, aby byla zajištěna rezerva pro bezpečnost. Tato pneumatika je záběrová celoroční, tudíž vhodná pro hnané nápravy městských autobusů a celoroční provoz. [81]



Obr. 5.5.12 - Pneumatika Fortune 275/70 R22,5 [81]

5.4 Odhad výrobních a provozních nákladů a objemu výroby

Odhad výrobních nákladů

V následující tabulce (Tab. 2 – odhad výrobních nákladů) byly sepsány jednotlivé části a komponenty a jejich jednotlivé ceny. Odhad celkové ceny pro prototyp je od 6 mil. Kč do téměř 16 mil. Kč. A za malou sérii prvních kusů od 5 mil. Kč do 12 mil. Kč.

Komponenta	Cena (Kč)
Rám + karoserie	800 000 – 1 000 000
Podvozek + nápravy s elektromotory + kola	2 500 000 – 3 500 000
Baterie + Invertor	2 000 000 – 3 000 000
Systémy autonomního řízení	1 500 000 – 3 500 000
Elektroinstalace	200 000 – 500 000
HVAC jednotka	200 000 – 400 000
Prvky interiéru (sedadla, madla, světla, obrazovky)	200 000 – 600 000
Vývoj, testování a certifikace	5 000 000 – 10 000 000
Montáž	300 000 – 1 000 000
Celkem (prototyp = cca. + 30 %)	12 700 000 – 23 500 000
Celkem (sériová výroba)	16 510 000 – 30 550 000

Tab. 5.4 - Odhad výrobních nákladů

Odhad provozních nákladů

Provozní náklady lze přibližně stanovit na základě vypočítané spotřeby elektrické energie, aktuálních cen elektřiny a odhadu servisních a provozních nákladů. [82]

Celkově lze odhadovat, že autobus najede až 90 tisíc km ročně. Denně totiž může ujet až 300 km a na silnicích stráví přibližně 85% dni v roce (při uvažování údržby, servisu a revizí).

Položka	Náklad na 1 km
Elektrická energie	6 Kč (při 3,3 Kč za kWh)
Servis, údržba, pneu	4 Kč

Dispečink, depo, vzdálený dohled	2 Kč
Celkem cena nákladů na 1 km	12 Kč
Odhadovaná cena provozu za 1 rok (90 000 km)	1 080 000 Kč

Tab. 5.5 - Odhad provozních nákladů

6 DETAILNÍ NÁVRH

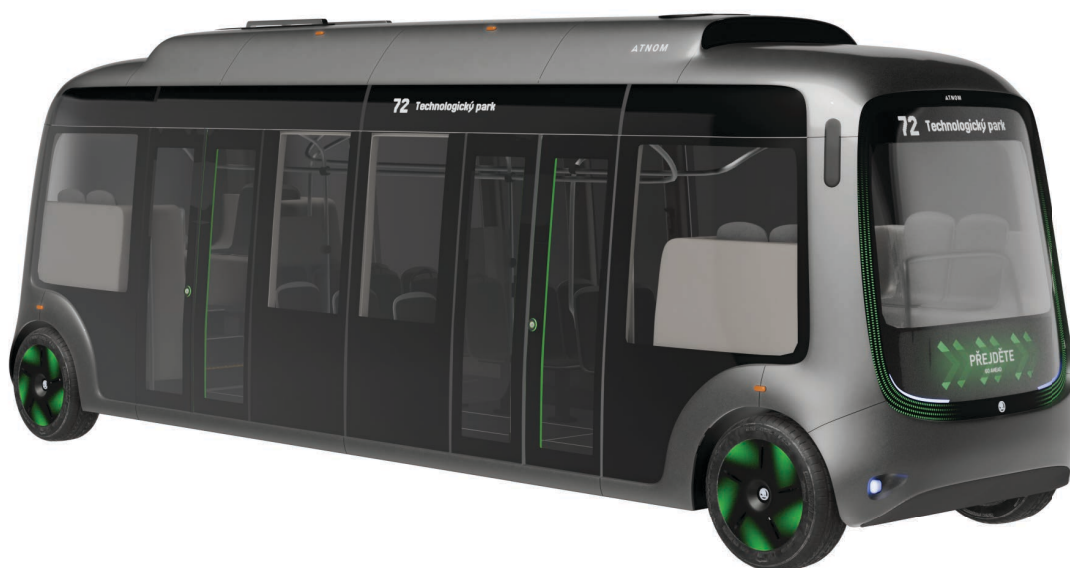
Tato kapitola popisuje řešení finálního návrhu autonomního elektrobusu. Kapitola se zabývá faktory technického, ergonomického a estetického hlediska. Řešena je také stránka udržitelnosti a ekonomických vlivů návrhu.

6.1 Tvarové řešení

Tvar finální varianty je podmíněn hlavně rozložením, charakteristikami a prostorovými nároky vnitřních komponent, které byly podrobně specifikovány v předchozí kapitole. Dále je tvar navržen s ohledem na podmínky, ve kterých bude autobus provozován a způsob kterým bude vyráběn. Tímto byl tak stanoven rámec, ve kterém vznikl prostor k tvorbě tvarování karoserie a těla elektrobusu tak, aby odrazil požadavek na atraktivní, líbivý a uživatelsky důvěryhodný tvar.

6.1.1 Perspektivní pohled

Celkový tvar elektrobusu je tvořen převážně hladkými křivkami bez výraznějších designových prvků. Tato logika je použita primárně z toho důvodu, aby elektrobus nepoutal pozornost na své konkrétní tvarové prvky, ale primárně na prvky komunikační – světla a led panely. Měkké křivky také nepůsobí agresivně a podporují důvěru mezi vozidlem a uživatelem.



Obr. 6.6.1 - Perspektivní pohled na finální variantu

6.1.2 Čelní pohled

Dominantami předního pohledu jsou digitální světelný pás, který vede po obvodu čelního prosklení a displej, který slouží k cílené komunikaci úkonů vozidla. Více o funkčnosti těchto panelů je uvedeno v kapitole 6.2.6 – Funkční prvky. Informace o lince jsou umístěny na standardním místě, tedy v horní části předního prosklení. Ve spodní části jsou umístěna mlhová světla a uprostřed nárazníku je připraven prostor pro připevnění registrační značky.

Tvar karoserie se směrem vzhůru mírně zužuje, což vizuálně snižuje těžiště vozidla. Pro splnění legislativních standardů EHK OSN jsou na nejvyšších a nejširších bodech vozidla umístěna obrysová světla pro identifikaci za snížené viditelnosti.



Obr. 6.6.2 - Čelní pohled na finální variantu

6.1.3 Boční pohled

Boční pohled na elektrobus odhaluje jeho celou siluetu, jejímž hlavním znakem je tvarová symetrie podél příčné osy vozidla. Dělení karoserie je navrženo s ohledem na optimální technologickou proveditelnost a zabudování vnějších prosklených panelů.

Dominantou nástupní strany je prosklená plocha, do které je integrována dvojice dvoukřídlých předsuvných dveří s tlačítky. Velké prosklení maximalizuje vizuální propojení interiéru s exteriérem a má za cíl eliminovat pocit stísněnosti cestujících. V horní části bočního prosklení je umístěn v celé délce informační panel pro zobrazení trasy a doplňkových informací o spoji.

Senzory potřebné pro autonomní řízení jsou integrovány do prosklených ploch a bočních sloupků.

Kola jsou umístěna v krajích vozidla, což optimalizuje využití vnitřního prostoru pro stojící i sedící pasažéry, přispívá k lepší distribuci hmotnosti a společně s menším rádiusem zatáčení zlepšuje jízdní a manévrovací vlastnosti vozidla oproti klasickým autobusům. Kola jsou opatřena kryty esteticky doplňujícími celou estetiku vozidla. Vzhledem k pozici kol je kladen důraz na strukturální pevnost podvozku.



Obr. 6.6.3 - Boční pohled na finální variantu

6.1.4 Zadní pohled

Zadní strana elektrobusu je díky jeho symetrii vzhledově stejná jako přední. Z důvodu bezpečnosti a jednoznačné čitelnosti orientace vozidla v silničním provozu se však zadní světelný pás stává prvkem komunikace s vozidly za elektrobusem a tomu je přizpůsobena i jeho funkce. Intenzita a zbarvení se mění podle aktuálního stavu jízdy elektrobusu. Blíže je tato logika popsána v kapitole 6.2.6 – Funkční prvky.



Obr. 6.6.4 - Zadní pohled na finální variantu

6.1.5 Pohled shora

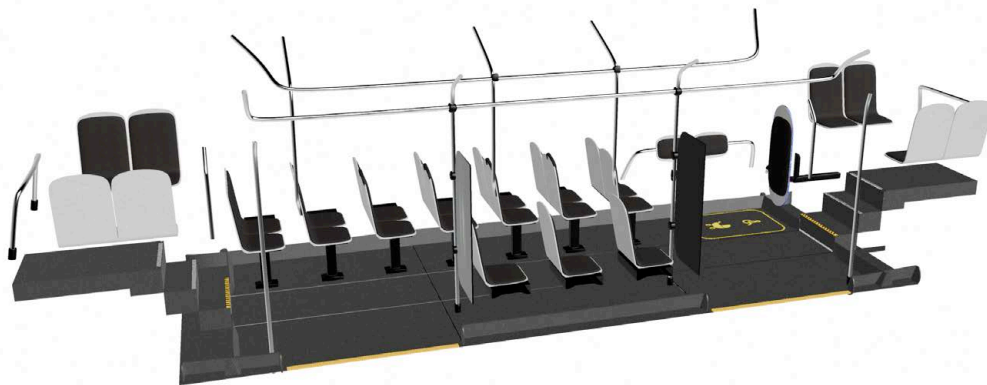
Pohled shora ukazuje důležité funkční prvky elektrobusu. V levé části pohledu se nachází kontaktní plochy pro pantografové nabíjení. V pravé části pohledu jsou pak vývody ventilátorů HVAC jednotky. Z tohoto pohledu je také viditelný konstrukční záměr a sice to, že šířka vozidla je konstantní po celé jeho délce. To je důležité pro eliminaci mezery mezi nástupištěm zastávky a nástupní hranou elektrobusu.



Obr. 6.6.5 - Pohled shora na finální variantu

6.1.6 Interiér

Interiér elektrobuse je navržen pro optimální podíl sedících a stojících pasažérů. V prostoru se celkem nachází 25 sedadel, z toho 4 jsou umístěny ve vyvýšených místech nad nápravami a nejsou proto oproti zbytku bezbariérová. Ve zbylém prostoru o ploše přibližně 10 m² pak může při uvažování 4 cestujících na m² stát pohodlně přibližně 40 cestujících. [83] Celková transportní kapacita vozidla je tak 65 cestujících, nebo 61 cestujících a jedna osoba na vozíčku/ kočárek. Po celé délce střední části vedou horizontální madla uchycená na madlech vertikálních. Nástupní hrany a hrany schodů jsou opatřeny protiskluzovými plochami s vizuálním označením. U dveří jsou umístěny tyče pro asistenci při nastupování nebo vystupování. Místo pro vozíčkáře a kočárek je graficky vyznačené a vybavené opěrnou plochou, bezpečnostním pásem a sklápěcí loketní opěrkou. V tomto místě se také nachází dvě opěrky pro cestující využívající tento prostor, pokud v elektrobuse necestuje osoba s vozíčkem, nebo kočárkem. Ergonomie interiéru je popsána v kapitole 6.3 - Ergonomické a bezpečnostní řešení.



Obr. 6.6.6 - Interiér finální varianty

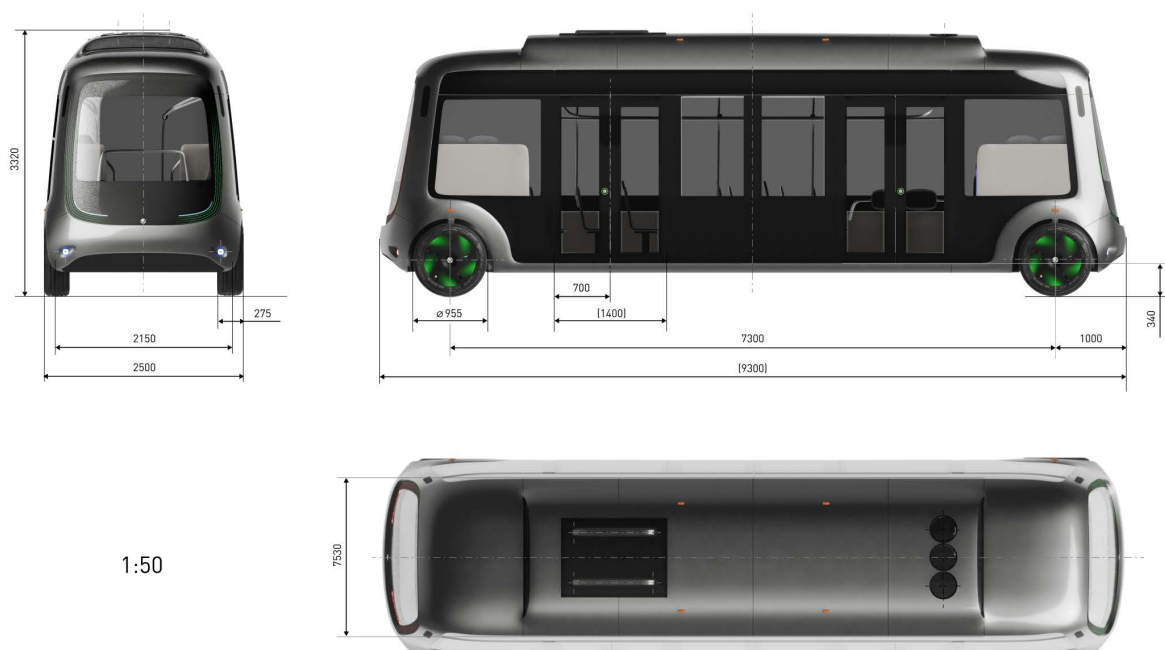
Ve stropním prostoru je zabudované světlo vedoucí po celém jeho obvodu. Pod světlem je umístěný panel s obrazovkami poskytující potřebné informace pro cestující. Ve sloupcích jsou pak zabudované vývody HVAC jednotky a reproduktory.



Obr. 6.6.7 - Pohled do interiéru zespodu

6.2 Konstrukční návrh

6.2.1 Základní rozměry



Obr. 6.6.8 Základní rozměry finální varianty [1:50]

6.2.2 Konstrukce vozidla

Rám

Základem celé konstrukce elektrobusu je rám. Jde o svařovanou konstrukci z ocele vyšší pevnosti. Rám zajišťuje pevnost vozidla a jsou na něj upevněny další části a komponenty. V místech uchycení těžkých komponent je vhodné, aby byly profily rámu zesílené.



Obr. 6.6.9 - Rám finální varianty

Podvozek, pohonné moduly a vnitřní komponenty

Vzhledem k tomu, že je elektrobus koncipován jako nízkopodlažní, je celý podvozek navržen tak, aby měl co nejmenší výšku, ale zároveň splňoval předpoklady pevnostních požadavků. Pohonné moduly jsou připevněny k rámu a k těm je pak připevněn pneumatický systém kneelingu. Vnitřek podvozku je vyplněn pěnou, která plní funkci odhlučnění interiéru. V podvozku je také ukrytá rampa pro nástup osob s omezenou pohyblivostí. Na horní části rámu jsou uloženy baterie, HVAC jednotka, řídicí jednotka, invertor, kontakty pro nabíjení a další komponenty. *(pozn. 3D modely pohonných modulů a HVAC jednotky byly pro svou komplexnost vytvořeny pomocí generativního nástroje, jelikož jejich účel pro tuto práci je pouze ilustrovat tvarové rozměry a vzhled. Jedná se o jediné generované modely prezentované v této práci.)*



Obr. 6.6.10 - Rám s nápravami a podlahou finální varianty

Karoserie

Dále je na celou konstrukci umístěna karoserie. Ta je rozdělena na jednotlivé části. Místa rozdělení jsou určena na základě konstrukčního úsudku pro vhodnou montáž a zapuštění míst senzorů v A-sloupcích a bočních světel. Střešní panely jsou pak rozdělené na více částí tak, aby se daly v případě potřeby servisu vnitřních komponent demontovat.



Obr. 6.6.11 - Dělení karoserie finální varianty

Interiér, prosklení, dveře, senzory

Do vnitřku elektrobuse je instalován interiér, karoserie je osazena prosklením a do těla jsou namontovány světla a senzory autonomního řízení.



Obr. 6.6.12 Postup konstrukce interiéru a vnějšku finální varianty

Kola

Na závěr jsou na pohonné moduly připevněna kola.



Obr. 6.6.13 - Výsledná konstrukce finální varianty

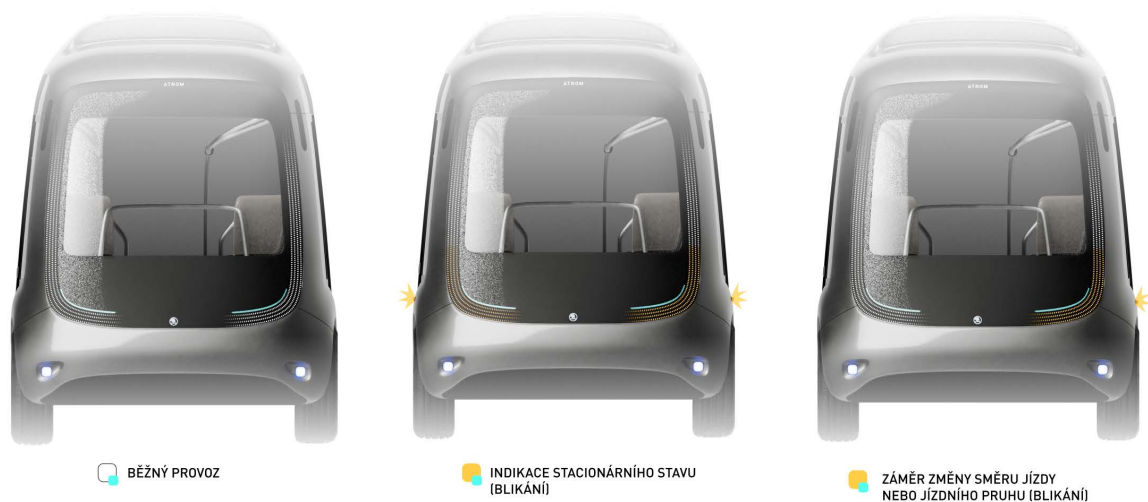
6.2.3 Funkční prvky

V této kapitole jsou podrobněji popsány funkční prvky elektrobusu. Každý z prvků plní svou roli pro úplné a správné fungování a provoz autonomního elektrobusu.

Světla

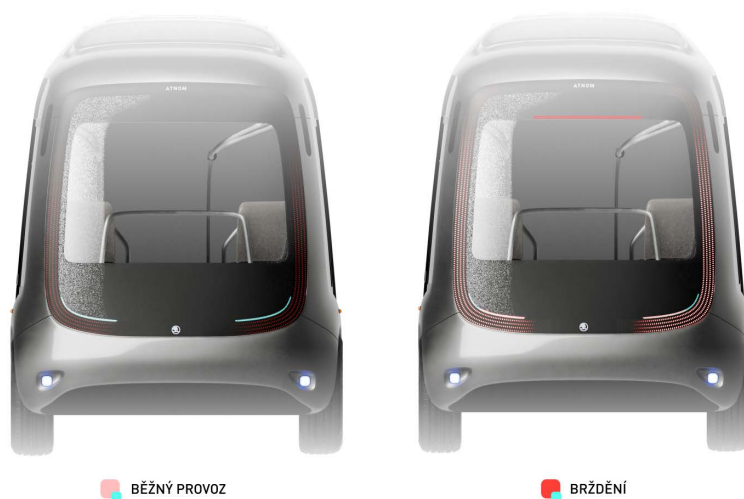
Elektrobus, jako každé silniční vozidlo, musí splňovat normy pro vybavenost světly denního a nočního svícení a mlhovkami.

Hlavní přední světla jsou provedena minimalisticky a využívají pokročilou laserovou technologii pro svícení bez oslňování protijedoucích řidičů. Světla plní také další funkci a tou je zbarvení do tyrkysové barvy podle doporučení SAE J3134. Světelný pás vedoucí po obvodu předního okna a boční světla jsou pak využity k signalizaci záměru změny směru jízdy nebo jízdního pruhu a pro blikání při stacionárním stavu elektrobusu.



Obr. 6.6.14 - Logika stavů předních světel

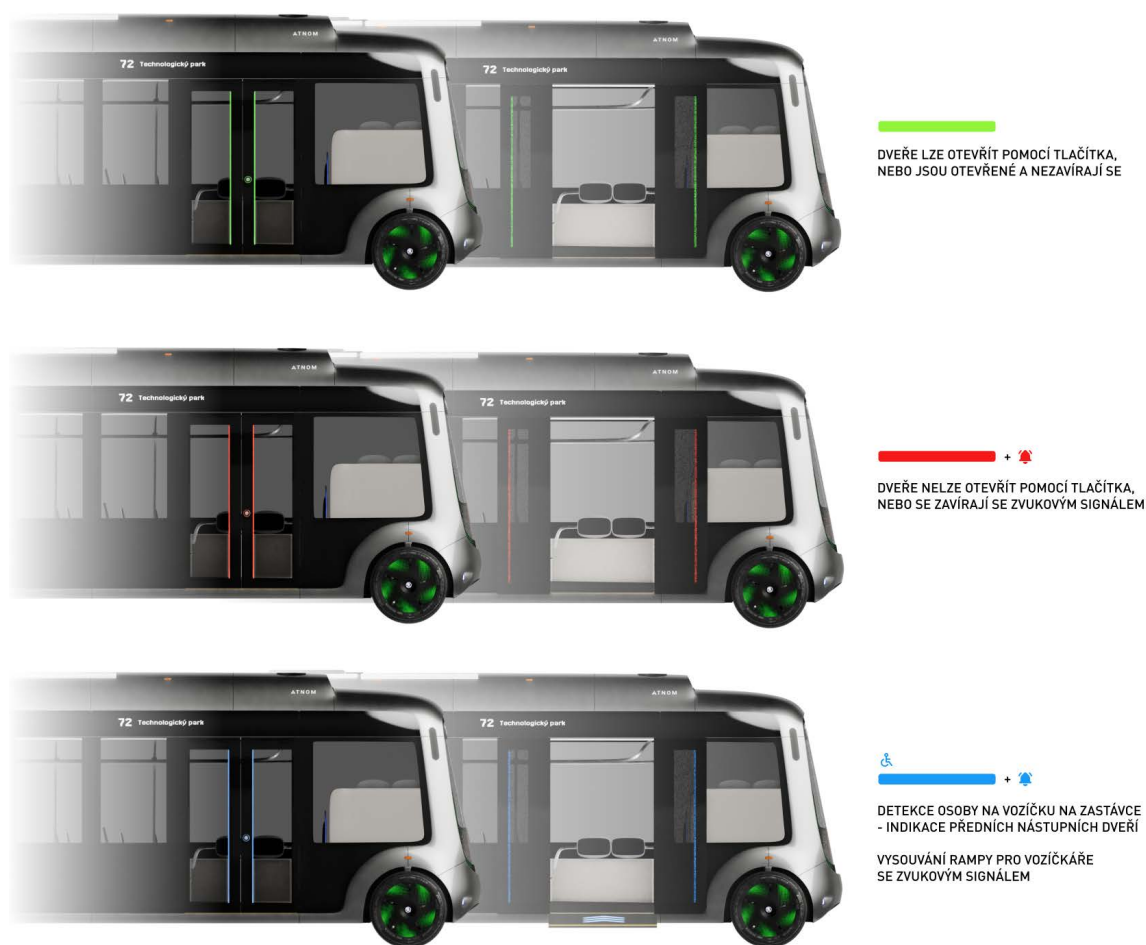
Zadní světla pak při běžném svícení svítí tyrkysově a doplňkově se rozsvěcují červeně v případě, že elektrobus začne brzdit. Tento systém doplňuje zadní světelný pás, který při běžné jízdě i přes den svítí na minimální obrysovou intenzitou, čímž zvyšuje čitelnost rozměrného vozidla. Při rekuperaci nebo mechanickém brzdění pak pás plynule zvyšuje svůj jas úměrně k intenzitě zpomalení. Tato dynamická indikace je velmi důležitým prvkem: vzhledem k vysoké hmotnosti elektrobusu a silnému brzdnému účinku rekuperujících motorů může i drobné snížení akcelerace znamenat prudší zpomalení, než na jaké jsou řidiči osobních aut jedoucích za ním zvyklí.



Obr. 6.6.15 - Logika stavů zadních světel

Nástupní dveře

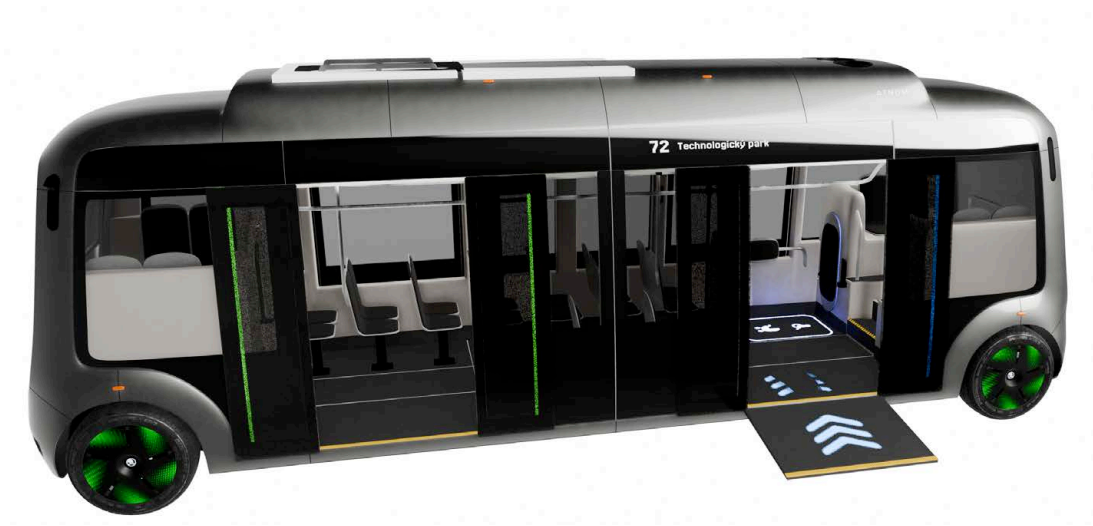
Dveře, kterými elektrobus disponuje jsou konstrukčně převzaty od řešení, která používají především tramvaje. Jejich výhodou oproti klasickým křídlovým dveřím autobusů jsou menší prostorové nároky a vyšší bezpečnost osob v interiéru, jelikož se otevírají směrem podélně s vozidlem ven a nehrozí tak kolize s cestujícími, kteří stojí v prostoru dveří. Při využití tohoto typu dveří je však nutné zajistit rovnou plochu vnějšího tvaru karoserie v prostoru, kam se dveře otevírají. V tomto prostoru také nesmí dveře kolidovat s koly ať už v přímé, nebo vytočené poloze. Dveře jsou vybaveny světelnou signalizací, která společně se zvukovým signálem s předstihem informuje cestující o úkonu otevírání, nebo zavírání dveří. Toto podsvícení také informuje osoby s tělesným postižením, které přijíždějící elektrobus detekuje na zastávce, kterými dveřmi s výsuvnou rampou mohou nastupovat.



Obr. 6.16 - Logika funkčnosti dveří

Plošina pro vozíčkáře

Plošina pro vozíčkáře se vysune na zastávce v případě, že vůz detekuje pokyn osoby na vozíčku v zastávce. Plošina je dle norem opatřena protiskluzovým povrchem a vnitřním světlem ve tvaru šipek, které je použito také v interiéru. Účelem těchto světel je vizuálně upozornit cestující, kteří se nachází v prostoru trasy a místa pro vozíčkáře, aby toto místo uvolnili a umožnili průjezd. Tuto roli často zastává řidič autobusu, když plošinu manuálně vyklápí, proto je nutné, aby tuto roli systémy elektrobuse zastaly. Rozměry plošiny a její úhel náklonu jsou blíže specifikovány v kapitole 6.3.1 - Ergonomie nástupu do vozidla.



Obr. 6.17 - Vysunutá plošina pro vozíčkáře

Komunikační panely a HMI (Human-Machine Interface)

Jak bylo již zmíněno, informační panely jsou hlavním komunikačním prostředkem elektrobuse s jeho okolím. Elektrobuse tak může dávat informace okolním řidičům nebo chodcům co je jeho aktuálním záměrem a co se chystá udělat. Zároveň s panelem se pak na chvíli změní i barva světelného pásu. Je nutné zmínit, že se v tomto stavu jedná pouze o koncept vize do budoucna, kdyby legislativa povolila chvilkové využití jiných, než bílých a oranžových barev předních světel.



 DETEKCE A POUŠTĚNÍ CHODCE NA PŘECHODU



 ROZJEZD ZE STACIONÁRNÍHO STAVU
(NAPŘÍKLAD VÝJEZD ZE ZASTÁVKY)



 BRZDĚNÍ

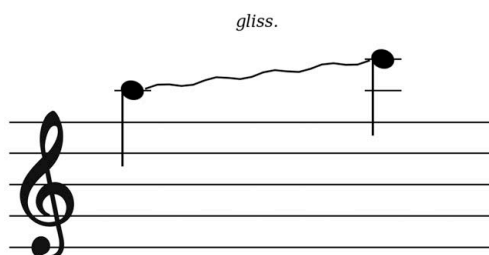


 BRZDĚNÍ A DETEKCE CHODCE
NEBO PŘEKÁŽKY V TRASE

Obr. 6.18 - Komunikace s okolím

Komunikace s cestujícími v prostoru vozidla

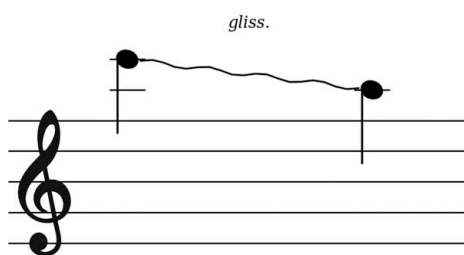
Ve vnitřním prostoru je využito několik způsobů komunikace s cestujícími. Primárním komunikačním médiem je obrazovka, která zobrazuje informace o aktuálním čase, detailech trasy, konečné zastávce a v přední části také informace o aktuálních úkonech vozidla. Tyto informace jsou doprovázeny jemnou změnou ambientního osvětlení a zvukovými signály. Například když se elektrobus rozjíždí ze zastávky, ambientní osvětlení se lehce zbarví do modré a na obrazovce se objeví grafická informace doprovázená krátkým exponenciálně gradujícím durovým tónem – například glissando z A5 na C6.



Obr. 6.19 - Notový zápis tónů při vyjíždění ze zastávky

Tato funkce vychází z poznatků hudební psychologie, podle které jsou stoupající durové tóny asociovány s pozitivním afektem a pohybem směrem vzhůru, nebo dopředu. Kombinace stoupajícího tónu s vizuální změnou osvětlení tak vytváří multimodální podnět, který cestující vnímají podvědomě. [84][85]

Při brždění je pak situace opačná. Interiér se zbarví do jemně oranžové barvy – červená barva je vyhrazena pouze pro krizové situace. Na displeji se objeví informace, že elektrobus zpomaluje a zazní klesající tón indikující zpomalení pohybu.



Obr. 6.20 - Notový zápis tónů při zpomalování při příjezdu na zastávku

Aby byla zajištěna přístupnost tohoto systému podle normy EN 301 549, zvukové signály by měly mít hladinu hlasitosti do úrovně přibližně 65 dB a světelné signály nesmí být střídáné v příliš vysoké frekvenci (max 3 Hz), protože ve voze se mohou nacházet senzoricky citlivé osoby.

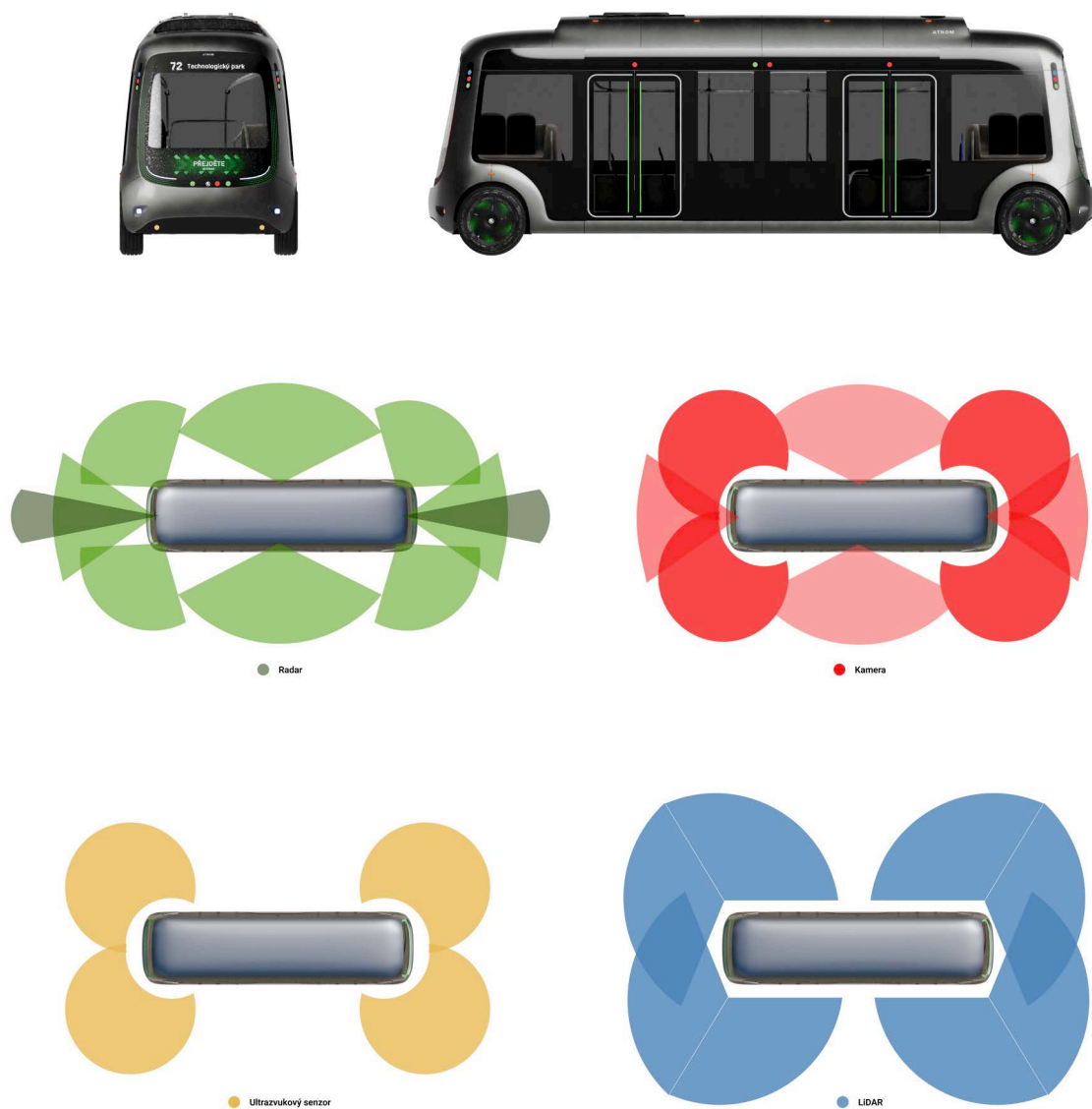


Obr. 6.21 - Příklad vnitřní komunikace úkonů elektrobusu

Senzory

Senzory autonomního řízení jsou na vozidle umístěny podle návrhu v předchozí kapitole 5.3.2 - Systémy autonomního řízení. Vzhledem k faktu, že návrh této diplomové práce se zabývá vizí budoucna, počítá návrh s pokročilými senzory, které dokážou snímat prostor okolo vozidla, aniž by musely být vyvedeny mimo karoserii. Senzory díky tomu nepoutají pozornost a nenarušují celkový tvar.

Rozděleny jsou do několika uskupení podle jejich principů, účelu a snímaného prostoru. V přední části je v prosklení integrovaná dvojice radarů – na krátkou a dlouhou vzdálenost, kamera a ultrazvukové senzory. Nejdůležitější senzory – LiDARy jsou umístěné v A-sloupku elektrobusu společně s přídatnými radary a kamerami. V boční straně prosklení jsou integrované kamery pro snímání okolí a nástupu cestujících a boční radary. Pro očištění senzorů je v místech jejich uložení zabudovaný systém pro jejich oplach a ofuk.



Obr. 6.22 - Rozmístění senzorů autonomního řízení finální variant



Obr. 6.23 - Výklopný systém čištění senzorů v A-sloupku

Pro případ, že by byl návrh zpracováván s aktuálními technologiemi senzorů, byla navržena ramena, která nahrazují senzory umístěné v A-sloupcích vozidla. V ramenech se nachází dvojice LiDARů, přídavných kamer a radarů. Ostatní senzory mohou být umístěny podle předchozího návrhu.



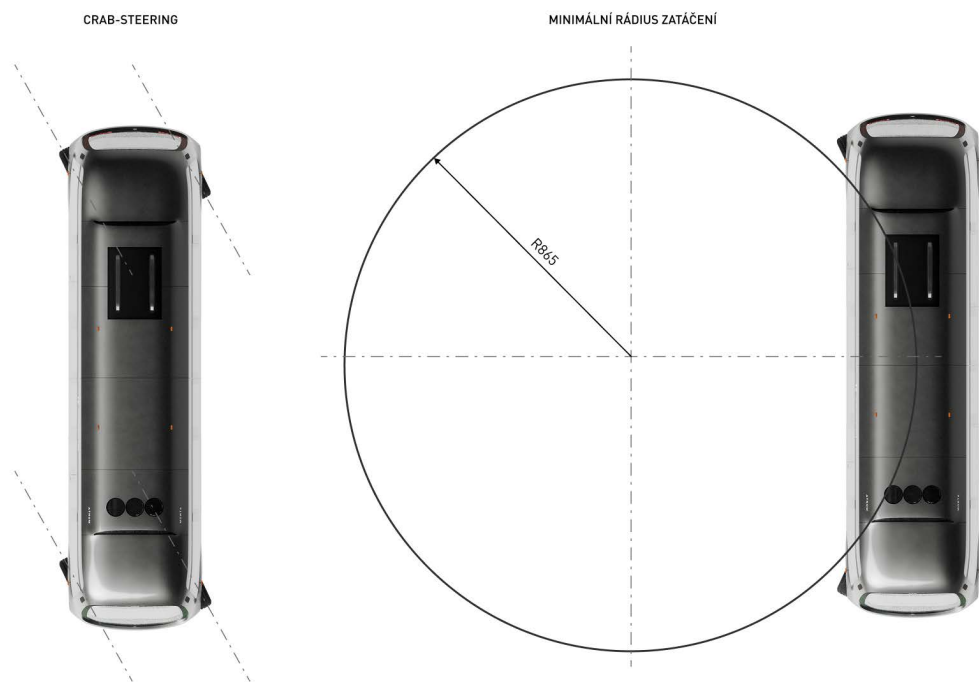
Obr. 6.24 - Alternativní verze senzorů umístěných v A-sloupcích

Manévrovatelnost

Jak bylo již u předběžného návrhu zmíněno, manévrovatelnost je jednou z velkých předností navrženého elektrobusu. Díky úhlu zatačení kol $\pm 25^\circ$ ve spojení s finálním 7300 mm rozvorem má autobus rádius zatačení ve středu náprav přibližně 8,65 m, což zaručuje bezproblémový průjezd infrastrukturou města včetně ostřejších zatáček a kruhových objezdů. Elektrobus také dokáže zatáčet všemi koly souhlasně (zmíněný crab-steering). Díky tomu může například najíždět k zastávkám diagonálně, aniž by vytočil zadní část.



Obr. 6.25 - Maximální vytočení kol finální varianty



Obr. 6.26 - Manévrovací schopnosti finální varianty

Nabíjení

Nabíjení elektrobusu je řešeno pomocí pantografového systému. Tento princip byl zvolen z několika důvodů. Jelikož se jedná o městský elektrobus, který nemusí jezdit dlouhé trasy, může na konečných zastávkách využívat příležitostné dobíjení (opportunity charging), nebo se střídát s jinými jednotkami. Díky tomu nemusí být v elektrobusu umístěna velká baterie, která by navyšovala hmotnost. Pantografové nabíjení je tak ideálním řešením, protože může probíhat automaticky a je efektivnější oproti bezdrátovému. Bylo zvoleno řešení, kdy jsou na střeše elektrobusu umístěny kontaktní plochy pro dobíjení, ke kterým se pak na konečných zastávkách, nebo v depu automaticky připojí pantograf. Plech střechy elektrobusu okolo kontaktů pro nabíjení je pokrytý nevodivým materiálem.



Obr. 6.27 – Pantografové nabíjení finální varianty

Přívod vzduchu do HVAC jednotky a k chlazení baterií

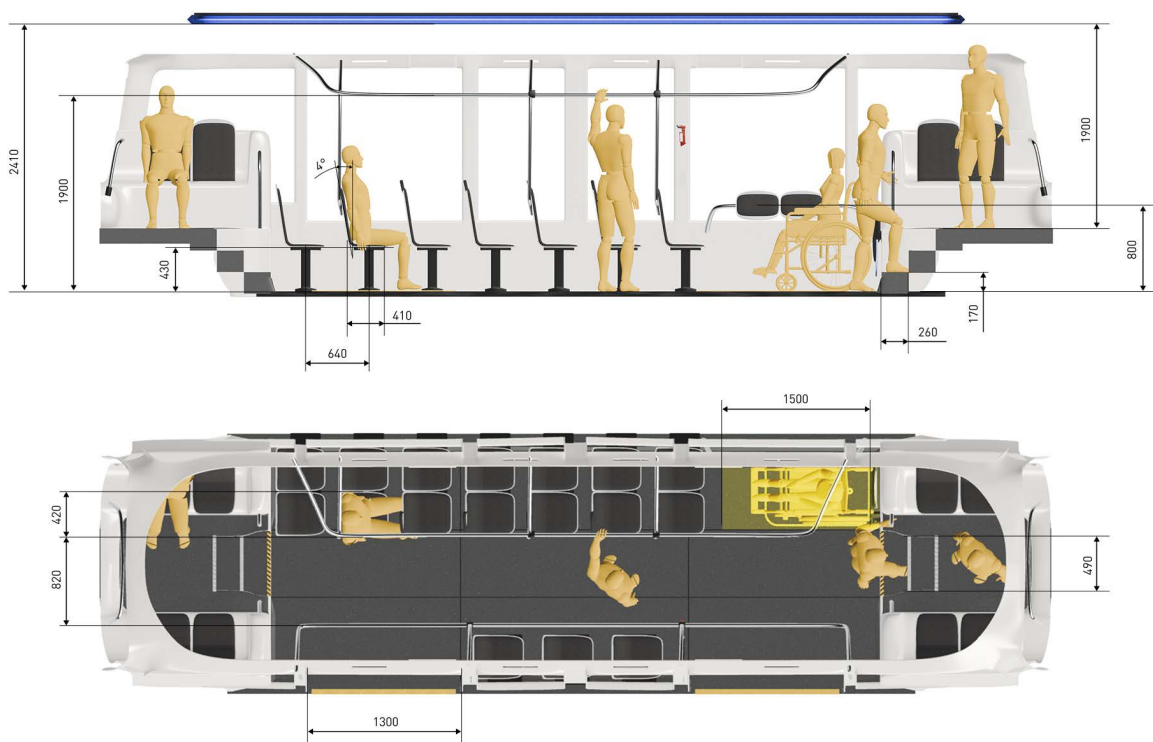
Pro dostatečný přívod studeného vzduchu do HVAC jednotky a k částečnému chlazení baterie jsou na střeše průduchy, které vedou vzduch dovnitř. Část vzduchu putuje do HVAC jednotky a část je vedena dále k baterii. Vývody horkého vzduchu jsou pak na druhé straně za baterií a nahoře, kde odvádí vzduch HVAC jednotka.



Obr. 6.28 – Schéma proudění vzduchu do HVAC jednotky a k bateriím

6.3 Ergonomické a bezpečnostní řešení

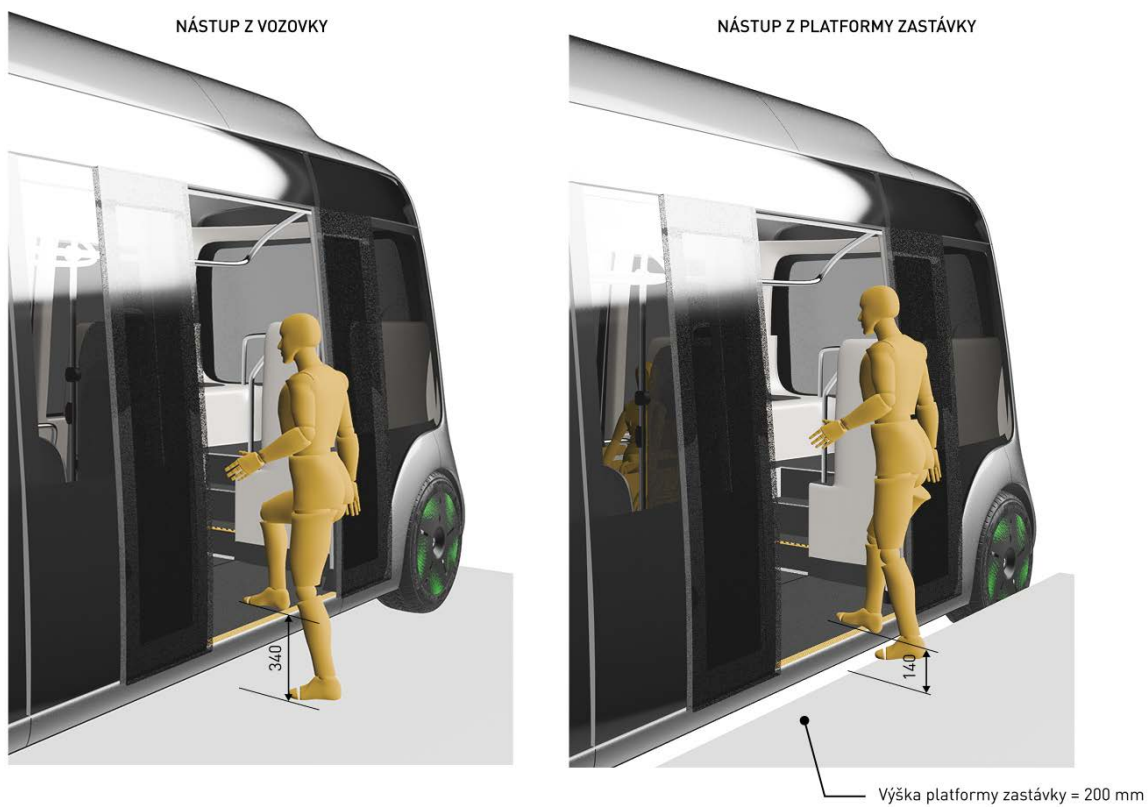
Přestože je návrh interiéru dle zadání zpracovaný převážně koncepčně, je důležité, aby splňoval základní ergonomické a bezpečnostní nároky. Především se jedná o rozměry sedadel, umístění madel, rozměry nástupního prostoru, schodů, umístění signalizačních a nouzových tlačítek a dalších prvků. Navržené rozměry vycházejí ze standardů normy ČSN EN ISO 6385.



Obr. 6.29 - Ergonomické rozměry interiéru

6.3.1 Ergonomie nástupu do vozidla

Maximální výška nástupní hrany nízkopodlažních městských autobusů je stanovena normou na 340 mm. Vzhledem k požadavku vysoké pevnosti podlahy z důvodu posunutí náprav ke krajům vozidla byla nástupní hrana navržena na maximální povolenou výšku. Ve městě je však běžnou praxí, že platformy zastávek dorovnávají rozdíl výšky nástupní hrany vozidla a cestující tak nemusí překonávat při nástupu výškový rozdíl. Standardní výška platformy zastávky je dle normy ČSN 73 6425-1 stanovena na 200 mm. Elektrobus navíc disponuje funkcí kneelingu, která sníží jeho nástupní hranu v případě potřeby o dalších 60 mm.



Obr. 6.30 - Ergonomie nástupu do vozidla z vozovky a ze zastávky



Obr. 6.31 - Nástup z vozovky při aktivním kneelingu

Při nástupu vozíčkáře do elektrobusu pomocí výsuvné rampy se rampa vysune do takové délky, aby splňovala požadovaný sklon do 8%. Případně elektrobus sníží svou nástupní hranu kneelingem. Šířka rampy svou šířkou 1300 mm (šířka otevřených dveří) splňuje minimální rozměr stanovený normou.

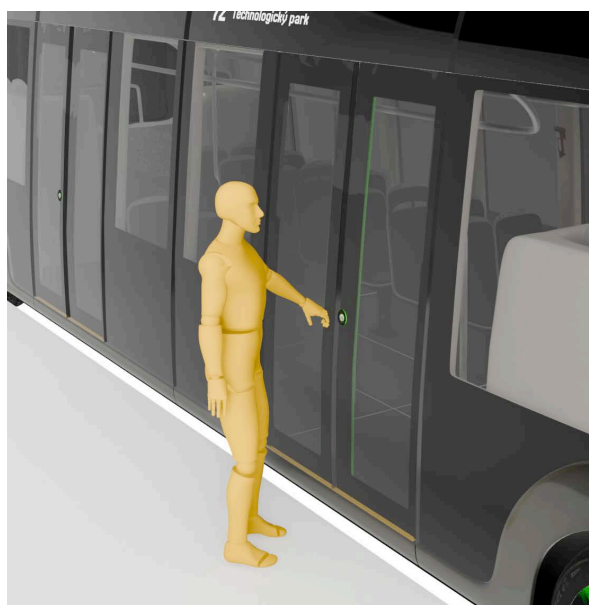


Obr. 6.32 - nástup vozíčkáře

6.3.2 Ergonomie tlačítek

Vnější tlačítka

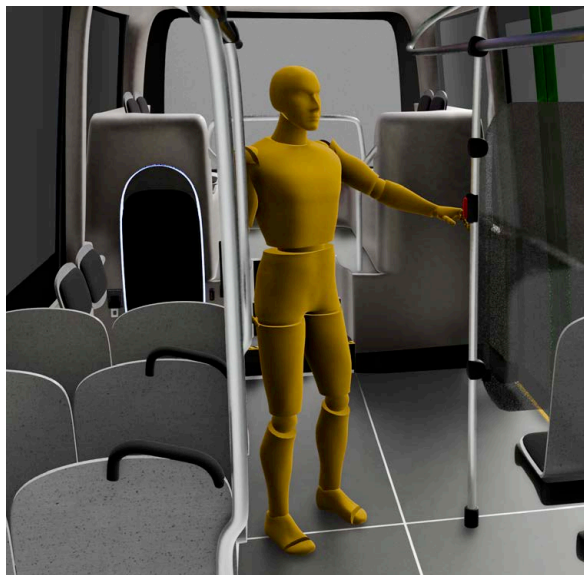
Vnější tlačítka jsou umístěna ve výšce 1000 mm od spodní části podlahy elektrobusu, jsou tedy snadno přístupná při nástupu platformy zastávky i při nástupu z vozovky. Na obou dveřích je umístěné jedno tlačítko sloužící k otevření obou křídel dveří.



Obr. 6.33 - Ergonomie vnějších tlačítek

Ergonomie tlačítek vnitřních

Vnitřní tlačítka pro otevření dveří jsou umístěna ve výšce 1300 mm od podlahy vozidla. U místa pro vozíčkáře se pak nachází tlačítka ve výšce 800 mm.



Obr. 6.34 - Ergonomie vnitřních tlačítek

Tlačítka pro nouzové zastavení otevření dveří a komunikaci s dispečinkem

Z bezpečnostních důvodů se musí v prostoru dveří nacházet tlačítka pro jejich nouzové otevření a také pro zastavení vozidla a komunikaci s dispečinkem. Tlačítka jsou chráněna krytem a jsou umístěné ve sloupku dveří a ve vyšší poloze, aby nedošlo k jejich neúmyslnému zmáčknutí. Toto tlačítko je pak umístěné na protější straně v nižší poloze, aby na něj dosáhly osoby s omezenou pohyblivostí



Obr. 6.35 – Umístění nouzových tlačítek

6.3.3 Bezpečnost a hygiena

Bezpečnost silničních vozidel je jejich velmi důležitým aspektem. U návrhu autonomního elektrobuse je proto o to více důležitá, a to nejen z důvodu absence faktoru lidské obsluhy. Důležité je také řešení hygienických požadavků, jelikož vozidlo městské hromadné dopravy přichází denně do styku se stovkami cestujících.

Bezpečnost exteriéru a interakce s okolím

Exteriér silničního vozidla musí splňovat řadu bezpečnostních požadavků a omezení. Návrh této diplomové práce bere v potaz následující aspekty:

Bezpečnost karoserie: Tvarování exteriéru neobsahuje výrazně vystupující ostré hrany a agresivní geometrické přechody, čímž se snižuje závažnost následků při případném střetu s chodcem či cyklistou.

Integrace a ochrana senzorů: Senzory autonomního řízení zapuštěny do karoserie a tím jsou chráněny před poškozením a vandalismem (výjimkou je verze LiDARů umístěných na ramenou vedoucí z karoserie, ale toto řešení je pouze konstrukční alternativou k původnímu návrhu). U senzorů, kde hrozí znemožnění funkce z důvodu znečištění jsou umístěny systémy ofuku nebo oplachu.

Vnější komunikace a nouzové prvky: Vzhledem k absenci očního kontaktu s řidičem, jsou do karoserie integrovány světelné a akustické prvky signalizující záměr vozidla (stání, rozjezd, dávání přednosti). Na exteriéru jsou v karoserii u dveří pod krytkou umístěna fyzická nouzová tlačítka pro nouzové otevření dveří záchrannými složkami. Také v interiéru jsou umístěna tlačítka pro nouzové zastavení a nouzové otevření dveří a kladívko pro rozbití přilehlého okna, která jako jediné není z tohoto důvodu opatřené bezpečnostní fólií proti roztržení.

6.3.4 Bezpečnost interiéru a ochrana pasažérů

Vnitřní prostor musí zajistit a ochranu cestujících za jízdy i v krizových situacích.

Baterie: Umístění baterie na střeše vozidla je z hlediska bezpečnosti lepší volbou oproti umístění v podlaze. Jak bylo již zmíněno, při nehodě je menší pravděpodobnost, že dojde k jejímu přímému poškození. V případě vznícení baterie pak jdou nebezpečné zplodiny primárně směrem vzhůru. Konstrukce interiéru počítá s využitím materiálů s vysokou požární odolností a nízkou kouřivostí.

Ergonomie a eliminace zranění: Interiérové prvky jsou navrženy s plynulými rádiusy bez nebezpečných výčnělků. Dispozice interiéru je koncipována většinou bezbariérově, s protiskluzovou úpravou podlahy a hran schodů a nástupu. V nástupním prostoru dveří jsou umístěny kamery pro sledování pohybu cestujících a zamezení kolizi pohybu dveří, pokud se v prostoru někdo nachází.

Architektura nouzových prvků: V interiéru jsou umístěné ovládací prvky pro nouzové otevření dveří a komunikaci s dispečinkem. Tyto prvky mají zabudovaný systém předcházející neúmyslné aktivaci. Prvky jsou umístěny, nebo doplněny o další tak, aby na ně dosáhly i osoby s omezenou pohyblivostí.

Hygienické řešení

Vzhledem k vysoké frekvenci střídání osob a absenci průběžného čištění řidičem je hygiena interiéru kritickým faktorem pro zachování zdraví populace a prevenci šíření patogenů.

Hygienické povrchy: Na všech frekventovaně uchopovaných místech (madla, tyče, textilie sedadel) jsou navrženy materiály s trvalou antibakteriální a antivirovou úpravou (např. příměsí iontů stříbra nebo mědi v kompozitech a plastech). Použité polymery nesmí uvolňovat těkavé organické látky, BPA ani ftaláty.

Konstrukční design pro snadnou sanitaci: Tvarování interiéru minimalizuje vznik spár, ostrých rohů a těžko přístupných míst, kde dochází k usazování nečistot. Téměř celá podlaha, kromě míst upevnění sedadel a madel je bez překážek, což umožňuje efektivní čištění podlahy.

Sanitace vzduchu: U systému je počítáno s vybaveností HEPA filtry a integrovanými UV sterilizačními lampami, které průběžně dezinfikují cirkulující vzduch v kabině.

Statická analýza převrácení

Silniční vozidla musí dle legislativních požadavků EHK č. 107 splňovat požadavky na příčnou stabilitu. Pokud se při manévrování vozidla dostane jeho těžiště mimo linii vnějšího kola, začne docházet k jeho převrácení. Jelikož má elektrobus umístěnou baterii a další komponenty na střeše, je velmi důležité zabývat se kontrolou jeho příčné stability.

Pro výpočet je nutné určit polohu těžiště. Bylo využito zjednodušeného výpočtu s uvažováním hlavních komponent konstrukce, jejichž hmotnost byla určena v kapitole 5.3.5 - Stanovení přibližné celkové maximální hmotnosti.

Výška těžiště je dána vztahem:

$$\text{Výška těžiště} = \frac{\sum(m_i \times h_i)}{\sum m_i}$$

Kde m_i = hmotnost komponenty, h_i = přibližná vzdálenost středu komponenty od vozovky.

Komponenta	m_i	h_i
Rám + karoserie + prosklení	5 500 kg	1 850 mm
Podvozek + nápravy s elektromotory	2 000 kg	350 mm
Baterie	1 000 kg	2 900 mm
HVAC jednotka, Invertor, Senzory, Řídící jednotka	500 kg	2 900 mm
Cestující (při plném obsazení)	3 000 kg	1 400 mm
Prvky interiéru (sedadla, madla, světla, obrazovky)	1 000 kg	1 200 mm
Celkem	13 000 kg	-

Tab. 6.1 - Údaje pro výpočet výšky těžiště

$$\text{Výška těžiště} = \frac{20\,625\,000}{13\,000} = 1586,5 \text{ mm} \approx 1,6 \text{ m}$$

Z výpočtu vyšlo, že těžiště plně naloženého vozidla je přibližně v půlce jeho výšky. Dále je nutné určit kritický úhel sklonu vozovky.

$$\tan \alpha_{\max} = \frac{\text{rozchod kol}}{2 \times \text{výška těžiště}}$$

$$\tan \alpha_{\max} = \frac{2150}{2 \times 1586,5} \approx 34^\circ$$

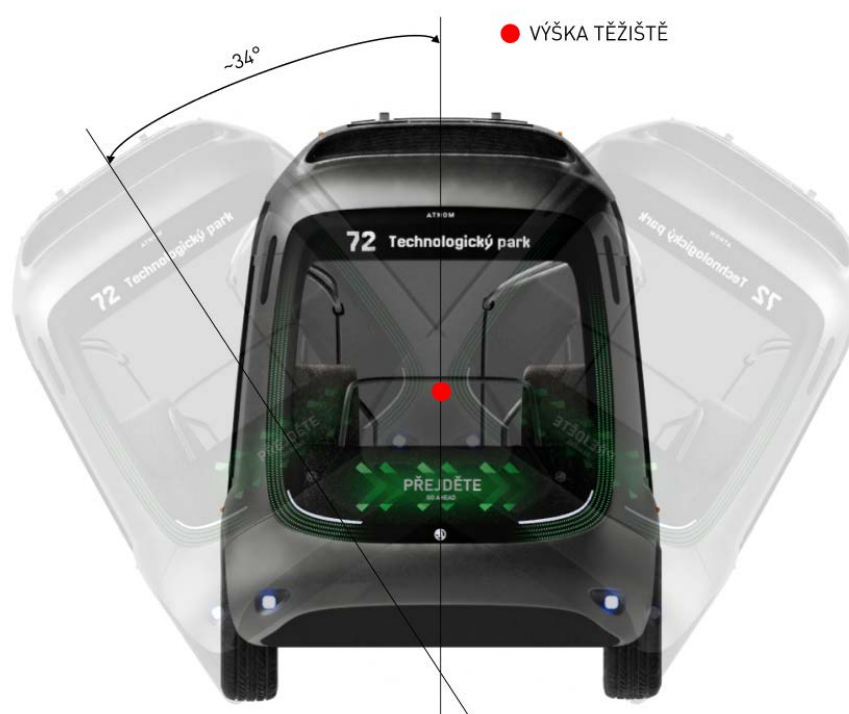
Kritický úhel sklonu vozovky, kdy dojde k překlopení vozidla je 34° , což bezpečně splňuje požadavek EHK č.107 ($\geq 28^\circ$). V reálném provozu je ale více vypovídající hodnota maximální rychlosti, při které se vozidlo v zatáčce překloupí. Jelikož se bude elektrobus pohybovat ve městě, byla určena maximální rychlost, kterou může stabilně projet zatáčku běžné městské křižovatky. Pro poloměr zatáčky byla stanovena hodnota $R = 25 \text{ m}$. Do výpočtu je zahrnuto také tíhové zrychlení $g \approx 9,8$.

$$\text{kritická rychlost} = \sqrt{g \times R \times \tan \alpha_{\max}}$$

$$\text{kritická rychlost} = \sqrt{9,8 \times 25 \times \tan 34^\circ} = 46 \text{ km/h}$$

Kritická rychlost elektrobusu v zatáčce rádiusu 25 m byla vypočtena na 46 km/h. Za bezpečnou rychlost lze pak uvažovat přibližně 60 % této hodnoty, tedy přibližně 28 km/h. To je hodnota, která odpovídá městskému provozu a orientační výpočet tak potvrzuje, že elektrobus by byl teoreticky schopen bezpečného provozu. Je však nutné podotknout, že reálné hodnoty by byly určeny až při detailním konstrukčním a technickém návrhu.

PŘÍČNÁ STABILITA ELEKTROBUSU - KRITICKÝ ÚHEL NÁKLONU VOZOVKY

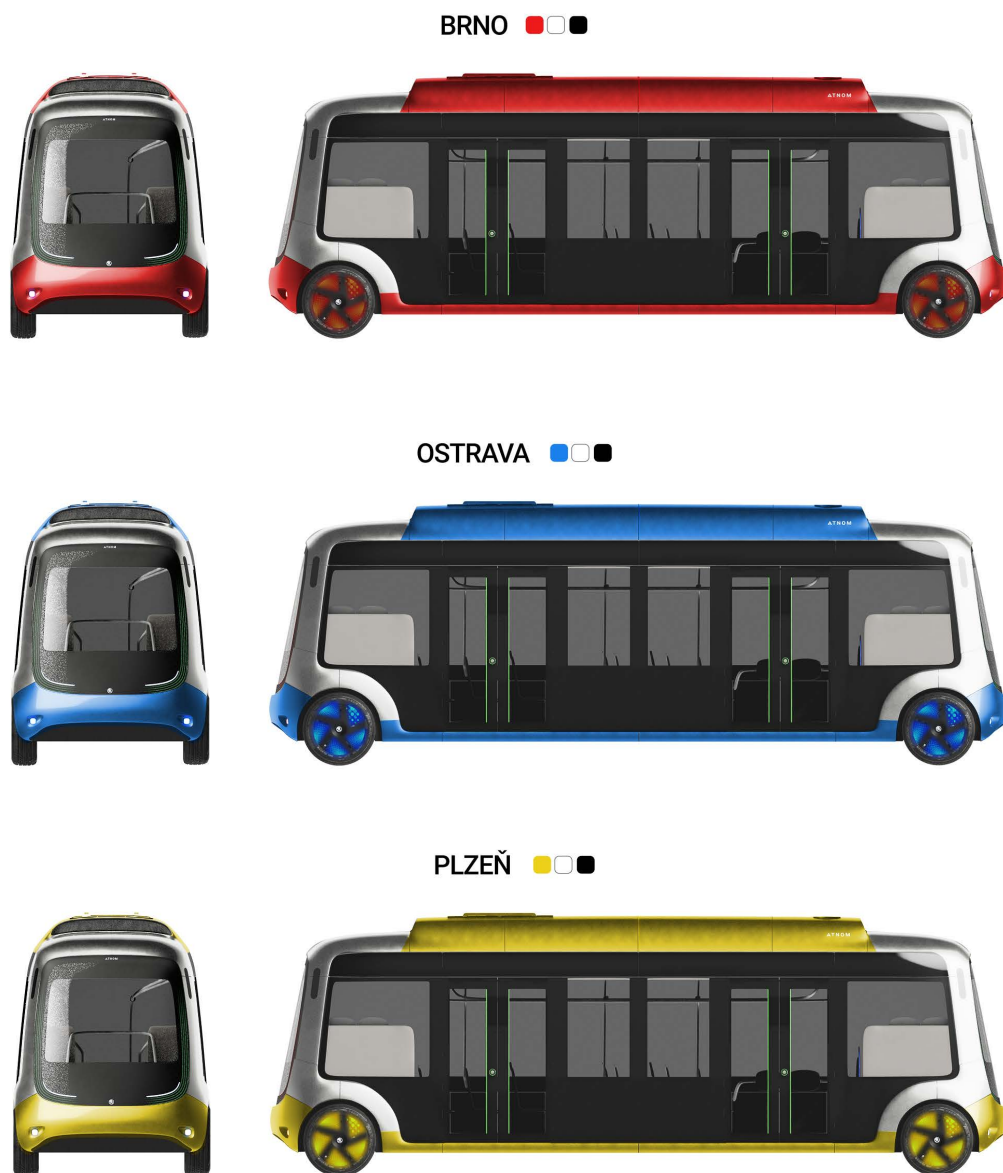


Obr. 6.36 - Vizualizace příčné stability elektrobuse

6.4 Barevné a grafické řešení

6.4.1 Barevné řešení

Grafické řešení zbarvení vozidla je u městské hromadné dopravy důležitým prvkem. Každé město pracuje se svou zvolenou paletou barev a stylem, kterým jsou jeho provozovaná vozidla zbarvena. Bylo proto zvoleno rozvržení zbarvení plechů karoserie, které si mohou dopravní podniky přizpůsobit a zbarvit do svého stylu. Toto rozvržení je určeno tak, aby zbarvení nezměnilo celkový vizuální tvar elektrobuse. Prezentovány jsou tři různé varianty vybraných měst České republiky – Brno, Ostrava a Plzeň.



Obr. 6.37 - Barevné varianty

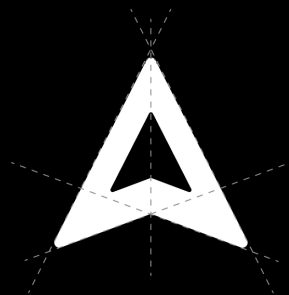
6.4.2 Grafické řešení

Přestože je práce zpracovávána ve spolupráci se Škoda Group a design proto využívá primárně vizuální prvky a značku Škoda Group, bylo pro účely této práce a marketingu vozidla vytvořeno logo a název elektrobuse.

Název „ATNOM“ vystihuje jeho hlavní charakteristiku – autonomitu. Symbol, který v názvu zároveň zastupuje počáteční písmeno „A“ představuje šipku navigace, tedy přesun z jednoho místa na druhé, což je podstatou městské hromadné dopravy.



SYMBOL



KONSTRUKCE SYMBOLU

ATNOM

ATNOM

Obr. 6.38 - Logo a symbol

6.5 Udržitelnost produktu

6.5.1 Udržitelnost autonomního elektrobusu

Z hlediska udržitelnosti je navržený elektrobus koncipován tak, aby minimalizoval své environmentální dopady napříč celým životním cyklem.

Volba LFP technologie baterie (CATL B161) přináší ekologické výhody oproti běžným článkům. LFP neobsahuje kobalt ani nikl, jejichž těžba je spojena s vysokou environmentální i sociální zátěží. Životnost LFP článků je 3 000 – 6 000 plných cyklů, což odpovídá 10–15 letům provozu při běžném využití. Po skončení primárního použití mají články potenciál pro tzv. second-life aplikace, například jako úložiště energie v autobusových depech nebo pro vyrovnávání zátěže rozvodné sítě.

Vozidlo produkuje nulové místní emise, což přímo snižuje znečištění městského ovzduší. Elektrický pohon je tišší, než spalovací motory a pro pneumatiky, které jsou hlavním zdrojem hluku se nabízí použití tlumící výplně. Elektrobus tak snižuje i hlukové zatížení města. Je však nutné uvažovat i zdroj elektřiny. Pro českou energetickou síť jsou emise vyprodukované při výrobě elektřiny dodané do elektrobusu nižší než emise vyprodukované dieslovým motorem, který by vykonal stejnou práci. To je dané především účinností elektrického pohonu (90 % oproti cca 30 % u spalovacích motorů), pokud neuvažujeme ztráty při výrobě elektřiny dodávané do elektrobusu.

Modulární architektura pohonných modulů umožňuje jejich snadnější výměnu, čímž se prodlužuje servisní životnost vozidla a snižuje množství vyřazených komponent. Karoserie z modulárně řešených dílů umožňuje lokální výměnu jednotlivých panelů bez nutnosti dlouhého odstavení vozidla při havárii nebo opotřebení. Předpokládaná životnost vozidla se může pohybovat v rozmezí 10–15 let, tedy přibližně 1 000 000 km – srovnatelná se současnými elektrobusy v evropském provozu.

6.5.2 Udržitelnost konceptu městské hromadné dopravy budoucnosti

Na úrovni městské hromadné dopravy přináší koncept autonomního elektrobusu několik hlavních přínosů.

Absence řidiče umožňuje teoreticky nepřetržitý 24hodinový provoz, omezený pouze potřebou nabíjení a servisu. Stejný objem přepravních výkonů tak lze pokrýt menším počtem vozidel, případně lze nabídnout vyšší frekvenci spojů i mimo dopravní špičky. Konkrétně navrhované řešení s opportunity charging na konečných zastávkách umožňuje provozní využití až 18 hodin denně, tj. zhruba o 50 % více než u standardních vozidel obsluhovaných řidičskými směnami.

Propojení vozidla s chytrou dopravní infrastrukturou (V2X) umožňuje optimalizaci jízdních profilů, preferenci na křižovatkách a koordinaci spojů. Důsledkem je nižší spotřeba energie díky eliminaci zbytečných brzdění a akcelerací a zároveň zkrácení cestovních časů.

Spolehlivá a frekventovaná autonomní hromadná doprava může přispět k odklonu cestujících od osobní automobilové dopravy, což opět pozitivně ovlivní znečištění ovzduší a potenciálně alespoň částečně eliminuje dopravní kolony na frekventovaných místech měst.

Jak již však bylo v úvodní části zmíněno, je třeba počítat s problematikou toho, že plně autonomní provoz má v delším časovém horizontu potenciál vést k eliminaci pozic řidičů MHD. Tento sociální dopad lze částečně kompenzovat vznikem nových pracovních míst ve vzdálené dispečerské centrále, technické údržbě a kybernetické bezpečnosti. Transformace pracovního trhu by však měla být řízeným procesem v koordinaci s dopravními podniky a odborovými organizacemi.

6.6 Vyhodnocení klíčových parametrů

Klasifikace vozidla dle EHK č. 107	M3, třída I. (městský autobus)
Úroveň autonomie dle SAE J3016	L5
Převážná kapacita	65 osob (25 sedících + 40 stojících) / 61 osob + 1 místo pro vozíček / kočárek
Celková užžitná plocha vnitřku vozidla	~ 18 m ²
Dojezd	60 km
Kapacita baterie, typ technologie	130 kWh, LFP
Celkový výkon elektromotorů	360 kW (4x 90 kW)
Průměrná spotřeba el. energie na 1 km	~ 1,5 kWh/km
Maximální rychlost	do 80 km/h
Rychlost dobíjení o 60 %	15 min při 300 kW
Rozvor	7 500 mm
Rozchod	2 150 mm
Systém pohonu a zatáčení	drive by wire 4WD, 4WS
Maximální užitečné zatížení	~ 3 000 kg
Minimální středový rádius zatáčení	~ 8,65 m
Pohotovostní hmotnost	~ 10 000 kg
Celková maximální hmotnost	~ 13 000 kg
Výška nástupní hrany	340 mm (280 mm při kneelingu)
Úhel statické stability	~ 34°
Výčet senzorů autonomního řízení	LiDAR – 4x Kamera – 8x (2x s termovizí) Radar 10x (2x long range) Ultrazvukový senzor - 4x

Tab. 6.2 - Klíčové parametry finálního návrhu elektrobuse

7 ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce bylo navrhnout koncept městského autonomního elektrobuse, který využívá možnosti plně autonomního řízení, reaguje na potřeby cestujících, prostředí městské hromadné dopravy a aktuální trendy v dopravě. Práce byla zpracovávána ve spolupráci se společností Škoda Group.

K řešení problému bylo přistoupeno prostřednictvím rešerše současného stavu poznání. Byla provedena designérská analýza existujících autonomních a elektrických autobusů, shuttle busů, futuristických vizí a dále technicko-legislativní analýza zahrnující úroveň automatizace, senzorické systémy, komunikaci V2X, energetické řešení, evropský a český legislativní rámec a ergonomické požadavky. Na základě této analýzy byly identifikovány hlavní designové i konstrukční příležitosti návrhu.

Hlavními problémy současných autonomních elektrobuseů, které byly v rámci analýzy zjištěny, jsou často vizuální konzervatismus, neefektivní využití vnitřního prostoru a nedostatečná komunikace vozidla s okolím v důsledku absence řidiče. Tyto poznatky byly formulovány jako příležitosti, na které navržený koncept reaguje.

Navržený elektrobuse zmíněné problémy řeší několika klíčovými designovými rozhodnutími. Senzory autonomního řízení jsou integrovány přímo do těla vozidla, čímž je zachován čistý vnější tvar. Symetrie v obou hlavních osách komunikuje obousměrný charakter autonomního vozidla a zároveň snižuje výrobní náklady díky jednotě komponent. Koncept využívá modulárních pohonných modulů s nezávislým pohonem a zatáčením všech čtyř kol, díky čemuž dosahuje malého radiusu zatáčení a vyšší manévrovatelnosti ve městském provozu. Komunikace s okolím i s cestujícími uvnitř vozidla je řešena vícevrstevným systémem světelné signalizace, informačních panelů a multimodální zvukové a vizuální zpětné vazby. Návrh se snaží respektovat klíčové části evropských a českých legislativních, norem, homologačních předpisů.

Navržené řešení je koncipováno jako vize do budoucnosti a předpokládá rozvoj v několika oblastech. Předně jde pohonné moduly, senzory autonomního řízení, baterii a legislativu pro provoz plně autonomních vozidel a jejich homologační proces. Tato práce tak staví základ návrhu elektrobuse, který může být součástí městské hromadné dopravy budoucnosti. Pro využití navrženého elektrobuse v městské dopravě by musel návrh projít fází detailního konstrukčního vývoje a testování, což by ověřilo jeho reálnou schopnost spolehlivého fungování.

8 VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV

Druh výsledku	funkční vzorek
Název výsledku	Autonomní elektrobus
Autoři	Bc. Martin Šmahel
Původci	-
Místo uložení výsledku	VUT Brno

Tab 8.1 - Výsledek výzkumu dle RIV

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Number of autonomous vehicles globally 2022-2030*. Online. In: Statista. Dostupné z: <https://www.statista.com/statistics/1230664/projected-number-autonomous-cars-worldwide/>. [cit. 2026-05-13].
- [2] ŠTĚRBA, Roman. *Autonomní řízení v Česku od 2026. Co nově umožní zákon*. Online. Magazín AUTO-MOTOR.CZ. 2026. Dostupné z: <https://auto-motor.cz/autonomni-rizeni-cesko-2026-zmena-zakon/>. [cit. 2026-05-09].
- [3] MAŠKOVÁ, Martina a NĚMCOVÁ, Karolína. *Samořiditelná vozidla umí v krizových situacích reagovat mnohem lépe než řidiči. Nehody, které způsobí, jsou jen víc medializované, míní publicista Rybecký*. Online. In: Plus. 2026. Dostupné z: <https://plus.rozhlas.cz/samoriditelna-vozidla-umi-v-krizovych-situacich-reagovat-mnohem-lepe-nez-ridici-8871021>. [cit. 2026-05-09].
- [4] , Ann-Christin Hensch Ann-Christin Hensch; , Matthias Beggiato Matthias Beggiato; , Josef F. Krems a , Isabel Kreißig. The Effect of eHMI Malfunctions on Younger and Elderly Pedestrians' Trust and Acceptance of Automated Vehicle Communication Signals. Online. *Frontiers*. Dostupné z: <https://www.frontiersin.org/journals/psychology/articles/10.3389/fpsyg.2022.866475/full>. [cit. 2026-05-09].
- [5] *Omnibus*. Online. In: Wikipedie: Otevřená encyklopedie. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Omnibus>. [cit. 2026-05-13].
- [6] VOKÁČ, Petr. *Před 135 lety začal dravý nástup elektrické trakce*. Online. Před 135 lety začal dravý nástup elektrické trakce. 2014. Dostupné z: <https://zeleznicar.cd.cz/zeleznicar/historie/pred-135-lety-zacal-dravy-nastup-elektricke-trakce/-4918/24,0,./>. [cit. 2026-05-13].
- [7] , rebus. *MAN před 50 lety představil svůj první elektrický autobus*. Online. In: Couldn't find publisher. 2020. Dostupné z: <https://www.busportal.cz/clanek/man-pred-50-lety-predstavil-svuj-prvni-elektricky-autobus-16510>. [cit. 2026-05-13].
- [8] *Celkový počet cestujících*. Online. Data Praha. Dostupné z: <https://data.praha.eu/praha-v-cislech/celkovy-pocet-cestujicich>. [cit. 2026-05-11].

- [9] *Statistiky DPP*. Online. Dopravní podnik hl. m. Prahy, akciová společnost. Dostupné z: <https://www.dpp.cz/spolecnost/o-spolecnosti/profil-spolecnosti/statistiky-dpp>. [cit. 2026-05-11].
- [10] ENGELKING, Carl. *The 'Driverless' Car Era Began More Than 90 Years Ago*. Online. In: Discover Magazine. 2017. Dostupné z: <https://www.discovermagazine.com/the-driverless-car-era-began-more-than-90-years-ago-1327>. [cit. 2026-05-13].
- [11] DUDA, Matěj. *Stanford Cart*. Online, Semestrální práce. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, 2024. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=238562>. [cit. 2026-05-13].
- [12] *CHM Revolution*. Online. In: CHM Revolution. Dostupné z: <https://www.computerhistory.org/revolution/artificial-intelligence-robotics/13/293/1277>. [cit. 2026-05-13].
- [13] *A Brief History of Autonomous Vehicles – from Renaissance to Reality*. Online. Mobileye. 2023. Dostupné z: <https://www.mobileye/blog/history-autonomous-vehicles-renaissance-to-reality/>. [cit. 2026-05-13].
- [14] WILLIAMS, Matt. *The Drive for Autonomous Vehicles: The DARPA Grand Challenge*. Online. HeroX. Dostupné z: <https://www.herox.com/blog/159-the-drive-for-autonomous-vehicles-the-darpa-grand>. [cit. 2026-05-13].
- [15] , rebus. *Autobus Mercedes-Benz Future poprvé v České republice*. Online. In: Couldn't find publisher. 2017. Dostupné z: <https://www.busportal.cz/clanek/autobus-mercedes-benz-future-poprve-v-ceske-republice-13806>. [cit. 2026-05-09].
- [16] ŠTĚPÁNEK, Jiří. *Autobusy – Autobus budoucnosti s technologií CityPilot*. Online. In: Autobus budoucnosti s technologií CityPilot | Automobil Revue. 2017. Dostupné z: https://www.automobilrevue.cz/rubriky/presunuto-na-trucker-cz-truck-bus/predstavujeme/autobusy-autobus-budoucnosti-s-technologie-citypilot_45941.html. [cit. 2025-02-11].
- [17] , MoK. *Premiéra autobusu budoucnosti v ČR*. Online. In: TruckFocus.cz. 2017. Dostupné z: <https://truckfocus.cz/novinky/8260,premiera-autobusu-budoucnosti-v-cr>. [cit. 2026-05-09].

- [18] *Specifications for Volvo 7900 Electric*. Online. Volvo Buses. Dostupné z: <https://www.volvobuses.com/en/city-and-intercity/buses/volvo-7900-electric/specifications.html>. [cit. 2026-05-09].
- [19] O'KANE, Sean. *Arrival expands beyond electric delivery vans with a new EV bus*. Online. The Verge. Dostupné z: <https://www.theverge.com/2020/6/17/21293615/arrival-uk-electric-bus-ev-photos>. [cit. 2026-05-09].
- [20] *Britská značka Arrival vyvinula stylový elektrický autobus pro hromadnou dopravu*. Online. DesignMag.cz. Dostupné z: <https://www.designmag.cz/technika/89901-britska-znacka-arrival-vyvinula-stylovy-elektricky-autobus-pro-hromadnou-dopravu.html>. [cit. 2026-05-09].
- [21] *It's not a car. It's a robotaxi designed around you*. Online. Zoox. Dostupné z: <https://zoox.com>. [cit. 2026-05-09].
- [22] MATHEWS, Jessica. *Inside the secretive design studio of Amazon's robo-taxi company Zoox as it readies for paying customers*. Online. In: Fortune. Dostupné z: <https://fortune.com/2024/09/11/zoox-car-studio-amazon-waymo-autonomous-vehicle-robotaxi/>. [cit. 2026-05-09].
- [23] BROOK-JONES, Callum. *Zoox begins operating first purpose-built robotaxi with passengers on public roads in California*. Online. Automotive Testing Technology International. Dostupné z: <https://www.automotivetestingtechnologyinternational.com/news/zoox-begins-operating-first-purpose-built-robotaxi-with-passengers-on-public-roads-in-california.html>. [cit. 2026-05-09].
- [24] HAVLÍN, Roman. *Na pražském výstavišti jezdí autonomní autobus. Svězt se může kdokoliv*. Online. In: FDrive.cz. 2023. Dostupné z: <https://fdrive.cz/clanky/na-prazskem-vystavisti-jezdi-autonomni-autobus-svezet-se-muze-kdokoliv-11273>. [cit. 2026-05-09].
- [25] HOLDER, Jim. *Aurigo Auto-Shuttle: we ride in the self-driving bus of the future*. Online. In: Move Electric. 2023. Dostupné z: <https://www.moveelectric.com/e-world/aurigo-auto-shuttle-we-ride-self-driving-bus-future>. [cit. 2026-05-09].

- [26] *Tesla Robovan Is Another Self-Driving Concept from Elon Musk*. Online. Car and Driver. Dostupné z: <https://www.caranddriver.com/news/a62579519/tesla-robovan-revealed/>. [cit. 2026-05-15].
- [27] *View Photos of the Tesla Robovan*. Online. In: Car and Driver. Dostupné z: <https://www.caranddriver.com/photos/g62579353/tesla-robovan-gallery/>. [cit. 2026-05-15].
- [28] *Scania NXT*. Online. Scania ČESKÁ REPUBLIKA. Dostupné z: <https://www.scania.com/cz/cs/home/about-scania/innovation/scania-nxt.html>. [cit. 2026-05-21].
- [29] *Autonomous SAE levels*. Online. Namuga. Dostupné z: https://namuga.com/eng/invest/news_view.php?v_seqno=239. [cit. 2026-05-11].
- [30] *Automatizovaná jízda*. Online. Ford CZ. Dostupné z: <https://www.ford.cz/pred-nakupem/objevte/technologie/automatizovana-jizda>. [cit. 2026-05-11].
- [31] *Sense, Think, Act: What automated vehicles need to be capable of*. Online. Dostupné z: <https://www.bosch-mobility.com/en/mobility-topics/automated-driving-sense-think-act/>. [cit. 2026-05-12].
- [32] *Sense, Think, Act: The Three Keys to Enabling Autonomous Driving*. Online. In: Ennovi. Dostupné z: <https://ennovi.com/resource-articles/the-three-keys-to-enabling-autonomous-driving/>. [cit. 2026-05-13].
- [33] *Radar For Automotive: Why Do We Need Radar?* Online. In: Semiconductor Engineering. Dostupné z: <https://www.renesas.com/us/en/blogs/radar-transceivers-key-component-ad-as-autonomous-driving-blog-1-why-do-we-need-radar>. [cit. 2026-05-13].
- [34] PACELT, Oskar. *Senzory a skenery LiDAR. Co to je a jak to funguje?* Online. Botland. 2020. Dostupné z: <https://botland.cz/blog/senzory-a-skenery-lidar-co-to-je-a-jak-to-funguje/>. [cit. 2026-05-12].
- [35] DISRUPTIVE, Brainz. *Antikolizní systém Škody Group je šitý na míru tramvajové dopravě, využívá technologii LiDAR*. Online. In: Škoda Group. Dostupné z: <https://www.skodagroup.com//cs/post/antikolizni-system-skody-group-je-sity-na-miru-tramvajove-doprave-vyuziva-technologie-lidar>. [cit. 2026-05-13].

- [36] ARVIND SRIVASTAV, Soumyajit Mandal. Computer Science Computer Vision and Pattern Recognition. Online. *ArXiv.org*. S. 22. Dostupné z: <https://arxiv.org/abs/2306.09304v3>. [cit. 2026-05-12].
- [37] *Embedded Cameras – The Heart of Smart Mobility*. Online. TechNexion. Dostupné z: <https://www.technexion.com/resources/embedded-cameras-the-heart-of-smart-mobility/>. [cit. 2026-05-13].
- [38] SUN, Na; QIU, Quan; LI, Tao; RU, Mengfei; JI, Chao et al. GNSS/LiDAR/IMU Fusion Odometry Based on Tightly-Coupled Nonlinear Observer in Orchard. Online. *Remote Sensing*. 2024, vol. 16, no. 16, s. 2907. ISSN 2072-4292. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs16162907>. [cit. 2026-05-13].
- [39] DAYAL, Umang. *Multi-Sensor Data Fusion in Autonomous Vehicles — Challenges and Solutions*. Online. Digital Divide Data. Dostupné z: <https://www.digitaldividedata.com/blog/multi-sensor-data-fusion-in-autonomous-vehicles>. [cit. 2026-05-13].
- [40] VALÁŠEK, Dominik. *V2X a C-ITS: Skrývá se pod zkratkami budoucnost bezpečnosti na silnicích?* Online. Největší inzerce autobazarů - TipCars. Dostupné z: <https://www.tipcars.com/magazin/nase-tema/v2x-c-its-komunikace-vozidla-infrastruktura-272024.html>. [cit. 2026-05-12].
- [41] *V2X-PRIORITY*. Online. V2X-PRIORITY by Herman elektronika. Dostupné z: <https://www.v2x-priority.com/v2x/>. [cit. 2026-05-12].
- [42] *ŠKODA ENYAQ iV*. Online. Škoda Storyboard. Dostupné z: https://www.skoda-storyboard.com/cs/enyaq_iv_001/. [cit. 2026-05-12].
- [43] *Bus is on route to the future*. Online. E-Mobility Engineering. Dostupné z: <https://www.emobility-engineering.com/bus-is-on-route-to-the-future/>. [cit. 2026-05-12].
- [44] *OppCharge*. Online. In: Fast charging of electric vehicles. Dostupné z: <https://www.oppcharge.org/>. [cit. 2026-05-21].
- [45] HLAVÁČ, Petr. *Nápravy vozidel s elektrickým pohonem*. Online, Bakalářská práce, vedoucí Ondřej Blaťák. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 2023. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/211644>. [cit. 2026-05-15].

- [46] , A. Goyal a , A. Thakur. An Overview of Drive by Wire Technology for Automobiles. Online. In: *IEEE Xplore*. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8776712>. [cit. 2026-05-12].
- [47] CONDON, J. E.; ROTH, C. W. a GRITCHEN, R. A. (USA). *System for controlling the kneeling operation of air suspension equipped transit vehicles*. United States Patent and Trademark Office. Přihl.: 22. 09. 1980. Uděl.: 27. 07. 1982. US4341398A. Dostupné také z: <https://patents.google.com/patent/US4341398A/en>.
- [48] *Portal Axle for city buses AVN 132*. Online. ZF Products. Dostupné z: https://www.zf.com/products/en/cv/products_76358.html. [cit. 2026-05-21].
- [49] , Wolfgang A. Haggenmüller. *Electric motors in electric vehicles: An overview*. Online. In: Felss. 2025. Dostupné z: <https://felss.com/en/blog/electric-motors-in-electric-vehicles-an-overview/>. [cit. 2026-05-13].
- [50] *Jak funguje elektrický motor? 10 otázek a odpovědí*. Online. Škoda Storyboard. Dostupné z: <https://www.skoda-storyboard.com/cs/e-mobilita-cs/jak-funguje-elektricky-motor-10-otazek-a-odpovedi/>. [cit. 2026-05-12].
- [51] *Electric Car Brakes Explained*. Online. Zecar. Dostupné z: <https://zecar.com/resources/electric-car-brakes-explained>. [cit. 2026-05-13].
- [52] *LFP baterie*. Online. Mobilní baterka. Dostupné z: <https://www.mobilni-baterka.cz/produkty/baterie/>. [cit. 2026-05-13].
- [53] *Battery Thermal Management for Electric Buses: An Overview*. Online. Brogen EV Solution | Shanghai OE Industrial Co., Ltd. Dostupné z: <https://brogenevsolution.com/battery-thermal-management-for-electric-bus-an-overview/>. [cit. 2026-05-13].
- [54] *ELEKTROMOBILITA*. Online. Škoda Edu. Dostupné z: <https://www.skoda-kariera.cz/edu/druhy-stupen-zs-a-ss/elektromobilita/menice>. [cit. 2026-05-16].
- [55] SUH, In-Soo; LEE, Minyoung; KIM, Jedok; OH, Sang Taek a WON, Jong-Phil. Design and experimental analysis of an efficient HVAC (heating, ventilation, air-conditioning) system on an electric bus with dynamic on-road wireless charging. Online. *Energy*. 2015, vol. 81, s. 262-273. ISSN 0360-5442. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.12.038>. [cit. 2026-05-16].

- [56] *O systému klimatizace elektrického autobusu*. Online. Novinky. Dostupné z: <https://cz.ntcac-auto-air-conditioner.com/news/about-electric-bus-air-conditioner-system-68111175.html>. [cit. 2026-05-16].
- [57] Prováděcí nařízení Komise (EU) 2022/1426 ze dne 11. srpna 2022, kterým se stanoví prováděcí pravidla k nařízení Evropského parlamentu a Rady (EU) 2019/2144, pokud jde o jednotné postupy a technické specifikace pro schvalování typu automatizovaných systémů řízení (ADS) plně automatizovaných vozidel. In: *Úřední věstník Evropské unie*. 2022, 2022/1426, s. 1-43.
- [58] UN Regulation No. 156 – Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regards to software update and software updates management system. In: *Agreement concerning the Adoption of Harmonized Technical United Nations Regulations*. 2021, s. 1-28.
- [59] UN Regulation No. 155 – Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regards to cyber security and cyber security management system. In: *Agreement concerning the Adoption of Harmonized Technical United Nations Regulations*. 2021, s. 1-39.
- [60] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 26262-1:2018, *Road vehicles — Functional safety*. 2018. 2018.
- [61] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 21448:2022, *Road vehicles — Safety of the intended functionality*. Švýcarsko, 2022.
- [62] Směrnice Rady 96/53/ES ze dne 25. července 1996, kterou se pro určitá silniční vozidla provozovaná v rámci Společenství stanoví maximální přípustné rozměry ve vnitrostátní a mezinárodní dopravě a maximální přípustné hmotnosti v mezinárodní dopravě. In: *Úřední věstník Evropské unie*. 1996, 96/53/ES, s. 59-75.
- [63] Vyhláška č. 209/2018 Sb., o hmotnostech, rozměrech a spojování vozidel. In: . 2018, částka 101.
- [64] OSN. Předpis EHK OSN č. 48, *Předpis EHK OSN č. 48 – Jednotná ustanovení pro schvalování vozidel z hlediska montáže zařízení pro osvětlení a světelnou signalizaci*. [2016/1723]. 2016.

- [65] OSN. Předpis OSN č. 148, *Předpis OSN č. 148 – Jednotná ustanovení pro schvalování zařízení pro světelnou signalizaci (svítilen) pro motorová vozidla a jejich přípojná vozidla*. [2021/1719]. 2021.
- [66] Automated Driving System (ADS) Marker Lamp. Online. Dostupné z: https://doi.org/10.4271/J3134_202512. [cit. 2026-05-17].
- [67] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 9241-210:2019, *Ergonomics of human-system interaction — Part 210: Human-centred design for interactive systems*. 210. Švýcarsko, 2019.
- [68] Předpis EHK OSN č. 107 – Jednotná ustanovení pro schvalování typu vozidel kategorií M2 nebo M3 z hlediska jejich celkové konstrukce. In: *Úřední věstník Evropské unie*. 2015.
- [69] *REE Automotive Expected to Supply Cascadia Motion with Corner Technology Used in Electric Drive Units for Global OEM Market*. Online. REE. Dostupné z: <https://ree.auto/press-release/ree-automotive-expected-to-supply-cascadia-motion-with-corner-technology-used-in-electric-drive-units-for-global-oem-market/>. [cit. 2026-05-20].
- [70] *REE Corner*. Online. REE. Dostupné z: <https://ree.auto/sdv-technology/by-wire/>. [cit. 2026-05-20].
- [71] *SONGZ ESA Series Electric Bus Air Conditioner*. Online. OEM SONGZ ESA Series Electric Bus Air Conditioner Factory, Service | SONGZ. Dostupné z: <https://www.songzac.com/songz-esa-series-electric-bus-air-conditioner-product/>. [cit. 2026-05-16].
- [72] WIKIPEDIE, Příspěvatelé. *Městská autobusová doprava v Brně*. Online. In: Wikipedie: Otevřená encyklopedie. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/M%C4%9Bstsk%C3%A1_autobusov%C3%A1_doprava_v_Brn%C4%9B. [cit. 2026-05-15].
- [73] *Datový portál Brno - MHD*. Online. Data.Brno. Dostupné z: <https://data.brno.cz/pages/doprava--mhd>. [cit. 2026-05-15].

- [74] , Jiří Liebreich. *Topicí elektrobusy DPP spotřebují více elektřiny než vůz metra a blíží se spotřebě tramvaje*. Online. In: E15.cz. 2022. Dostupné z: <https://www.e15.cz/byznys/doprava-a-logistika/topici-elektrobusy-dpp-spotrebuji-vice-elekriny-nez-vuz-metra-a-blizi-se-spotrebe-tramvaje-1388729>. [cit. 2026-05-15].
- [75] CATL 3.2V 161Ah Rechargeable Prismatic 3.2v 160ah Lifepo4 Battery Cell Lithium Battery. Online. LiFePO4 Battery. Dostupné z: <https://www.lifepo4-battery.com/Products/CATL-Battery/CATL-161Ah-battery.html>. [cit. 2026-05-15].
- [76] *EV Battery Pack Designs: An Overview*. Online. Laserax. Dostupné z: <https://www.laserax.com/blog/battery-pack-design>. [cit. 2026-05-15].
- [77] *Pokrok v technologii baterií pro elektromobily: Co nás čeká v roce 2025*. Online. In: Veacom. 2025. Dostupné z: <https://www.veacom.cz/cs/blog/pokrok-v-technologie-baterii-pro-elektromobily-co-nas-ceka-v-roce-2025-38>. [cit. 2026-05-18].
- [78] SOLOMON, Matt. *The Rise of Batteries in Six Charts and Not Too Many Numbers*. Online. In: RMI. Dostupné z: <https://rmi.org/the-rise-of-batteries-in-six-charts-and-not-too-many-numbers/>. [cit. 2026-05-18].
- [79] *Základní informace o pneumatikách pro nákladní vozidla a autobusy*. Online. Jak vybírat pneumatiky pro nákladní vozidla, autobusy nebo autokary? Dostupné z: <https://pro.michelin.cz/pomoc-poradenstvi/znaceni-pneumatik-a-zakladni-informace>. [cit. 2026-05-15].
- [80] *Indexy pneumatik*. Online. K.A.L.T. Pneu a.s. Dostupné z: <https://www.kalt.cz/indexy-pneumatik/>. [cit. 2026-05-15].
- [81] *FORTUNE 275/70 R22.5 FC901 152/149J CITY BUS ALL DOT2023*. Online. Pneu-kvalitne.cz. Dostupné z: <https://www.pneu-kvalitne.cz/fortune-275/70-r22-5-fc901-152/149j-city-all-dot2023>. [cit. 2026-05-15].
- [82] *Jaké jsou a budou ceny elektřiny v roce 2026?* Online. In: E.ON. Dostupné z: <https://www.eon.cz/radce/blog/jake-budou-ceny-elekriny-v-roce-2026/>. [cit. 2026-05-18].
- [83] , PID. *Standard kvality PID*. Online. In: . Dostupné z: https://pid.cz/wp-content/uploads/system/sk_bus/Standardy_kvality_autobusy_2016-01-01.pdf. [cit. 2026-05-21].

- [84] JUSLIN, Patrik N. a SLOBODA, John A. *Handbook of music and emotion: theory, research, and applications*. https://books.google.cz/books/about/Handbook_of_Music_and_Emotion.html?id=t8j5pduTkboC&redir_esc=y. New York: Oxford University Press, 2010. ISBN 9780199230143.
- [85] HEVNER, Kate. Experimental Studies of the Elements of Expression in Music. Online. *The American Journal of Psychology*. 1936, roč. 48, č. 2, s. 246. ISSN 0002-9556. Dostupné z: <https://doi.org/10.2307/1415746>. [cit. 2026-05-21].

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

mm	milimetr
ABS	Anti-lock Braking System (antiblokovací systém)
AC	Alternating Current (střídavý proud)
ADS	Automated Driving System
AI	Artificial Intelligence (umělá inteligence)
BPA	bisfenol A
CO ₂	oxid uhličitý
ČR	Česká republika
ČSN	Česká státní norma
DC	Direct Current (stejnoseměrný proud)
EHK	Evropská hospodářská komise
EN	Evropská norma
EU	Evropská unie
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HEPA	High-Efficiency Particulate Air
HMI	Human-Machine Interface
HVAC	Heating, Ventilation, Air Conditioning
IMU	Inertial Measurement Unit
ISO	International Organization for Standardization
LED	Light Emitting Diode
LFP	Lithium Iron Phosphate (LiFePO ₄)
LiDAR	Light Detection and Ranging
MHD	městská hromadná doprava
MRC	Minimal Risk Condition (režim minimálního rizika)
OSN	Organizace spojených národů
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor

PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
RIV	Rejstřík informací o výsledcích
SAE	Society of Automotive Engineers
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SOC	State of Charge (stav nabití baterie)
SOTIF	Safety of the Intended Functionality
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
UV	ultrafialové (záření)
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2X	Vehicle-to-Everything
α	úhel (sklonu, zatáčení)
g	tíhové zrychlení
h	výška
m	hmotnost
R	poloměr
v	rychlost
Σ	suma
°	stupeň
°C	stupeň Celsia
A	ampér
Ah	ampérhodina
dB	decibel
h	hodina
Hz	hertz
Kč	koruna česká
kg	kilogram
km	kilometr
km/h	kilometr za hodinu
kW	kilowatt
kWh	kilowatthodina

l	litr
m	metr
m ²	metr čtvereční
min	minuta
mm	milimetr
m/s	metr za sekundu
m/s ²	metr za sekundu na druhou
ms	milisekunda
s	sekunda
t	tuna
V	volt
W	watt
Wh	watthodina

11 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2.1 - PRISMA diagram	4
Obr. 2.2 - Graf predikce podílu autonomních vozů na 1000 jednotek do roku 2030 [1].....	5
Obr. 2.3 - Omnibus před londýnskou Národní galerií v Londýně kolem roku 1890 [5]	7
Obr. 2.4 - první elektrický vlak v Berlíně roku 1879 [6]	7
Obr. 2.5 - Autobus MAN 750 HO-M10 [7]	7
Obr. 2.6 - vozítko Stanford Cart [12]	8
Obr. 2.7 - Vítězný autonomní automobil "Stanley" z roku 2005 [14]	9
Obr. 2.8 - Mercedes Benz Future Bus: Exteriér [17].....	11
Obr. 2.9 -Mercedes Benz Future Bus: Interiér [17].....	11
Obr. 2.10 - Volvo 7900 Electric Autonomous [18].....	12
Obr. 2.11 - Arrival Bus: Exteriér [20]	13
Obr. 2.12 - Arrival Bus: Interiér [20]	13
Obr. 2.13 – Zoox: exteriér [22]	14
Obr. 2.14 - Zoox: interiér [23].....	15
Obr. 2.15 - Aurigo Auto-Shuttle [25].....	16
Obr. 2.16 - Tesla "Robovan" [27].....	17
Obr. 2.17 - Scania NXT [28].....	17
Obr. 2.18 - Úrovně autonomie [29].....	19
Obr. 2.19 - Vizualizace jednotlivých úkonů autonomního vozidla a částí, které kroky vykonávají [32]	20
Obr. 2.20 - graf vizualizace počtu senzorů v závislosti na úrovni autonomie [33].....	20
Obr. 2.21 - Umístění LiDARu v čele tramvaje výrobce Škoda Group [35]	21
Obr. 2.22 - vizualizace dat získaných LiDAREm (barevně odlišené jsou jednotlivé překážky a silnice) [34]	21
Obr. 2.23 - vizualizace umístění radarů na vozidle pro pokrytí 360° rozhledu [33]	22
Obr. 2.24 - Vizualizace komunikace V2X [41]	23
Obr. 2.25 - Pantografové nabíjení [44].....	24
Obr. 2.26 – Nízkopodlažní portálová náprava ZF AVE130 [48]	25
Obr. 2.27 - Tyrkysové podsvícení autonomně řízeného vozidla [67]	27

Obr. 4.4.1 - Schéma cílů	33
Obr. 4.4.2 - Schéma omezení	34
Obr. 4.4.3 - Glassbox	34
Obr. 4.4.4 - Ergonomické schéma.....	35
Obr. 4.4.5 - výběr skic z fáze průzkumu variantních směrů	36
Obr. 4.4.6 - skica varianty I.....	37
Obr. 4.4.7 - skica varianty II.	38
Obr. 4.4.8 - skica varianty III.	39
Obr. 5.5.1 základní pohledy na předběžnou variantu	41
Obr. 5.5.2 - základní rozměry předběžného návrhu	42
Obr. 5.5.3 – návrh rozložení vnitřních komponent elektrobusu.....	42
Obr. 5.5.4 – Modul REECorner [70].....	44
Obr. 5.5 - Rozmístění LiDARů	45
Obr. 5.5.6 - Rozmístění kamer	45
Obr. 5.5.7 - Rozmístění radarů	46
Obr. 5.5.8 - Rozmístění ultrazvukových senzorů.....	46
Obr. 5.5.9 - HVAC jednotka ESA GSA-IE [71].....	47
Obr. 5.5.10 - článek baterie CATL B161 [75].....	49
Obr. 5.5.11 - Graf znázorňující vývoj ceny a energetické hustoty baterií v čase [78].....	50
Obr. 5.5.12 - Pneumatika Fortune 275/70 R22,5 [81]	51
Obr. 6.6.1 - Perspektivní pohled na finální variantu.....	54
Obr. 6.6.2 - Čelní pohled na finální variantu.....	55
Obr. 6.6.3 - Boční pohled na finální variantu	56
Obr. 6.6.4 - Zadní pohled na finální variantu	57
Obr. 6.6.5 - Pohled shora na finální variantu.....	57
Obr. 6.6.6 - Interiér finální varianty	58
Obr. 6.6.7 - Pohled do interiéru zespodu	58
Obr. 6.6.8 Základní rozměry finální varianty [1:50]	59
Obr. 6.6.9 - Rám finální varianty.....	60
Obr. 6.6.10 - Rám s nápravami a podlahou finální varianty	60

Obr. 6.6.11 - Dělení karoserie finální varianty	61
Obr. 6.6.12 Postup konstrukce interiéru a vnějšku finální varianty.....	61
Obr. 6.6.13 - Výsledná konstrukce finální varianty	62
Obr. 6.6.14 - Logika stavů předních světel	63
Obr. 6.6.15 - Logika stavů zadních světel.....	63
Obr. 6.16 - Logika funkčnosti dveří.....	64
Obr. 6.17 - Vysunutá plošina pro vozíčkáře.....	65
Obr. 6.18 - Komunikace s okolím.....	66
Obr. 6.19 - Notový zápis tónů při vyjíždění ze zastávky	67
Obr. 6.20 - Notový zápis tónů při zpomalování při příjezdu na zastávku	67
Obr. 6.21 - Příklad vnitřní komunikace úkonů elektrobusu	68
Obr. 6.22 - Rozmístění senzorů autonomního řízení finální variant.....	69
Obr. 6.23 - Výklopný systém čištění senzorů v A-sloupku	69
Obr. 6.24 - Alternativní verze senzorů umístěných v A-sloupcích	70
Obr. 6.25 - Maximální vytočení kol finální varianty	70
Obr. 6.26 - Manévrovací schopnosti finální varianty	71
Obr. 6.27 – Pantografové nabíjení finální varianty	72
Obr. 6.28 – Schéma proudění vzduchu do HVAC jednotky a k bateriím	72
Obr. 6.29 - Ergonomické rozměry interiéru	73
Obr. 6.30 - Ergonomie nástupu do vozidla z vozovky a ze zastávky	74
Obr. 6.31 - Nástup z vozovky při aktivním kneelingu.....	74
Obr. 6.32 - nástup vozíčkáře	75
Obr. 6.33 - Ergonomie vnějších tlačítek	75
Obr. 6.34 - Ergonomie vnitřních tlačítek	76
Obr. 6.35 – Umístění nouzových tlačítek	76
Obr. 6.36 - Vizualizace příčné stability elektrobusu	80
Obr. 6.37 - Barevné varianty.....	81
Obr. 6.38 - Logo a symbol.....	82

12 SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1 - Srovnání variant	40
Tab. 5.1 - Technické údaje HVAC jednotky ESA GSA-IE [71]	47
Tab. 5.2 - Přepokládaná průměrná spotřeba elektrické energie navrhovaného elektrobusu	48
Tab. 5.4 - Stanovení přibližné hmotnosti elektrobusu	51
Tab. 5.5 - Odhad výrobních nákladů	52
Tab. 5.6 - Odhad provozních nákladů	53
Tab. 6.1 - Údaje pro výpočet výšky těžiště	79
Tab. 5.2 - Klíčové parametry finálního návrhu elektrobusu	85

13 SEZNAM PŘÍLOH

Zmenšené postery

- Sumarizační plakát
- Technický plakát
- Ergonomický plakát
- Designerský plakát

Samostatné přílohy

- Sumarizační plakát A1
- Technický plakát A1
- Ergonomický plakát A1
- Designerský plakát B1
- Fyzický model

ZMENŠENÝ SUMARIZAČNÍ PLAKÁT

ATNOM

Design autonomního elektrobusu

SUMARIZAČNÍ PLAKÁT

ATNOM je návrh plně autonomního městského elektrobusu s přepravní kapacitou 65 cestujících. Mezi hlavní designové prvky vozidla patří měkké linie, obousměrná symetrie vyjadřující autonomní charakter, integrace senzorů autonomního řízení přímo do těla vozidla, velké prosklené plochy maximalizující vizuální propojení interiéru s exteriérem a vícevrstvý systém světelné a zvukové komunikace s okolím i cestujícími. Elektrobusem je nízkopodlažní s bezbariérovým nástupem. Hlavním přínosem návrhu je vize městské hromadné dopravy, která plně využije potenciál autonomního provozu: Elektrický pohon ve spojení s pantografovým opportunity charging představuje řešení udržitelné městské mobility s nulovými lokálními emisemi.



PLNĚ ELEKTRICKÝ
bez lokálních emisí



OPPORTUNITY CHARGING
pantografové nabíjení



4WS, 4WD
pohon a zatáčení všech kol



ÚPLNÁ AUTONOMIE
L5 SAE J3016

DESIGN AUTONOMNÍHO ELEKTROBUSU / DIPLOMOVÁ PRÁCE / Autor: Bc. Martin Šmahel / Vedoucí práce: Ing. David John / VUT v Brně / FSI / ÚK / OPD / 2026



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ INŽENÝRSTVÍ
FAKULTA STROJNÍHO
V BRNĚ



ÚSTAV
KONSTRUOVÁNÍ



odbor
průmyslového
designu

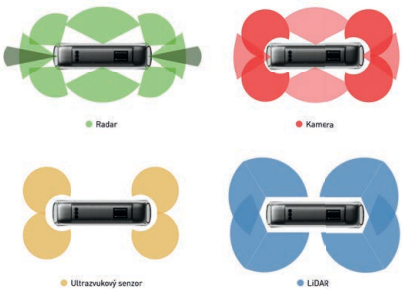
ZMENŠENÝ TECHNICKÝ PLAKÁT

ATNOM

Design autonomního elektrobusu

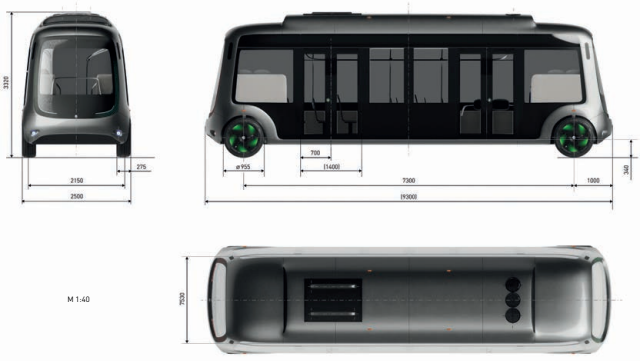
TECHNICKÝ PLAKÁT

ATNOM je návrh plně autonomního městského elektrobusu pro městskou hromadnou dopravu s přepravní kapacitou 65 cestujících. Konstrukce stojí na nosném svařovaném ocelovém rámu, který nese podvozek s modulárními pohonnými jednotkami, karoserii, systémy autonomního řízení a na střeše LFP trakční baterii, HVAC jednotku a inverter napětí. Každý ze čtyř kol disponuje vlastním elektromotorem s nezávislým zatížením, což umožňuje malý radiální zatížení a vysokou manévrovatelnost ve městském provozu. Dobře je řešeno pantografovým systémem pro opportunity charging. Sensory zajišťují 360° pokrytí okolím kombinací LiDARů, kamer, radarů a ultrazvukových senzorů integrovaných přímo do těla vozidla, do A-sloupků a prosklených ploch.



Technické parametry

Klasifikace vozidla dle EHK č. 107	M3, třída I. (městský autobus)
Úroveň autonomie dle SAE J3016	L5
Přepravní kapacita	65 osob (25 sedících + 40 stojících) / 61 osob + 1 místo pro vozíčkáře / kočárek
Celková užitná plocha vnitřku vozidla	~ 18 m²
Kapacita baterie, typ technologie	130 kWh, LFP
Celkový výkon elektromotorů	360 kW (4x 90 kW)
Průměrná spotřeba el. energie na 1 km	~ 1,5 kWh/km
Dojezd	60 km
Rychlost dobíjení 60 %	15 min při 300 kW
Systém pohonu a zatáčení	drive by wire 4WD, 4WS
Rozvor, rozchod	7 500 mm, 2 150 mm
Minimální středový rádius zatáčení	~ 8,65 m
Maximální užitečné zatížení	~ 3 000 kg
Pohotovostní hmotnost	~ 10 000 kg
Úhel statické stability	~ 34°
Výčet senzorů autonomního řízení	LiDAR - 4x Kamera - 8x (2x s termovizí) Radar 10x (2x long range) Ultrazvukový senzor - 4x



DESIGN AUTONOMNÍHO ELEKTROBUSU / DIPLOMOVÁ PRÁCE / Autor: Bc. Martin Šmahel / Vedoucí práce: Ing. David John / VUT v Brně / FSI / ÚK / OPD / 2026



ZMENŠENÝ ERGONOMICKÝ PLAKÁT

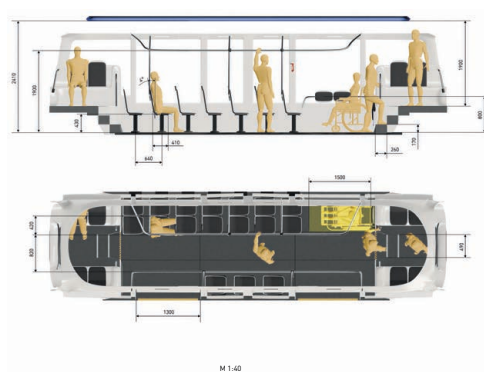
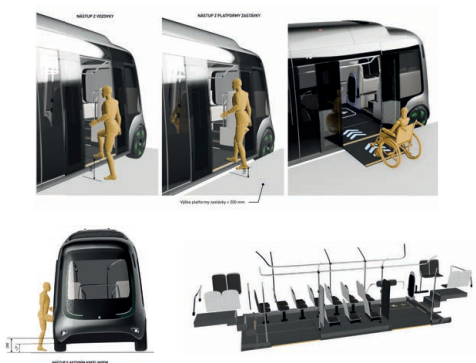
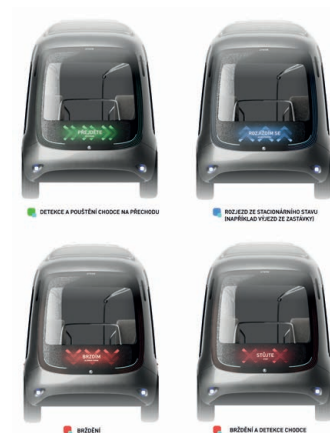
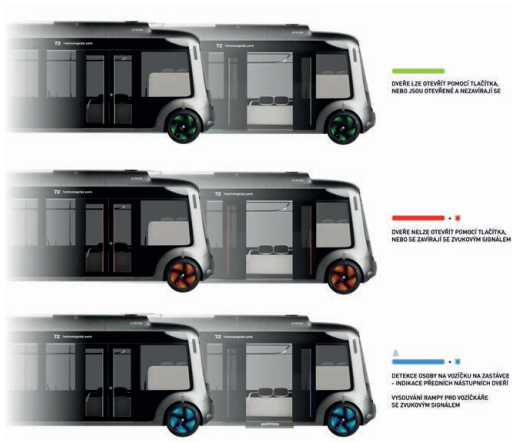
ATNOM

Design autonomního elektrobuse

ERGONOMICKÝ PLAKÁT

ATNOM je návrh plně autonomního městského elektrobuse pro městskou hromadnou dopravu s přepravní kapacitou 65 cestujících, alternativně 61 cestujících a místa pro osobu na vozíku nebo s kočárkem. Vnitřní prostor je řešen jako nízkopodlažní s bezbariérovým nástupem. Sedadla, madla a opěrné prvky vycházejí ze standardizovaných ergonomických rozměrů. Nástup do vozidla je usnadněn funkcí kneelingu, která snižuje výšku nástupní hrany, a výškovou rampou pro osoby s omezenou pohyblivostí ukrytou

v podvozku. Vyhrazené místo pro vozíček nebo kočárek je vybaveno bezpečnostním pásem, opěrnou plochou a sklápěcí loketní opěrkou. Komunikace s cestujícími je řešena vícevrstvý systém informací obrazovek, ambientního osvětlení a zvukových signálů, který zajišťuje srozumitelnost informací nezávisle na smyslových schopnostech jednotlivých cestujících. V interiéru jsou integrovaná nouzová tlačítka pro zastavení a otevření dveří.



DESIGN AUTONOMNÍHO ELEKTROBUSU / DIPLOMOVÁ PRÁCE / Autor: Bc. Martin Šmahel / Vedoucí práce: Ing. David John / VUT v Brně / FSI / ÚK / OPD / 2026

T VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ INŽENÝRSTVÍ
V BRNĚ

K ÚSTAV
KONSTRUOVÁNÍ

X odbor
průmyslového
designu

ZMENŠENÝ DESIGNERSKÝ PLAKÁT

ATNOM

Autonomní elektrobuses

2026

Martin Šmahel

vedoucí: Ing. David John

ATNOM je návrh plně autonomního městského elektrobuse s přepravní kapacitou 65 cestujících. Mezi hlavní designové prvky vozidla patří měkké linie, obousměrná symetrie vyjadřující autonomní charakter, integrace senzorů autonomního řízení přímo do těla vozidla, velké prosklené plochy maximalizující vizuální propojení interiéru s exteriérem a vícevrstvý systém světelné a zvukové komunikace s okolím i cestujícími. Elektrobuses je nízkopodlažní s bezbariérovým nástupem. Hlavním přínosem návrhu je vize městské hromadné dopravy, která plně využije potenciál autonomního provozu. Elektrický pohon ve spojení s pantografovým opportunity charging představuje řešení udržitelné městské mobility s nulovými lokálními emisemi.

