



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

UŽITÍ PŘEVODOVÝCH ÚSTROJÍ U ELEKTROMOBILŮ

USAGE OF TRANSMISSION AT ELECTRIC VEHICLES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Běloušek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kamil Řehák, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	Ondřej Běloušek
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Kamil Řehák, Ph.D.
Akademický rok:	2019/20

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

Užití převodových ústrojí u elektromobilů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Elektromobilita je v posledních letech velmi aktuální problematikou. V některých koncepcích je využíváno převodového ústrojí. Vzhledem k absenci spalovacího motoru, jež je dominantním zdrojem hluku, je nutné se zabývat vibracemi a hlukem u dalších komponent, převodového ústrojí nevyjímaje.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše dostupné literatury.

Vytvoření přehledu koncepcí vozidel.

Vytvoření přehledu koncepcí pohonného traktu se zaměřením na převodové ústrojí.

Návrh technického experimentu s cílem měření vibrací a hluku u převodového ústrojí.

Seznam doporučené literatury:

EMADI, Ali. Advanced Electric Drive Vehicles, CRC Press, 2015. ISBN 978-1-4665-9769-3.

SANDÉN Björn a WALLGREN Pontus. Systems perspectives on electromobility, Chalmers University of Technology, 2014. ISBN 978-91-980973-9-9.

ZHENHE, Li, KHAJEPOUR, Amir, SONG, Jinchun. A comprehensive review of the key technologies for pure electric vehicles, Energy, Volume 182, 2019, pp. 824-839, ISSN 0360-5442.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce nejprve rozděluje elektromobily podle jednotlivých koncepcí, přičemž cílem je přiblížit a popsat charakteristické prvky, kterými se liší od konvenčních vozů a jenž jsou v různých typech elektromobilů užity. Z podstaty elektromobilu je zřejmé, že elektrická energie potřebná k pohonu musí být vhodným způsobem skladována, a proto je část práce zaměřena na baterie a komponenty k takovému pohonu potřebné. Pohonný trakt elektromobilů, jenž je dále popisován, se liší v závislosti na přítomnosti či absenci spalovací jednotky a míře jejího příspěvku k pohonu vozu. Společným znakem je elektromotor, který mění elektrickou energii na mechanickou, a bez kterého by pohonný trakt nebyl kompletní. Využití převodovky v elektromobilech jsou ovlivněny typem pohonné jednotky, se kterou mají být v součinnosti, a proto je z každé skupiny vybráno jedno ústrojí. Zástupcem hybridů je planetové převodové ústrojí vozu Toyota Prius 2010, čistě bateriové vozy jsou zastoupeny jednostupňovou převodovkou společnosti Tesla a zmíněny jsou vícestupňové převodovky udávající trend v této oblasti. Vzhledem k absenci spalovacího motoru u některých typů se do popředí, co se hluku a vibrací týče, dostávají převodová ústrojí, u kterých je hlavním zdrojem vibrací záběr ozubených kol a řinčení dalších komponent převodovky. Těžištěm poslední části práce je návrh technického experimentu pro měření vibrací a hluku od dvoustupňové automatické převodovky, kterému předchází teoretický základ věnující se měření těchto nežádoucích projevů. Samotný návrh bere ohled na vhodnost měřicí aparatury, správnou volbu komponent realizující uzavřenou smyčku a také na zástavbový prostor akustické komory.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektromobil, převodovka, baterie, pohonný trakt, návrh technického experimentu, vibrace, hluk

ABSTRACT

At first bachelor thesis divides different conceptions of electric vehicles with the aim to describe characteristic components which electric vehicles contain, and that make it different in comparison with conventional cars. From the principle of the electric vehicle it is obvious that electric energy which is necessary for electric drive must be stored and for this reason the batteries and important components are described. The next part is dedicated to the powertrain which is affected by the presence or absence of an internal combustion engine and its usage rate. Common feature is an electric machine which transforms electrical energy into mechanical energy, and which makes powertrain complete. Gearboxes used at electric vehicles are the next part which is affected by the type of power unit that they cooperate with. For that reason, one representative from each part is described. The representative of hybrid electric vehicles is planetary gear set of Toyota Prius 2010, representative of battery electric vehicles is one-speed transmission of Tesla cars and in the end the multi-speed transmission is mentioned because it is today's trend. Because of the absence of an internal combustion engine for some types of electric vehicles, the noise and vibrations from gearbox come to the fore. The main source of the vibration is gears teeth contact and rattle of the other components. The last part of the thesis is focused on the design of a technical experiment that is suitable for measuring vibration and noise from two-speed automatic transmission. Firstly, the theoretical basis of measurement is described. The design itself takes into account the suitable measuring equipment, the right choice of components that realize closed loop and installation space of the acoustic chamber.

KEYWORDS

Electric vehicle, gearbox, battery, powertrain, design of a technical experiment, vibrations, noise

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

BĚLOUŠEK, Ondřej. Užití převodových ústrojí u elektromobilů. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124746>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 60 s. Vedoucí práce Kamil Řehák.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 26. června 2020

.....

Ondřej Běloušek

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji Ing. Kamilovi Řehákovi, PhD. za velmi ochotnou spolupráci, trpělivost a cenné rady. Poděkování také patří mým rodičům za výraznou podporu během celého studia.

OBSAH

Úvod.....	12
1. Základy elektromobilu	13
1.1 Stručná historie elektromobility	13
1.2 Koncepce elektromobilu.....	14
1.2.1 Základní dělení elektromobilů	14
1.2.2 Baterie	17
1.2.3 Princip rekuperace.....	19
1.2.4 Nabíjení baterie	19
1.2.5 Výkonová elektronika	20
1.3 Tepelný management	21
1.4 Emise a ekologický pohled na elektromobilitu	23
2 Pohonný trakt elektromobilu	24
2.1 Koncepce pohonného traktu HEV.....	24
2.1.1 Paralelní hybridy	24
2.1.2 Sériové hybridy	26
2.1.3 Sériově-paralelní hybridy.....	27
2.1.4 Multi-mód hybridy	28
2.2 Koncepce pohonného traktu BEV	29
2.3 Elektromotory.....	31
2.4 Převodové ústrojí.....	33
2.4.1 Převodové ústrojí vozu Toyota Prius 2010	33
2.4.2 Převodové ústrojí vozu Tesla Model S	35
2.4.3 Vícestupňová převodovka.....	35
3 Měření hluku a vibrací od převodových ústrojí.....	37
3.1 Příčiny hluku a vibrací u převodovek.....	37
3.2 Měřicí aparatura	37
3.3 Testovací zařízení převodovek	39
3.3.1 Uzavřený silový kruh	39
3.3.2 Otevřený silový kruh.....	40
4 Koncepční návrh experimentu.....	41
4.1 Zkušební místnost.....	41
4.2 Vybraná převodovka	41
4.3 Koncepce testovacího stavu	42
4.4 Výpočet ztrát měřicí soustavy	44
4.5 Určení parametrů uzavřené smyčky	45
4.6 Volba snímače krouticího momentu.....	46
4.7 Hnací zařízení.....	48
4.8 Rychloběžná převodovka	48
4.9 Stolice uzavřené smyčky	50
4.10 Princip torzního předeprnutí	52

Závěr	53
Seznam použitých zkratek a symbolů.....	59

ÚVOD

Doprava obecně je neodmyslitelnou součástí každodenního života. Drtivá většina silničních prostředků je dnes poháněna spalovacími motory, ať už se jedná o osobní nebo nákladní vozy. S postupným vývojem civilizace roste i množství vyrobených automobilů. Fakt, že se doprava neustále rozrůstá, má ovšem velmi negativní vliv na ekologický stav planety Země. Neustálý tlak ze strany politiků a světových organizací tak již po desetiletí vede k rozvoji elektromobility, která se nabízí jako jedno z řešení emisní situace ve světě.

Znakem elektromobilů je absence spalovacího motoru nebo omezení jeho činnosti, a tedy redukce emisí CO₂. Tím se ale také mění celá koncepce vozu, včetně pohonného traktu. Postupný vývoj v oblasti elektromobility neustále přináší nová řešení a varianty, jež je třeba sjednotit a vysvětlit. Vytvoření uceleného přehledu si klade za cíl první část práce. Je známo, že pro přenos kroutícího momentu a následný pohon kol stačí pouze jednostupňová převodovka. V poslední době je však vývoj velmi intenzivně zaměřen i na vícestupňové převodovky, které jsou také předmětem této práce.

S absencí spalovací jednotky odpadá primární zdroj hluku automobilu. Požadavek na komfortní dopravu hýbe dnes automobilovým průmyslem, a tak je nasnadě hledat nežádoucí zdroje hluku a vibrací jinde. Z tohoto důvodu je důležité se zabývat hlukem a vibracemi také od převodového ústrojí elektromobilu. Snahou je navrhnout vhodnou koncepci, pomocí které by bylo možné hluk a vibrace od převodovky měřit. Výsledný návrh by měl co nejlépe simulovat reálné provozní podmínky, a proto je třeba se zamyslet nad způsobem zatěžování převodovky. Do úvah je třeba zahrnout i dostupnost a správnou volbu potřebných komponent, přičemž důležitým faktorem je eliminace nežádoucího hluku.

1. ZÁKLADY ELEKTROMOBILU

1.1 STRUČNÁ HISTORIE ELEKTROMOBILITY

Elektrický pohon není záležitostí pouze posledních pár let, ale počátek tohoto fenoménu sahá až do první poloviny 19. století. Za prvního konstruktéra elektricky poháněného vozidla je považován Holanďan Sibrandus Stratingh a jeho asistent Christopher Becker. Jejich vynález, který je na obrázku 1, se datuje do roku 1835, tedy zhruba 50 let před prvním automobilem se spalovacím motorem. Vůz připomínal spíše dětské odrážedlo a zdrojem energie byly jednorázové články, které bylo nutné po jízdě vyměnit. [1]



Obr. 1 Vůz sestrojený Sibrandem Stratinghem a jeho asistentem [3]

Roku 1859 francouzský fyzik Gaston Planté vynalezl olověný akumulátor, tím byl umožněn vznik známé autobaterie, a tedy možnost začít hojně vyrábět elektromobily. Na přelomu 19. a 20. století je pak vyrobeno odhadem 4200 automobilů v USA, z nichž zhruba 38 % činily vozy na elektrický pohon. Tato vozidla byla dostupná i pro střední třídu a ulice byly dostatečně zaplněny dobíjecími stanicemi. [1], [4]

Pozadu nezůstali ani Češi, a to zásluhou Františka Křižíka, který roku 1895 zkonstruoval kočár hnaný jedním stejnosměrným elektromotorem o výkonu 3,6 kW s baterií o 42 člancích, s pozdější úpravou pohonu dvěma menšími motory, každý s výkonem 2,2 kW, které umístil do zadních kol. Unikátem této doby je pak vůz „La Jamais Contente“, v překladu „Věčně nespokojená“, který sestrojil Belgičan Camille Jenatton. Tento téměř tunový vůz pak jako první překonal magickou hranici rychlosti $100 \text{ km} \cdot \text{hod}^{-1}$ a svým tvarem připomínal doutník. [2]

Nevýhodou těchto vozů byla nízká dojezdová vzdálenost, která činila zhruba 60 km a také malá provozní rychlost pohybující se okolo $30 \text{ km} \cdot \text{hod}^{-1}$. Tyto nedostatky vyřešil známý průmyslník Henry Ford, který přišel s vozem Ford model T, avšak se spalovacím motorem. Tento automobil pak nabídl dojezd 200 km a provozní rychlost $60 \text{ km} \cdot \text{hod}^{-1}$. Vzhledem k lacinému benzínu a průmyslové výrobě Fordu se elektromobily dostaly do pozadí. [1]

Naději pro elektromobily oživila ropná krize roku 1973, kdy se opět začalo uvažovat o udržitelných zdrojích a objevily se výzkumy spojené s elektromobilitou. Dokonce i v tehdejší Československu se začalo pracovat na elektricky poháněném vozidle zvaném EMA. Tento výzkum byl ovšem později zastaven. Poté, co ceny ropy opět klesly, se svět sice vrátil k hojnému užívání spalovacích motorů, ale na výzkumném poli se elektromobily udržely. Zlomovým bodem je pak přijetí zákona o vozidlech s nulovými emisemi (ZEV) v roce 1990 v Kalifornii. [2]

Od roku 1996 byly automobilky prodávající vozy na území Kalifornie podle tohoto zákona povinny nabízet minimálně jeden typ bezemisního vozidla, a tak se tyto první kusy objevují na amerických silnicích. Mezi nejčastější zástupce patřily GM EV1, Toyota RAV4 EV, Ford Ranger EV nebo Honda EV Plus. Bohužel většina těchto aut se na trhu neuchytla a elektromobily tak zůstávají v pozadí ještě chvíli. [1], [2]

Myšlenka elektromobility je oživena diskuzemi o emisích a znečišťování ovzduší a také opětovným strachem z nedostatku ropy. Reakcí na tyto problémy je pak postupná elektrifikace světových automobilek. Např. v roce 2015 známá automobilka BMW prohlašuje, že v příštích deseti letech hodlá plně elektrifikovat a je následována dalšími výrobci automobilů. Velkým tahounem v oblasti elektromobility je společnost Tesla, která doposud určuje trend ve světě elektromobilů. Mezi její známé vozy patří například Model S, Model 3 nebo novinka v podobě Cybertrucku. Dnes již téměř každý větší výrobce automobilů představil svůj elektrický, případně hybridní model. Například ŠKODA AUTO představila svůj vůz VISION E, německá automobilka BMW pak své modely i3 a i8. Pozadu nezůstala ani automobilka Peugeot se svými hybridními modely 208, 2008 a 3008. Za zmínku stojí hojně využívaná Toyota Prius. [4], [5]

1.2 KONCEPCE ELEKTROMOBILU

Elektromobil lze definovat jako vozidlo na elektrický pohon. Elektrická energie je skladována v bateriích a získávána dobíjením z dobíjecích stanic nebo rekuperací. Základem každého elektromobilu je elektrický točivý stroj, který slouží jako trakční motor nebo jako generátor. Vozidlo obsahuje měniče napětí, nabíječky a odpovídající kabeláž. Součástí je také zásuvka pro nabíjení vozu, samostatná baterie skladující energii pro příslušenství vozu a samozřejmě řídicí kontrolní jednotka. Mimo jiné vůz obsahuje chladičový systém a bezpečnostní prvky pro baterie. Jednotlivým typům elektromobilů a těmto rozdílovým komponentám, které v konvenčních automobilech nejsou přítomny, se práce věnuje v následujících podkapitolách. Pohonným traktem se zabývá kapitola č. 2. [9], [10]

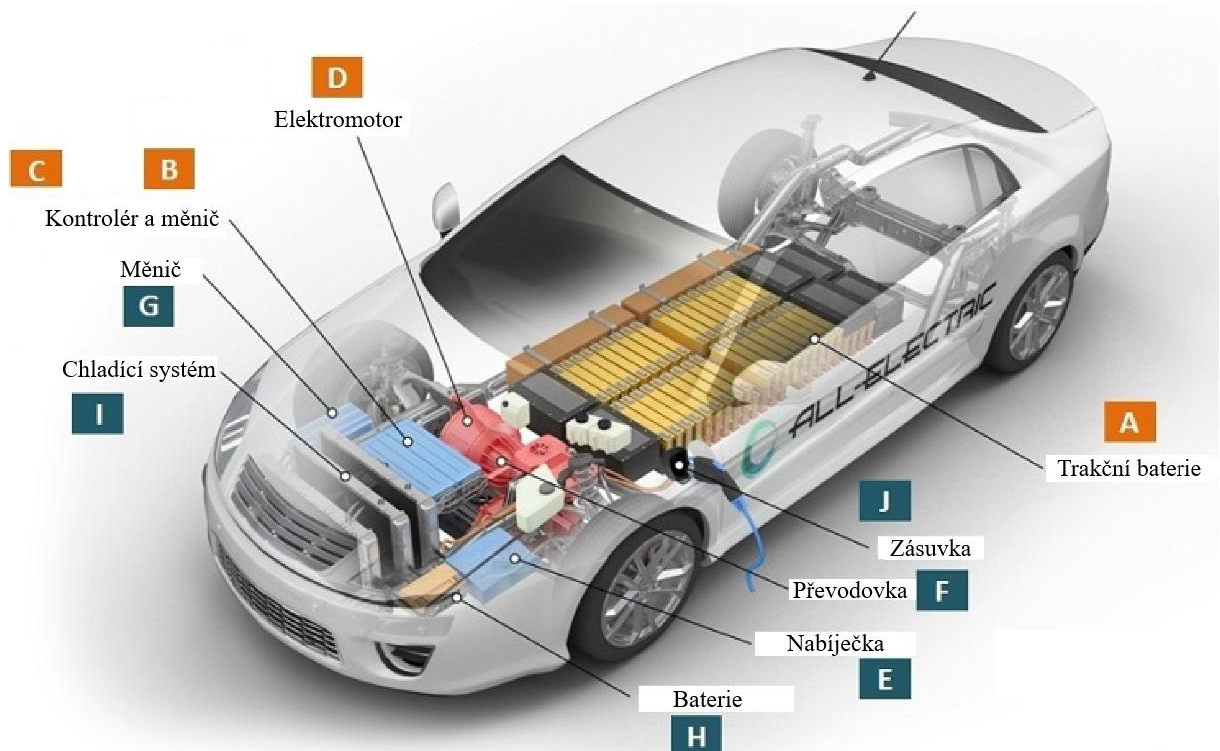
1.2.1 ZÁKLADNÍ DĚLENÍ ELEKTROMOBILŮ

Elektromobily se dělí především dle způsobu a míry nakládání s elektrickou energií. Základní dělení dle míry elektrifikace je tedy následující: [7]

- bateriové elektromobily
- vodíkové elektromobily
- hybridní elektromobily

Bateriové elektromobily jsou běžně označovány zkratkou BEV. Ta vychází z anglického výrazu „battery electric vehicle“. Elektrická energie je uchovávána v bateriích a tato forma energie se získává primárně z dobíjecích stanic. Tento typ elektromobilů je poháněn pouze elektromotorem, jenž je napájen přímo ze soustavy baterií. Jiný výraz, který vystihuje bateriové elektromobily je mimo jiné „čistě elektrický vůz“. Mezi nejznámější zástupce patří vozy

společnosti Tesla. Jako další lze uvést elektrický model Škoda CITIGO nebo také Volkswagen e-Golf. Představu o pozici charakteristických komponent BEV získáme z obrázku 2. [6], [7]



Obr. 2 Základní komponenty BEV [10]

Výraz „fuel cell electric vehicle“ (FCEV) označuje vodíkový elektromobil. Jedná se o elektromobil s palivovými články, a to výhradně na vodík. Mezi zástupce lze zařadit vozy Hyundai Nexa nebo Toyota Mirai. Stejně jako BEV i tento typ obsahuje pouze elektromotor či elektromotory, nicméně liší se principem získávání energie. Majoritní část baterie je nahrazena nádrží na vodík a sestavou palivových článků, ve kterých elektrický proud vzniká reakcí vodíku s kyslíkem. Je zde katalyzátor, který zvyšuje reaktivitu kyslíku a usnadňuje celý chemický proces, během kterého vzniká voda a elektrický proud. Problémem je plynulý přísun vzduchu a také odvod vzniklé vody při nízkých teplotách. Značnou výhodou je rychlost tankování vodíku, která je srovnatelná s rychlostí tankování benzínu nebo nafty. Vzhledem k ceně vodíku a celkové složitosti konstrukce se tento typ zatím příliš nevyužívá, a proto je v práci zmíněn pouze okrajově. [6], [7], [8]

Pro hybridní elektromobily se užívá zkratka HEV („hybrid electric vehicle“). Hybridy se liší od BEV v tom, že je ve voze zakomponován jak elektromotor, tak spalovací motor. Takový pohon je pak označován jako hybridní. Hybridních vozů je v dnešní době celá řada a většina automobilek má ve svém výrobním portfoliu tento typ. Mezi známé zástupce patří například Škoda Superb PHEV, Hyundai IONIQ nebo již zmíněná Toyota Prius. [6], [9]

DĚLENÍ HEV DLE STUPNĚ HYBRIDIZACE

Dle velikosti a funkce elektromotoru, tedy hybridizace, se hybridní elektromobily dále dělí následovně: [6]

- micro hybridy

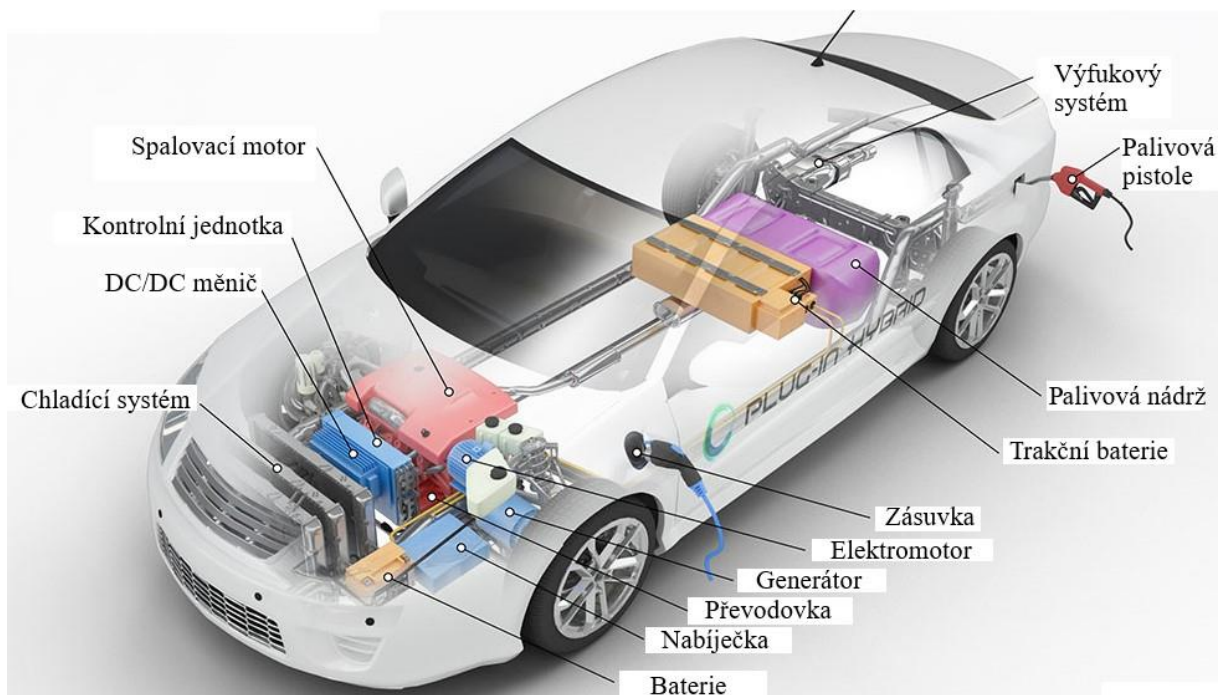
- mild hybridy
- full hybridy
- plug-in hybridy

Micro hybrid nemá elektromotor pro pohon vozidla. Elektrický stroj je instalován v podobě malého integrovaného alternátoru nebo startéru. Plní pouze funkci start/stop a je schopen rekuperovat energii do 12 V baterie, kterou hybrid využívá ke snížení spotřeby paliva a také emisí CO₂. Schopnost rekuperace má dnes téměř každý využívaný elektromotor. [6]

Mild hybrid již má elektromotor, který je schopen pohonu, nicméně k pohonu kol vůz využívá pouze spalovací motor. Elektromotor má zde pouze pomocnou funkci, pomáhá spalovacímu motoru např. při rozjezdu nebo zrychlování. Elektromotor je pak obvykle doplněn akumulátorem s větší kapacitou elektrické energie, což umožňuje účinnější rekuperaci, která opět přispívá k výraznějšímu snížení spotřeby paliva a emisí CO₂. [6]

Full hybridem se pak myslí automobil, který je schopen pohánět vůz pouze elektromotorem. Důležité je říci, že u full hybridu se trakční baterie dobíjí pouze rekuperací. [6], [7]

Velmi obvyklou variantou je pak plug-in hybrid, pro který se běžně užívá zkratka PHEV, tedy „plug-in hybrid electric vehicle“. Hlavním rozdílem oproti full hybridu je fakt, že energii do trakční baterie u plug-in hybridu je možné přivést také ze sítě, a to buď z dobíjecí stanice nebo ze zásuvky. Výhodou plug-in hybridu je větší dojezd pouze na elektrický pohon, který se pohybuje kolem 50 km na jedno nabití. Je třeba dodat, že energie (baterie) je i po nabití ze sítě během jízdy stále dobíjena rekuperací. Nevýhodou hybridů je jednoznačně jejich váha vzhledem k přítomnosti jak spalovacího, tak elektrického motoru a dalších potřebných komponent spojených s přítomností obou pohonných jednotek. Složitější konstrukce je patrná z obrázku 3. [6], [7], [10]



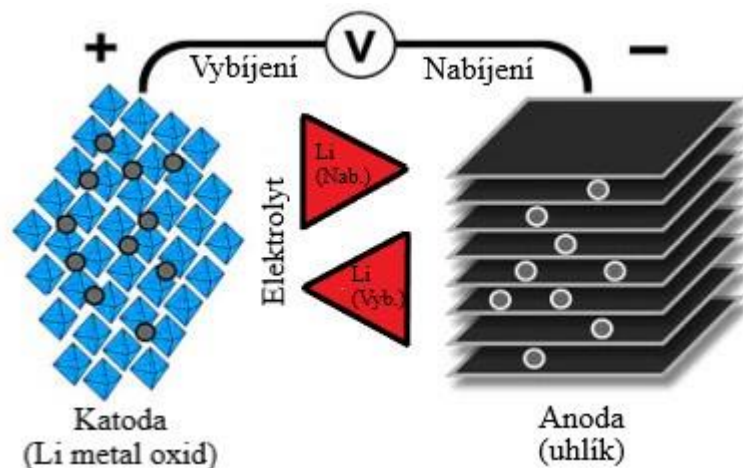
Obr. 3 Základní komponenty PHEV [11]

1.2.2 BATERIE

Elektrická energie se nejčastěji skladuje v kondenzátoru nebo akumulátoru. Na tyto prvky jsou kladeny určité požadavky, a to především vysoká objemová hustota energie, měrný výkon, životnost, bezpečnost a dostupnost. Měrný výkon kondenzátoru je relativně vysoký, a to přibližně 5 kW/kg, zatímco jeho objemová hustota energie je nízká a činí zhruba 6 Wh/kg. Objemové hustoty energie u baterií jsou mnohem vyšší. Pohybují se v rozmezí 100-200 Wh/kg. To je jedním z důvodů, proč se v elektromobilech využívají baterie. Nejčastěji používanými typy baterií jsou lithium-iontové baterie a nikel-metal hydridové. V poslední době se též rozvíjí lithium-polymerový akumulátor, což je typ akumulátoru s elektrolytem v pevném skupenství. Mezi ty méně používané akumulátory se řadí například olovené nebo na bázi sodíku, niklu a chloridu. [4], [9]

LITHIUM-IONTOVÝ AKUMULÁTOR (LI-ION)

Princip této baterie je založen na pohybu kationtů lithia Li_+ . Článek baterie se skládá z kladné a záporné elektrody a elektrolytu. Materiálů kladné elektrody je více, ale nejčastější je $LiCoO_2$. Základem všech elektrod je lithium, kov a kyslík. Nejběžnějším materiálem pro zápornou elektrodu je pak grafit. Hodnota napětí jednoho článku pak závisí právě na zvoleném materiálu. Elektrolytem, tedy vodivým prostředím mezi elektrodami jsou pak lithiové soli. Princip tohoto akumulátoru je na obrázku 4. [4], [16]



Obr. 4 Princip Li-ion akumulátoru [15]

Baterie je galvanický článek a elektrická energie je získávána z elektrochemické reakce uvnitř článku. Výsledkem reakcí je vznik rozdílu potenciálů mezi elektrodami, a tedy vznik elektromotorického napětí. V článku jsou pak elektrody připojeny k měděné a hliníkové destičce, které slouží jako proudové kolektory. [4]

Výhody: [16]

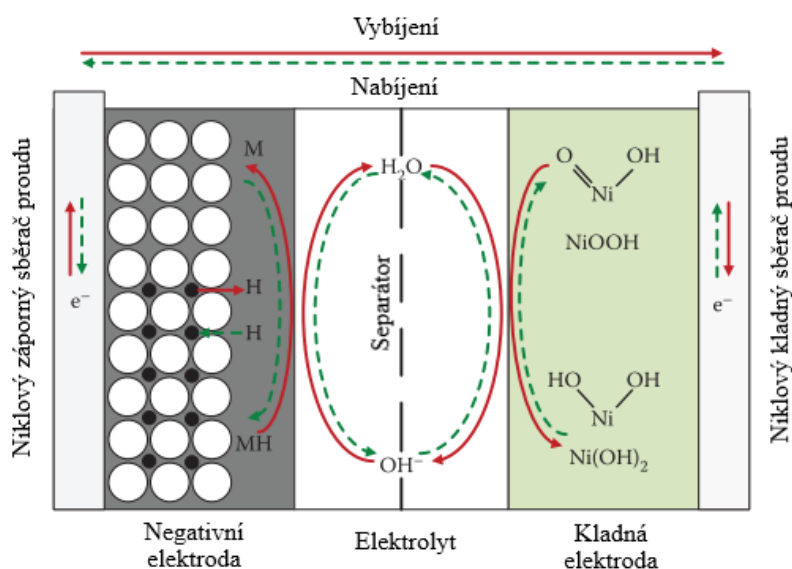
- vysoké nominální napětí (3,7 V)
- minimální samovybití (do 5 %)
- vysoká kapacita vzhledem k malému objemu a hmotnosti
- velmi vysoká hustota energie (100 až 200 Wh/kg)
- životnost 500 až 1200 nabíjecích cyklů

Nevýhody: [16]

- stárnutí baterie (ztráta maximální kapacity)
- nebezpečí výbuchu nebo vznícení
- intolerance vůči úplnému vybití
- nákladná a složitá recyklace
- nešetrnost vůči životnímu prostředí
- problematické fungování za extrémních teplot

NIKEL-METAL HYDRIDOVÝ AKUMULÁTOR (NiMH)

Zápornou elektrodu tvoří kovová slitina většinou složená z kombinace niklu, kobaltu, manganu a vzácného kovu (lanthan, cer, neodym). Kladnou elektrodu pak tvoří práškový nikel. Elektrolyt je hydroxid draselný (KOH). Princip vybíjení a nabíjení baterie ilustruje obrázek 5.



Obr. 5 Princip NiMH akumulátoru [4]

Stejně jako u Li-ion článku i tento typ je galvanickým článkem, tudíž z rozdílu potenciálů získáváme elektromotorické napětí. Proudové kolektory jsou zde vyrobeny z niklu. [4], [17]

Výhody: [17]

- oproti dříve používaným NiCd mají až 2,5krát větší kapacitu
- relativně vysoké proudy
- dlouhá životnost
- malé pořizovací náklady

Nevýhody: [17]

- nízká nominální hodnota napětí pro elektromobily (1,2 V)
- nižší hustota energie (60 až 120 Wh/kg)
- problematickost fungování za extrémních teplot

ZHODNOCENÍ

Hodnoty uváděné u obou typů jsou pro samostatné články baterie. Pro potřebný výkon vozu se jednotlivé články spojují do několika sérií, čímž se zvedne celkové napětí. Tyto série jsou následně uspořádány do skupin paralelně a tyto skupiny poskytují potřebný proud a výkon. Dnes se na trhu elektromobilů používají převážně Li-ion baterie, jelikož mají větší hodnotu nominálního napětí a vyšší hustotu energie. Využívá je například společnost Tesla. Jejich pořizovací náklady jsou ovšem vyšší. Příkladem vozu, v němž jsou instalovány baterie NiMH je Toyota Prius. [4]

Baterie je nejproblémovější komponentou elektromobilu. Mezi již zmíněné problémy patří stárnutí a možnost vznícení, přičemž případný požár je velmi obtížné hasit. Může docházet i k trhlinám v bateriích a následnému prasknutí celé baterie. Obecně problematická je činnost baterií při extrémních teplotách, která je popsána v následujících kapitolách. [4]

1.2.3 PRINCIP REKUPERACE

Rekuperace je děj, který probíhá při regenerativním brzdění. Při standardním brzdění se většina kinetické energie přeměňuje na teplo, ovšem při regenerativním brzdění se kinetická energie přemění na energii elektrickou, která je pak skladována v bateriích. Lze ji pak využít opět pro pohon vozidla. Baterie je tedy možné během brzdění dobíjet. V momentě regenerativního brzdění elektromotor funguje jako generátor a přeměňuje mechanickou energii na energii elektrickou. [4], [5]

U vozů Tesla má řídicí jednotka plnou kontrolu nad krouticím momentem motoru, jak pro akceleraci, tak brzdění. Vše závisí na poloze akceleračního pedálu. Krouticí moment může nabývat kladných i záporných hodnot. V případě, že řidič povolí akcelerační pedál, řídicí jednotka vyše signál pro záporný krouticí moment a vůz zpomalí. Během toho dojde k rekuperaci a baterie se dobíjí. Záporný točivý moment působící na zadní kola však může způsobit nestabilitu vozu. Z tohoto důvodu je vůz vybaven systémem, který trakci a regenerativní brzdění reguluje v případě, že zadní kola vozu začnou prokluzovat. [5]

1.2.4 NABÍJENÍ BATERIE

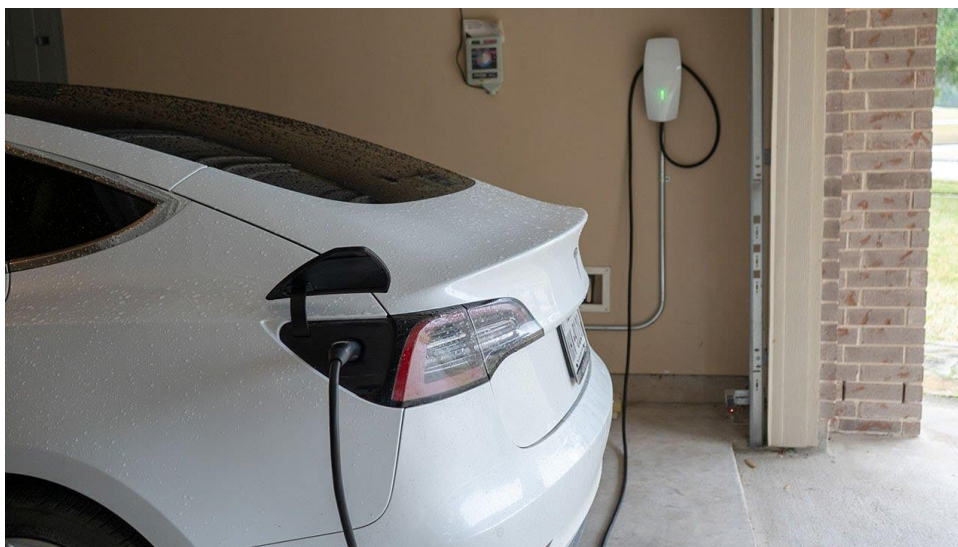
Primární způsob nabíjení baterie je přímo z elektrické sítě, k čemuž slouží speciální nabíječky nebo rychlonabíječky. Způsoby nabíjení lze dělit podle následujících kritérií: [9], [13]

- 1) dle umístění nabíječky
 - a. „on-board“ nabíjení
 - b. „off-board“ nabíjení
- 2) dle způsobu přenosu náboje mezi nabíjecí pistolí a zásuvkou vozu
 - a. vodivé
 - b. indukční
- 3) dle úrovně nabíjení – na 3 úrovně
- 4) dle bezpečnosti – na 4 bezpečnostní módy

DĚLENÍ DLE UMÍSTĚNÍ NABÍJEČKY

Nabíjení „on-board“ umožňuje nabíjet vůz všude tam, kde je zásuvka, protože nabíječka je součástí vozu. Automobil je tedy možné nabíjet i doma v garáži. V klasické zásuvce je střídavé napětí, a tak nabíječka obsahuje AC/DC měnič. Nevýhodou je ovšem dlouhá doba nabíjení. Pro představu je uveden příklad od společnosti Tesla, která nabízí ke koupi tzv. „wall connector“,

což je zařízení, které propojuje zásuvku s elektromobilem. Z obrázku 6 je patrné, že příslušenství se skládá ze skříňky, jež upravuje napětí a proud. Z ní je veden kabel, který je zakončen nabíjecí pistolí. Tímto způsobem nabíjení jsme tak schopni dobít baterii na dojezd až 77 km během jedné hodiny nabíjení. [5], [9], [13]



Obr. 6 „Wall connector“ od společnosti Tesla [14]

Proti tomu tzv. „off-board“ nabíječka (ta je součástí infrastruktury) poskytuje daleko větší výkon a snižuje dobu nabíjení. Hojně využívány jsou již zmíněné rychlonabíječky. Zástupcem tohoto typu je „supercharger“ od společnosti Tesla, která má hojnou síť dobíjecích stanic převážně v USA a dobije baterii vozu za přibližně 45 až 50 minut na maximální kapacitu. [5], [9], [13]

DĚLENÍ DLE ZPŮSOBU PŘENOSU NÁBOJE

Vodivé nabíjení je běžný princip pro „on-board“ nabíjení, kdy přenos elektrické energie je zprostředkován pomocí dotyku dvou kovů. Oproti tomu indukční nabíječka využívá principu elektromagnetické indukce, kdy mezi zásuvkou ve voze a externím přívodem střídavého proudu vzniká indukované napětí a následně indukovaný střídavý proud v zásuvce vozu. Po usměrnění dochází k nabíjení baterie stejnosměrným proudem. Během přenosu elektrické energie nedochází ke kontaktu kovu s kovem jako u vodivého nabíjení. [13]

DĚLENÍ DLE ÚROVNĚ NABÍJENÍ

První úroveň je nabíjení z domácí sítě. Aby bylo možné tímto způsobem nabíjet, musí být vůz schopen nabíjet tzv. „on-board“. Druhá úroveň je pak dobíjení z veřejných sítí. Vůz opět umožňuje „on-board“ nabíjení. V porovnání s první úrovní je však baterie nabíjena vyšším proudem. Třetí úroveň je pak myšleno nabíjení pomocí rychlonabíječky („off-board“). [4], [13]

1.2.5 VÝKONOVÁ ELEKTRONIKA

Do této kapitoly spadají měniče napětí a proudu, jejichž základním materiálem jsou polovodičové součástky, které musí zvládnout příslušné napětí, proud a přepínací frekvenci. Součástky musí být také dostatečně chlazeny. Běžně se v elektromobilech vyskytují tyto typy měničů: [4], [9]

- DC/AC měnič (střídač)
- AC/DC měnič (usměrňovač)
- DC/DC měnič

Mezi základní polovodičové součástky řadíme diody, tranzistory a tyristory. Pro větší napětí se používá IGBT neboli bipolární tranzistor s izolovaným hradlem (300 až 400 V). Tyto tranzistory jsou konstruovány pro velký rozsah spínacích výkonů, a to od 1 kW až do několika MW. Pro osobní vozy je třeba IGBT tranzistor zhruba o spínacím výkonu 200 kW. Pro menší hodnoty napětí pak tzv. MOSFET (M-metal (hliník), O-oxid (oxid křemičitý), S-semiconductor (polovodičová destička), FET-tranzistor řízený elektrickým polem). Tento typ je pak využíván v nízkonapěťových DC/DC měničích a hlavní výhodou je zvládnání vysokých frekvencí, a to až 1 MHz. Výhody obou polovodičových součástek pak kombinuje tzv. „hybrid MOS“. [4], [9]

Střídač je typ měniče, který se nachází mezi baterií a elektromotorem a mění stejnosměrné napětí na střídavé, kterým je napájen asynchronní motor. Využívá pulzně šířkové modulace (PWM), jež upravuje hodnotu napětí pro motor. [9]

Usměrňovač pomocí polovodičových součástek usměrňuje napětí ze střídavého na stejnosměrné. Usměrňovač je u některých typů hybridních vozů mezi generátorem a trakční baterií. Jsou také součástí každé nabíječky, která nabíjí vůz ze střídavé sítě. V některých elektromobilech je funkce střídače a měniče funkcí jednoho zařízení. V případě, že je elektrická energie z baterií motorem odebírána se měnič chová jako střídač a během rekuperace jako usměrňovač. Na obrázku 7 je právě takový typ měniče. [9], [10]

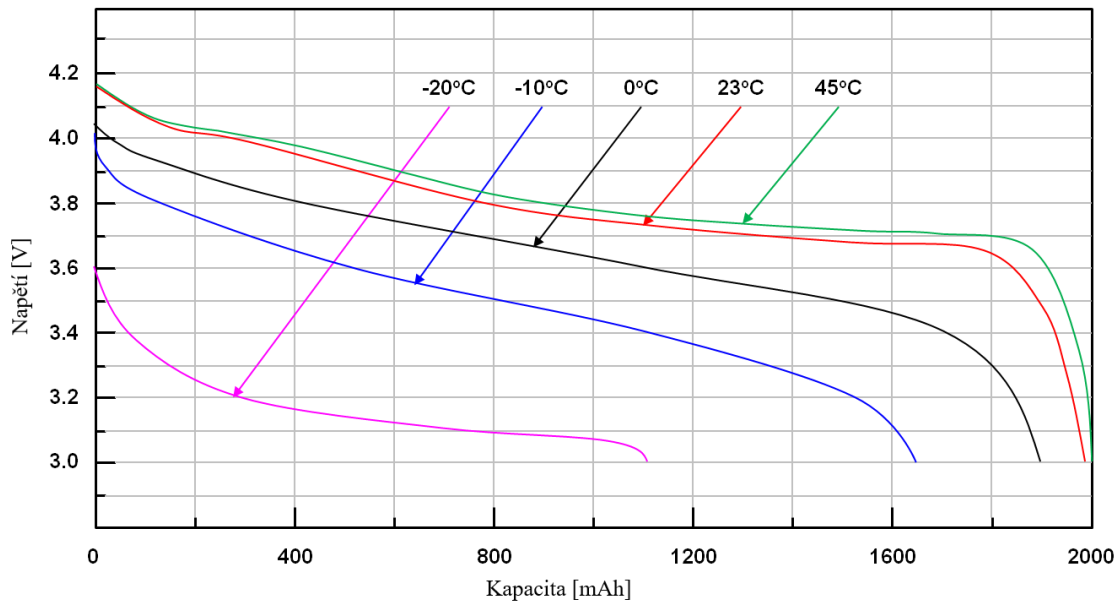


Obr. 7 Měnič s dvojí funkcí [10]

Podstatou DC/DC měniče je změna napětí na vyšší nebo nižší hodnotu. Využívají se měniče dvojího typu. Vysokonapěťový DC/DC měnič se používá mezi vysokonapěťovou trakční baterií a DC/AC měničem elektrického stroje. Tento typ poskytuje zdroj vysokého napětí pro výkonovou elektroniku a elektrické zařízení. Výhodou je pak vysoká účinnost spotřebičů. Nevýhodou jsou ale vysoké ztráty od DC/DC měniče samotného. Nízkonapěťové DC/DC měniče jsou pak mezi nízkonapěťovou baterií a vysokonapěťovou baterií. [9]

1.3 TEPELNÝ MANAGEMENT

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.2.2, baterie jsou velice problematické za nízkých teplot, což je dáno tím, že vlivem nízkých teplot dochází ke zpomalení elektrochemické reakce, a to ovlivňuje kinetiku přenosu náboje. Výsledkem je snižování kapacity a napětí baterie, jak je ukázáno na obrázku 8. Negativním dopadem je snížení dojezdu elektromobilu. [18]



Obr. 8 Vliv okolní teploty na kapacitu a napětí lithium-iontové baterie [40]

















Pokud je automobil připojen do sítě a baterie se dobíjí, tak lze teplo dodávat. Problém nastává, pokud je vůz odpojen od sítě a teplota klesá pod bod mrazu. V takovém případě jsou vozy vybaveny ohřívači baterií. Tyto ohřívače ovšem čerpají energii právě z baterií, čímž se logicky snižuje jejich stav nabití a také nízké teploty ovlivňují přívod energie právě do ohřívacích zařízení. [18] Prevencí je parkovat vůz v zateplené garáži a udržovat jej mimo chlad. Dle údajů ze stránek společnosti Tesla je radno nechat vůz zapojený v síti během stání v garáži. Během nabíjení je dodávána jak elektrická, tak tepelná energie. [5] Dnes již na trhu existují baterie, které mrazu odolávají. Společnost Grepow například nabízí LiFePO_4 baterie, které díky speciálnímu materiálu odolávají teplotám -40 až $+50$ °C. [19]

Teploty ovlivňují také životnost baterie. Ta se s rostoucí teplotou snižuje. Společnost Tesla tuto situaci vyřešila přítomností systému BMS („battery management system“). Jedná se o čip hlídající teplotu baterií, stav nabití a hodnoty napětí. Tento systém kontroluje proces nabíjení a vybíjení akumulátorů a udržuje adekvátní teplotu celé soustavy. Chladicí proces provádí samozřejmě chladicí jednotka (viz. kapitola 1.2.1). BMS také poskytuje funkci tzv. „cell balancing“, tedy funkce, která kontroluje rovnoměrné nabíjení všech jednotlivých článků baterie. Tím se eliminuje situace, za které by se některé baterie nerovnoměrným nabíjením mohly přehřívat. [4], [5], [18]

Tepelný management se týká také kabiny, tedy interiéru vozu. Je třeba uvažovat jak komfort pasažérů, tak dosažení optimálních podmínek pro řízení. Vzhledem k absenci spalovacího motoru nelze využít jeho odpadní teplo. Odběr energie z baterií pro ohřívání interiéru, větrání a klimatizaci výrazně ovlivňuje celkový dojezd vozu. Jedno z řešení je tepelné čerpadlo, jenž umožňuje transport tepla ve vozidle. Využívá se také efektivně odpadního tepla z elektromotoru a elektroniky. V dnešní době se také využívá speciálních materiálů absorbujících teplo, které je pak možné využít pro vyhřívání kabiny. Problematika tepelného managementu je jednou z velmi diskutovaných otázek v oblasti elektromobility. [20]

1.4 EMISE A EKOLOGICKÝ POHLED NA ELEKTROMOBILITU

Volání po redukci emisí automobilů začalo již koncem minulého století (viz. kapitola 1.1) a trvá i dnes. Tlak na automobilky je obrovský, a tak se výrobci aut předhánějí v představování nových typů elektromobilů. Od roku 2020 navíc platí nový evropský emisní limit. Původních 120 g/km CO₂ bylo sníženo na 95 g/km CO₂. Tato hodnota je ovšem udávána pro automobily s provozní hmotností 1380 kg. Emisní limit se tak mění a to tak, že se snižuje o 1 g/km CO₂ za každých 30 kg, o kterých je vůz lehčí. Při zvýšení váhy je tomu přesně naopak. Emisní limity se navíc mají ještě snižovat a pokuty za každý překročený gram jsou vysoké. [21] Pro konkrétní představu: motor 2,0 TDI 135 kW 7°A 4x4 Škoda Octavia vyprodukuje 133 g/km CO₂. Naproti tomu nová Škoda Superb PHEV s motorizací 1,4 TSI 160 kW vyprodukuje v kombinovaném režimu méně než 35 g/km CO₂. [6]

	 KONVENČNÍ	 HYBRID	 PLUG-IN HYBRID	 ELEKTRICKÉ
ZDROJ ENERGIE				
SPOTŘEBA				
EMISE				

Obr. 9 Porovnání z ekologického a energetického hlediska [12]

Porovnání z hlediska energetického a ekologického je vystiženo obrázkem 9. Z něj je patrné, že nejlepším řešením vzhledem k nulovým emisím je auto na čistě elektrický pohon. Je třeba říci, že elektrifikace vozového parku je podmíněna infrastrukturou a původem energie.

2 POHONNÝ TRAKT ELEKTROMOBILU

Pohonný trakt se liší v závislosti na tom, zda hovoříme o hybridnímu nebo čistě elektrickém elektromobilu. Hnací trakt konvenčního automobilu tvoří motor, spojka, převodovka, rozvodovka a hnací hřídele. Tyto komponenty jsou spojeny se spalovacím motorem a jsou přítomny v hybridních vozech a některé i v čistě elektrických. Významnou roli pohonného traktu elektromobilů má elektromotor a jeho uložení. Konfigurace se pak liší v závislosti na tom, zda je vůz využíván k jízdě ve městě, na dálnici nebo pro sportovní účely.

2.1 KONCEPCE POHONNÉHO TRAKTU HEV

Hybridy v porovnání s konvenčními vozy využívají k pohonu jak mechanickou, tak elektrickou energii. Přenos této energie je obousměrný (rekuperace). Uspořádání pohonného traktu HEV je ovlivněno především vzájemnou polohou spalovací jednotky a elektromotoru. Je děleno následovně: [4], [22]

- sériové
- paralelní
- sériově-paralelní
- multi-mód

Jednotlivé základní skupiny se dále dělí, například podle stupně hybridizace.

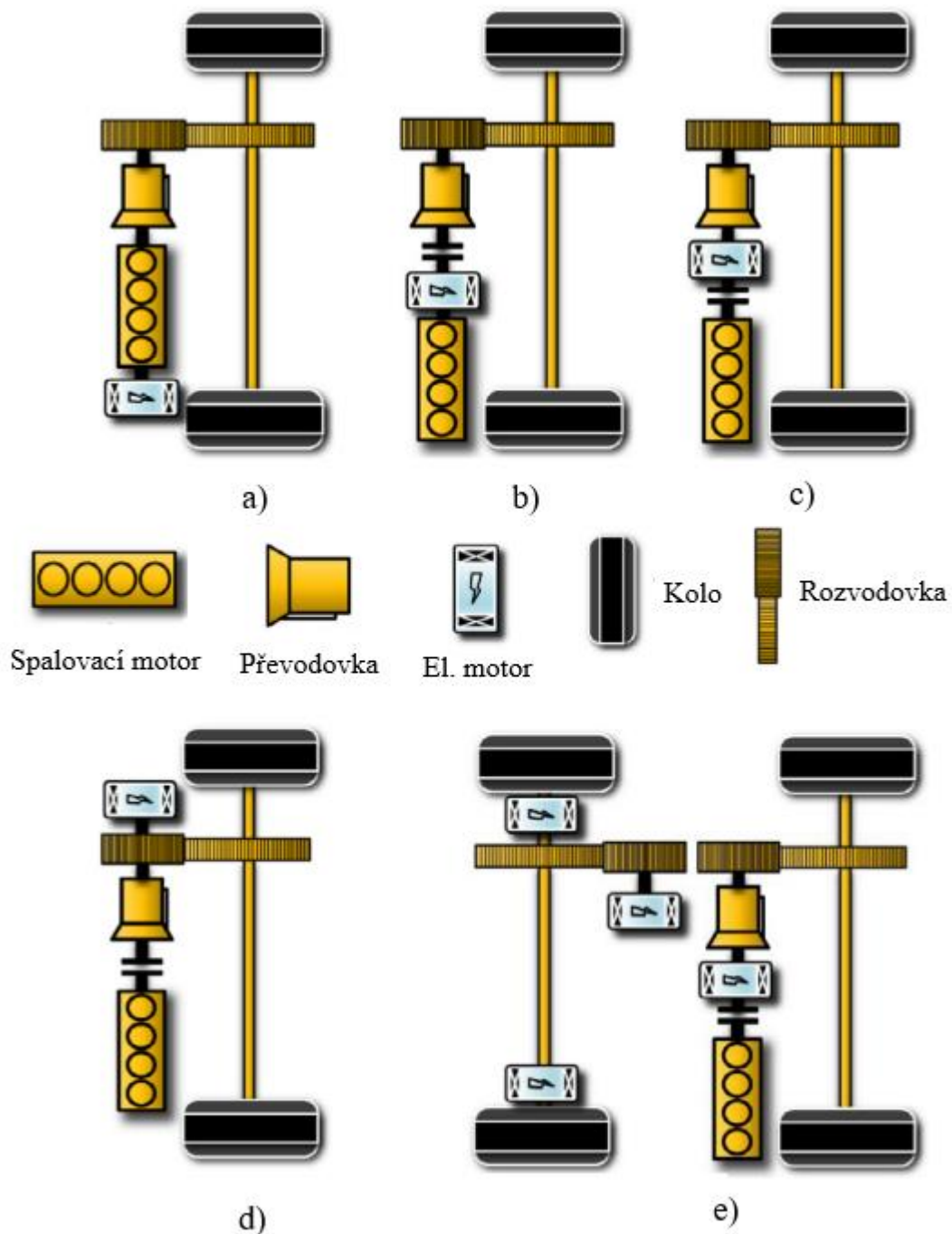
2.1.1 PARALELNÍ HYBRIDY

Spalovací a elektrický motor jsou paralelně napojeny na výstupní hřídel a mohou tak vozidlo pohánět současně. Přítomnost elektromotoru výrazně zvyšuje účinnost pohonného traktu. Elektromotor se chová jako generátor při nízké spotřebě energie a dochází k rekuperaci energie. Při vysoké spotřebě energie naopak plní funkci motoru a v součinnosti se spalovacím motorem pohání vozidlo. Pro pohon spalovacím motorem je nutná klasická vícestupňová převodovka. Kroutící moment elektromotoru je naopak přenášen jednostupňovou (redukční) převodovkou. Jednotlivá uložení schematicky znázorňuje obrázek 10. [4], [22]

U prvního typu (obr. 10a) je elektromotor před spalovacím motorem a jsou spojeny pásem. Tato konfigurace je známá jako pásově řízený startér nebo generátor. Pásem je výrazně omezen točivý moment a elektromotor má tak pouze pomocnou funkci. [22]

Druhý typ (obr. 10b) je konstruován tak, že elektromotor je nainstalován na klikovou hřídel spalovacího motoru a plní funkci integrovaného startéru. Vzhledem k jeho pozici je malý, a tak nedokáže vyvinout velký točivý moment k samostatnému pohonu vozidla. Slouží k regenerativnímu brzdění, jako pomoc spalovacímu motoru při akceleraci a pro funkci start/stop. [22]

Třetí (obr. 10c) a čtvrtá (obr. 10d) koncepce jsou pak nejčastější. Zde je motor situován na výstup nebo vstup převodovky. Motor je mnohem větší než v prvním a druhém případě a je schopen pohánět vozidlo. Je také schopen rekuperovat mnohem více energie a oproti předchozím dvěma typům se podílí na vysoké efektivitě pohonu. Třetí koncepce je využita například ve vozech Volkswagen Passat GTE nebo Hyundai Sonata Hybrid. [22]



Obr. 10 Schéma uložení pohonného traktu paralelních hybridů [22]

Pátý typ (obr. 10e) se využívá u vozů s pohonem všech čtyř kol. Elektromotor je posazen přímo na hnací hřídel nebo u kola. Z obrázku je patrné, že elektromotorů je zde více a tato konfigurace se používá kombinovaně s druhým a třetím typem. [22]

Součástí všech koncepcí je trakční baterie, která dodává energii do elektromotoru a nádrž s palivem pro spalovací jednotku. Elektrická větev pohonu umožňuje pohyb energie z baterie do motoru, ale i opačně.

Výhody: [4], [9], [22]

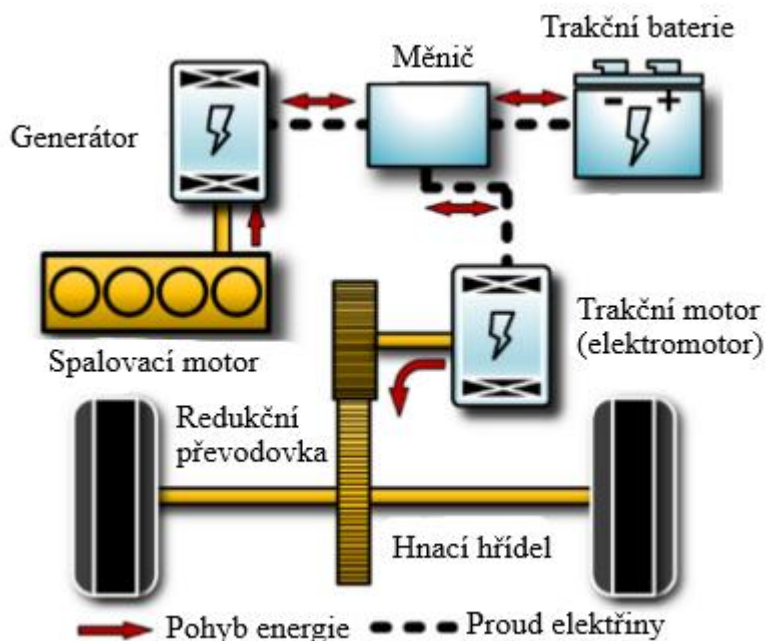
- vhodné pro dlouhé a plynulé cesty
- nižší nároky na trakční motor
- nižší nároky na výkon baterie
- dobrá schopnost akcelerace
- je třeba méně výkonové elektroniky
- cenově výhodnější

Nevýhody: [4], [22]

- špatná distribuce paliva během změn stylů jízdy
- elektromotor musí pracovat v oblasti nízké účinnosti při častém vypínání/startování
- elektromotor není schopen rekuperovat energii a dodávat výkon zároveň

2.1.2 SÉRIOVÉ HYBRIDY

Sériový hybrid obsahuje trakční elektromotor, generátor a spalovací motor. Trakční elektromotor přímo pohání vůz a generátor vytváří elektrickou energii, která je dodávána do baterií a je poháněn právě spalovacím motorem. Energie z baterie je pak zdrojem pro trakční elektromotor. Ten pak může být uložen na přední či zadní nápravě tak, aby zajistil pohon i všech čtyř kol. Jelikož spalovací motor není spojen s hnací hřídelí, může pracovat velmi účinně a nezávisle na rychlosti vozidla. Klasická převodovka, která je nutná u konvenčních vozů nebo paralelního hybridu zde není potřeba a stačí pouze jednostupňová (redukční) převodovka. Tato konfigurace je schematicky znázorněna na obrázku 11. Tento typ se používá u plug-in hybridů. Příkladem je vůz BMW i3. [4], [22]



Obr. 11 Schéma uložení pohonného traktu sériových hybridů [22]

Výhody: [4], [9], [22]

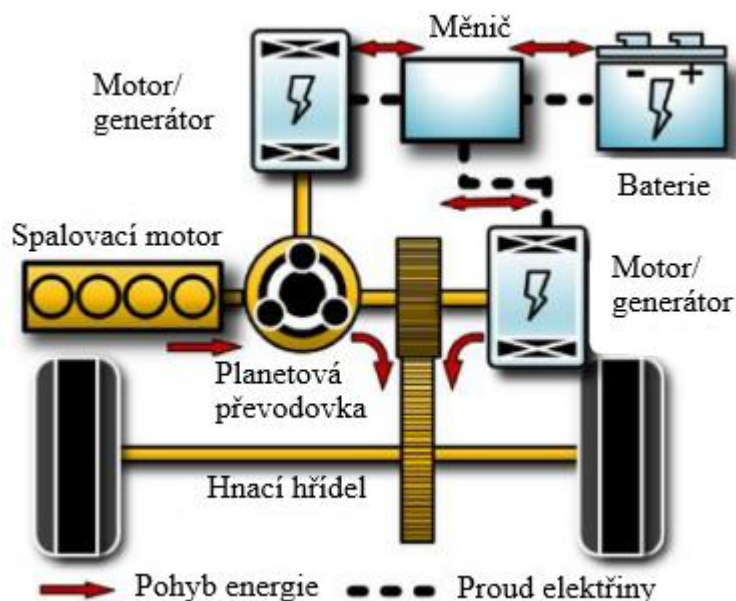
- možnost čistě elektrického pohonu bez emisí
- vhodné pro časté změny stylu jízdy
- silný trakční elektromotor je výkonnější

Nevýhody: [4], [9], [22]

- vysoké nároky na trakční motor
- nižší celková účinnost (vzhledem k složitější soustavě přenosu energie)
- těžší a dražší (elektromotor a generátor)

2.1.3 SÉRIOVĚ-PARALELNÍ HYBRIDY

V tomto případě se pohonný trakt skládá ze dvou elektromotorů, planetové převodovky a spalovacího motoru. Výstupní krouticí moment je u toho typu vytvářen primárně trakčním elektromotorem a sekundárně spalovacím motorem. Jedná se tedy o kombinaci sériového a paralelní hybridu. U paralelního přispívá spalovací motor k výstupnímu krouticímu momentu zcela, zatímco u sériového nepřispívá vůbec. V případě sériově-paralelního hybridu je příspěvek k pohonu vozu rozdělen mezi spalovací motor a elektromotor. Schéma této kombinované konfigurace je na obrázku 12. [4], [22]



Obr. 12 Schéma uložení pohonného traktu sériově-paralelního hybridu [22]

Planetová převodovka, označovaná zkratkou PSD, umožňuje přenos energie z motoru na hnací hřídel buďto elektrickou, nebo mechanickou cestou. V případě elektrické cesty pohonný trakt pracuje jako sériový hybrid. Energie vytvořená spalovacím motorem je pomocí generátoru přeměněna na elektrickou, a ta buďto dobíjí baterii nebo pohání elektromotor. V případě mechanické cesty pak konfigurace umožňuje spalovacímu motoru vytvářet energii přímo pro hnací hřídel a pohon tak pracuje jako paralelní hybrid. Příkladem sériově-paralelního hybridu je Toyota Prius. [4], [22]

Výhody: [4]

- vyvážená distribuce pohonné hmoty i elektrické energie jak pro městský, tak dálniční provoz
- přiměřené nároky na trakční elektromotor a trakční baterie
- vynikající jízdní vlastnosti

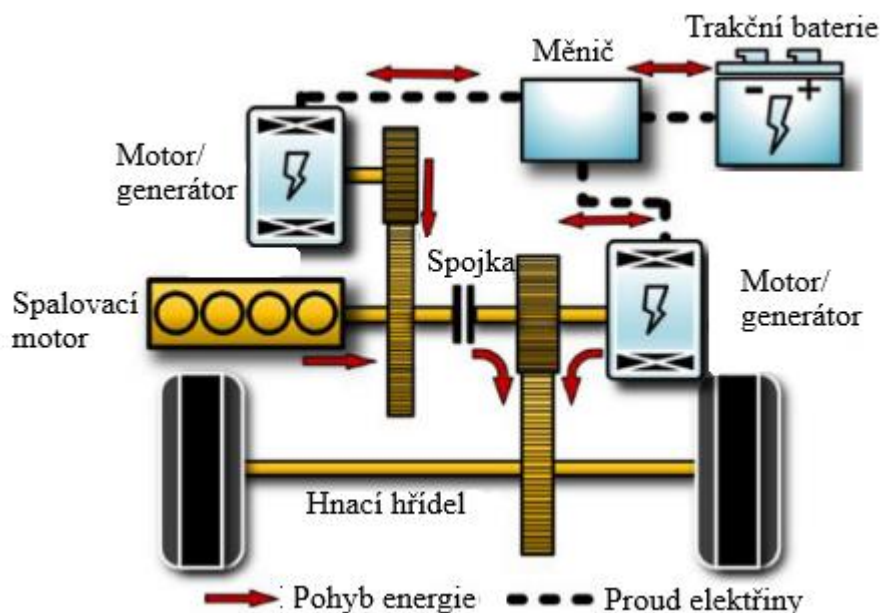
Nevýhody: [4], [22]

- horší distribuce paliva při agresivním stylu jízdy
- během čistě elektrické cesty energie jsou vysoké energetické ztráty

2.1.4 MULTI-MÓD HYBRIDY

Základní myšlenkou multi-mód hybridu je přidání spojky, popř. spojek do sériově-paralelního hybridu. To umožní pracovat převodovému ústrojí v libovolné konfiguraci, tedy sériové, paralelní nebo sériově-paralelní. Možnost volby konfigurace v závislosti na stylu jízdy tak zvyšuje efektivitu pohonného traktu. [22]

První varianta se využívá u plug-in hybridů, kde je možné trakční baterii dobít ze sítě. Přítomny jsou dva elektromotory. Jeden je spojen se spalovacím motorem a druhý přímo s hnací hřídelí. Spojka umožňuje přerušit spojení mezi spalovacím motorem a hnací hřídelí. Konfigurace tak může pracovat ve třech módech. Čistě elektrickém, sériovém nebo paralelním. Vůz pracuje v čistě elektrickém módu pouze tehdy, pokud je baterie dostatečně nabitá. Při velmi nízkých nebo naopak vysokých rychlostech pracuje v paralelním nebo sériovém. Představu o této variantě si lze udělat z obrázku 13. [22]



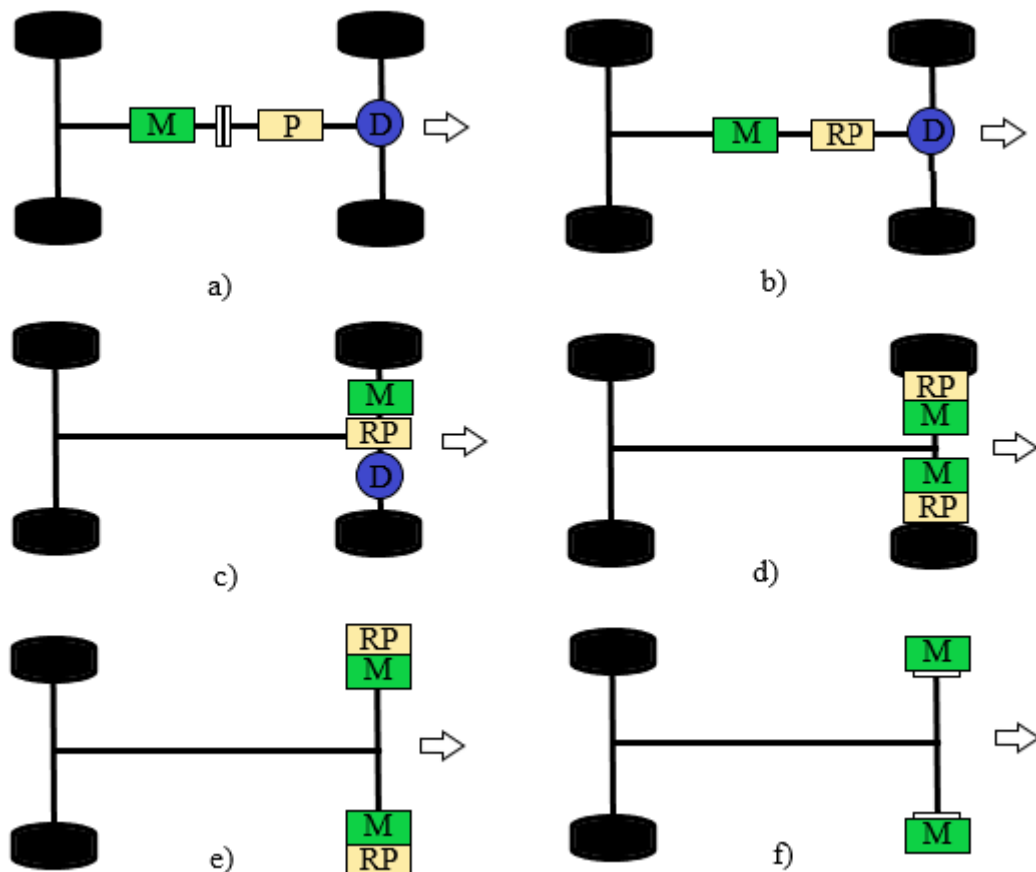
Obr. 13 Schéma uložení pohonného traktu sériově-paralelního multi-mód hybridu [22]

Druhá varianta vznikla přidáním spojek mezi uzly planetové převodovky v sériově-paralelní konfiguraci, jež je na obrázku 11. Příkladem tohoto provedení je pokročilý hybridní systém („Advanced Hybrid System“) patentovaný společností General Motors v roce 2002. V roce 2011 společnost General Motors představila další multi-mód známý jako Voltec, který má

jednu planetovou převodovku a tři spojky a byl brzy změněn na sestavu se dvěma planetovými převodovkami, jež poskytuje pět různých pracovních konfigurací. Nevýhodou mnoha konfigurací je pak velmi složitá konstrukce, hlučnost a vibrace, zvýšená spotřeba energie a celkový diskomfort. [22]

2.2 KONCEPCE POHONNÉHO TRAKTU BEV

Základním rozdílem proti hybridům je absence spalovacího motoru, čímž se počet komponent pohonného traktu redukuje pouze na komponenty nutné k čistě elektrickému pohonu. Pohonný trakt se tedy skládá z elektromotoru, spojky, převodovky nebo redukční (jednostupňové) převodovky. Koncept pohonného traktu se primárně odvíjí od požadavků na výkonové charakteristiky jako jsou maximální rychlost a zrychlení na jedné straně a váha, rozměry vozu a třecí koeficienty na straně druhé. Dalším kritériem je požadovaný dojezd vozu. Všechny tyto vstupní parametry se podílejí na výsledné konfiguraci pohonného traktu BEV. Obrázek 14 shrnuje jednotlivé konfigurace. [24]



Obr. 14 Schéma uložení pohonného traktu BEV [24]
M-elektromotor, P-převodovka, D-diferenciál, RP-redukční převodovka

Dále je nutné zahrnout do úvah proměnné prvky (jejich počet, umístění a typ): [24]

- počet nainstalovaných elektromotorů (maximálně 4)
- typ elektromotoru (centrální motor, motor poblíž kola, motor na náboji kola)
- pozice elektromotoru (podélná, boční)
- poloha elektromotoru (na nápravě, mimo nápravu, uprostřed vozidla)

Podle těchto kritérií můžeme pohonný trakt BEV dělit na šest konfigurací. První (obr. 14a) je konvenční typ. Toto uspořádání je velice podobné konvenčnímu uspořádání pro vozy se spalovacím motorem. Spalovací motor byl nahrazen elektromotorem, který je napájen z trakční baterie. Dále je zde spojka, převodovka a diferenciál. Druhá konfigurace (obr. 14b) již nemá spojku, ale pouze elektromotor, redukční (jednostupňovou) převodovku a diferenciál. V tomto případě elektromotor pracuje v širokém rozsahu otáček, mechanická složitost převodovky se redukovala a celý pohonný trakt je daleko menší než v prvním případě. Motor s převodovkou je dále možné usadit na nápravu (obr. 14c). To dále zjednoduší a zmenší pohonný trakt. Uložení (a), (b), (c), jsou nejběžnější, jelikož umožňují využití podobných mechanických principů jako je tomu u konvenčních automobilů. [4], [24]

U čtvrtého typu (obr. 14d) dva elektromotory přímo pohánějí vozidlo a zkracují přenos energie z motoru do kol a také nahrazují funkci diferenciálu. To je možné ještě zjednodušit integrací redukční převodovky přímo do kol (obr. 14e). [24]

Poslední možností je pak úplná absence mechanického převodu (obr. 14f). Zde je použit tzv. „in-wheel“ motor. Pohon je u tohoto typu nasazen přímo na náboj kola. Klasické mechanické komponenty jako hnací hřídel, náprava, převodovka a diferenciál jsou nahrazeny tzv. „drive-by-wire“ systémem. Jedná se o řízení vozidla čistě pomocí elektronických řídicích signálů. Na náboji je také instalován systém brzd a elektronika potřebná k samotnému pohonu elektromotoru. Jednotlivé prvky této speciální konfigurace jsou na obrázku 15. [4], [24], [25]

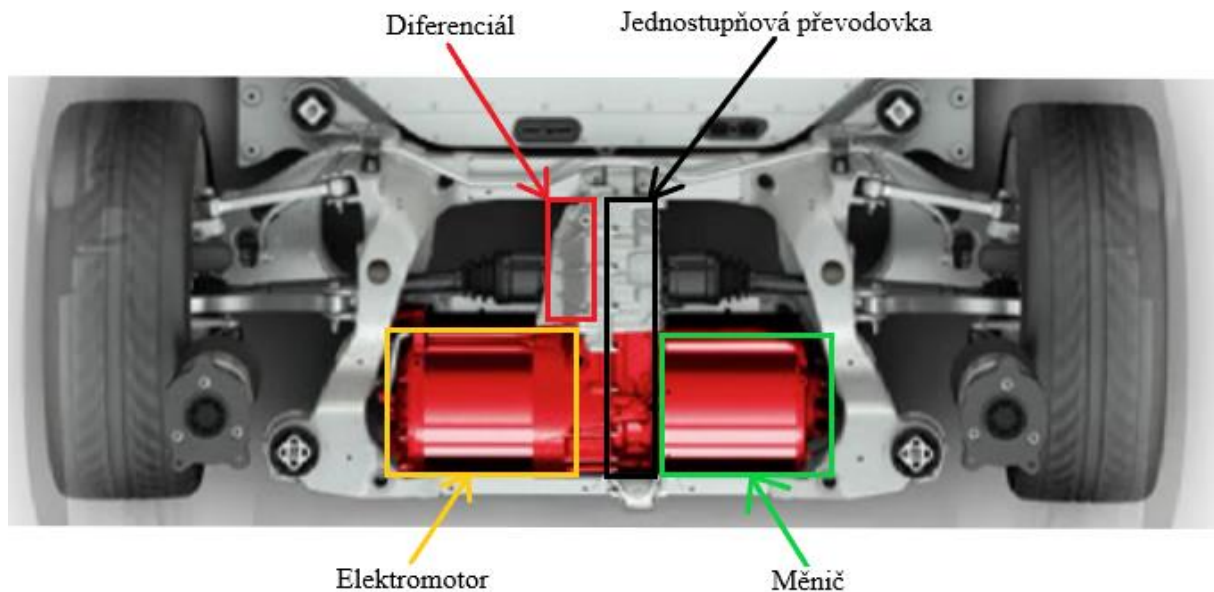


Obr. 15 Rozložený „in-wheel“ motor [25]

Výhodou tohoto typu je lepší distribuce elektrické energie, snížení hmotnosti vozidla a více prostoru pro pasažéry. Navíc tato technologie umožňuje regulovat krouticí moment během několika milisekund, čímž je lépe kontrolována trakce a stabilita vozidla. Také se zkracuje brzdná dráha, zlepšují se jízdní vlastnosti i bezpečnost. Nevýhodou je, že motor musí pracovat v širším rozsahu a musí být schopen se sám nastartovat a akcelarovat. Přidaná hmotnost

v kolech také vyžaduje optimalizaci systému odpružení. Další nevýhodou je, že celý hnací trakt vyžaduje velice složitý řídicí systém. [4], [24], [25]

Společnost Tesla využívá ve svých modelech konfiguraci podobnou typu (c). Pohon je uložen na zadní nápravě a standardně je využit jeden elektromotor. V nabídce je také konfigurace s dvěma elektromotory, na přední a zadní nápravě, a tedy pohonu všech čtyř kol. Na obrázku 16 je zadní náprava Modelu S. Pohonný trakt je složen z diferenciálu, jednostupňové redukční převodovky a elektromotoru. Vedle elektromotoru je také uložen měnič napětí a proudu. [5]



Obr. 16 Schéma pohonného traktu vozu Model S [5]

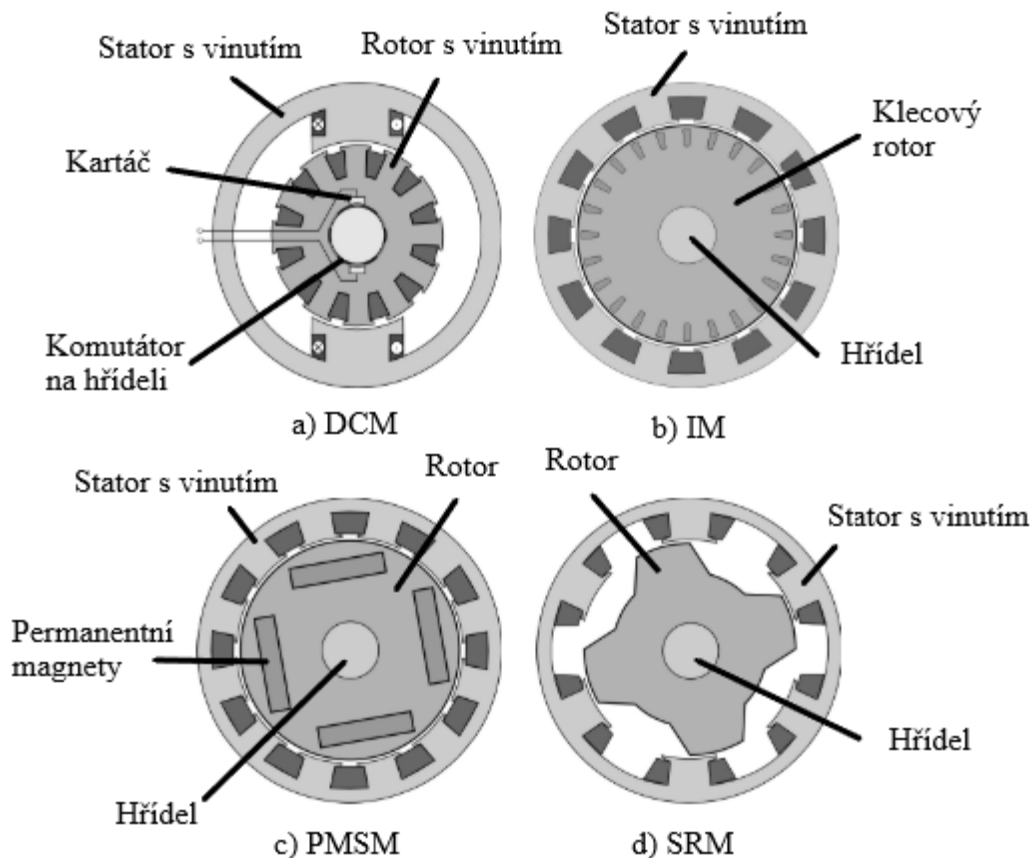
2.3 ELEKTROMOTORY

Elektromotory přeměňují elektrickou energii na mechanickou. Využívají princip elektromagnetické indukce a silového působení točivého elektromagnetického pole. Elektromotor také může pracovat jako alternátor (tedy přeměňovat mechanickou energii na elektrickou) a rekuperovat energii (viz. kapitola 1.2.3). Výhodou elektromotoru je dosažení maximálního kroutícího momentu téměř od nulových otáček, což umožňuje velmi rychlou akceleraci vozu. Směrem k vyšším otáčkám pak kroutící moment klesá. [6]

Pro aplikaci v elektrických vozech se používají zejména tyto elektromotory: [23]

- stejnosměrný motor (DCM)
- indukční (asynchronní) motor (IM)
- synchronní motor s permanentními magnety (PMSM)
- reluktanční motor (SRM)

Jednotlivé typy se využívají pro různé koncepce na základě rozdílných vlastností. Pro následné porovnání jsou použity standardní podmínky, a to nominální napětí o velikosti 400 V, nominální výkon 30 kW a nominální otáčky 3000 min⁻¹. Řez jednotlivými typy je pak na obrázku 17. [23]



Obr. 17 Základní skladba užívaných elektromotorů [23]

Stejnoseměrný motor (obr. 17a) umožňuje jednoduchou regulaci otáček, protože je možné jej napájet přímo z baterie bez nutnosti měniče. Na druhou stranu při větších výkonech je třeba přidat kompenzační vinutí a komutátor, čímž se však zvyšuje velikost a cena elektromotoru. U tohoto typu také nelze regulovat otáčky pomocí změny magnetického pole. Přidáním komutátoru s kartáči se také snižuje spolehlivost a rostou nároky na údržbu. Většina energie se ztrácí v rotoru a přidáváním vinutí se zde kumuluje více tepla, které je třeba odvádět. Obecně stejnosměrné motory dosahují průměrné výkonové hustoty, mají nízkou účinnost a spolehlivost, ale jsou levné a snadno kontrolovatelné především pro malé výkony. Tento typ se používá například ve voze Chevrolet Bolt EV nebo Nissan Leaf. [23]

Indukční motor (obr. 17b) je napájen střídavým proudem. Využívá se rotor s kotvou nakrátko, tedy klecový. Oproti stejnosměrnému motoru dosahuje vyšších výkonů a má vysokou účinnost při vysokých rychlostech. Největší ztráty jsou ve vinutí. Při napájení z baterií je nutný měnič. Tento typ je jednoduchý s nízkými náklady na údržbu. Nevýhodou je vznik tepla v rotoru vlivem ztrát, které je opět třeba odvádět. Nutností je také co nejmenší vzduchová mezera mezi rotorem a státorem. Tento typ je použit například ve voze Tesla Model S. [23]

Synchronní motor (obr. 17c) obsahuje permanentní magnet ze vzácných zemin. Výhodou je vysoká hustota energie magnetu a vzhledem k jeho přítomnosti není třeba budícího proudu. Výsledkem je vysoká účinnost motoru. Ztráty vznikají primárně ve statoru a je tedy snadné odvádět vzniklé teplo. Velkou nevýhodou je vysoká cena materiálů, ze kterých je permanentní magnet vyroben. Tento typ také vyžaduje kontrolu přetížení, aby nedošlo k přehřátí magnetu, protože s vyšší teplotou ztrácí magnetické vlastnosti. Přesto je synchronní motor pro elektromobily nejvýhodnější. Využívá se například ve voze Toyota Prius. [23]

Posledním používaným typem je reluktanční motor (obr. 17d), jehož využití přišlo až s vývojem výkonové elektroniky. Jeho účinnost a výkon jsou srovnatelné s indukčním motorem. Jeho konstrukce je však jednodušší, protože není třeba vinutí na rotoru a má také lepší termální vlastnosti. Výhodou jsou i nízké pořizovací i údržbové náklady. Aby však dosáhl vysokého výkonu, je nutné zvětšit vzduchovou mezeru, čímž se zvyšuje hladina hluku. Nevýhodou je zvlnění momentu při nízkých rychlostech a náročnost řízení proti indukčnímu motoru. Používá se pouze v některých prototypch HEV. [23]

Jako shrnutí lze uvést, že PMSM má nejvyšší účinnost při nízkých rychlostech. Naopak IM a SRM motory jsou neúčinnější při vysokých rychlostech. PMSM je také neúčinnější při definovaném rozsahu rychlostí, a proto je vhodný pro hybridní vozy s úsporou paliva. IM má průměrnou účinnost přes celou škálu rychlostí, ale nedosahuje nikdy takové účinnosti jako PMSM. Vybrané charakteristiky jednotlivých motorů shrnuje tabulka 1. [23]

Tab. 1 Charakteristiky elektromotorů [23]

Charakteristika motoru	DCM	IM	PMSM	SRM
Počet párů pólů [-]	5	2	4	12/8
Hodnocená účinnost [%]	84	88	92	88
Rozměr rotoru [mm]	239.5	162	150	159
Aktivní délka [mm]	70	127	170	159
Vnější průměr [mm]	430	258	210	269
Délka koncového vinutí [mm]	62	105	35	207
Objem [dm ³]	19.2	12.1	7.1	11.8
Výkonová hustota [kW/dm ³]	1.6	2.5	4.2	2.6

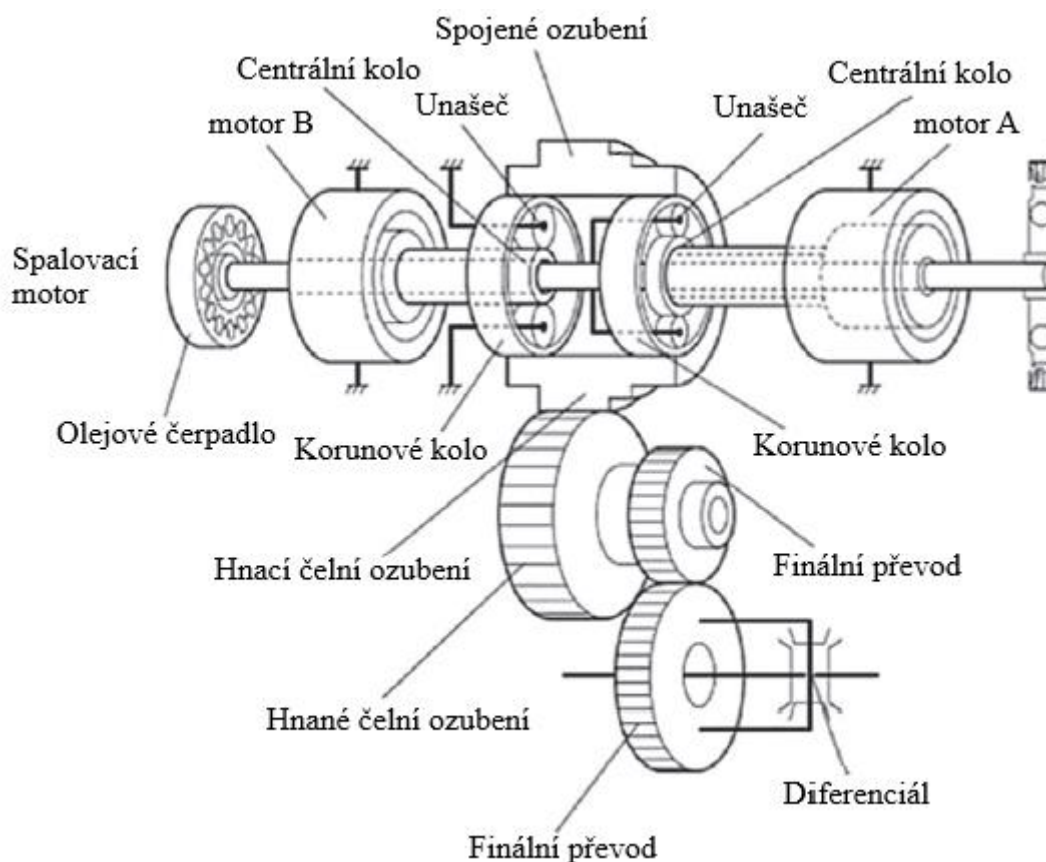
2.4 PŘEVODOVÉ ÚSTROJÍ

Vzhledem k množství jednotlivých konfigurací převodového ústrojí práce přibližuje z každé kategorie jednoho zástupce. Za hybridní elektromobily je přiblížen planetový převod vozu Toyota Prius 2010. Zástupcem čistě elektrických vozů je převodovka společnosti Tesla. Posledním uvedeným příkladem jsou vícestupňové převodovky, jež jsou v poslední době velkým trendem v této oblasti. Konkrétní dvoustupňová převodovka je blíže popsána v další části práce.

2.4.1 PŘEVODOVÉ ÚSTROJÍ VOZU TOYOTA PRIUS 2010

V anglické literatuře se tato koncepce označuje jako „Toyota Prius Transaxle“. Jedná se sériově-paralelní hybrid. Koncepce se skládá z generátoru (motor A), jenž má také funkci startéru, spalovacího motoru a trakčního motoru (motor B). Planetové převodovky jsou zde dvě. První slouží k rozdělení výkonu a je označována zkratkou PSD, tedy „power-split device“. Druhá slouží k redukci rychlosti motoru. Korunová kola obou planetových převodů jsou

spojena do jednoho dílu. Součástí je také olejové čerpadlo, které zajišťuje mazání. Tuto konfiguraci lze vidět na obrázku 18. [4]



Obr. 18 Převodové ústrojí Toyoty Prius 2010 [4]

Rotor motoru A pohání centrální kolo, a to je spojeno přes satelity s unáščem. Na tento unášec je pak napojen spalovací motor přes setrvačnik. Unášec je tedy poháněn spalovacím motorem. Ten je také pomocí satelitních kol spojen s vnějším korunovým kolem. Tato první planetová převodovka slouží k rozdělení výkonu (PSD) a udává tedy, jakým kroučícím momentem přispívá spalovací motor k celkovému výstupnímu kroučícímu momentu. V případě pouze elektrického pohonu nepřispívá spalovací motor vůbec, ale pohání motor A, který generuje elektrickou energii k dobíjení baterií. [4], [26]

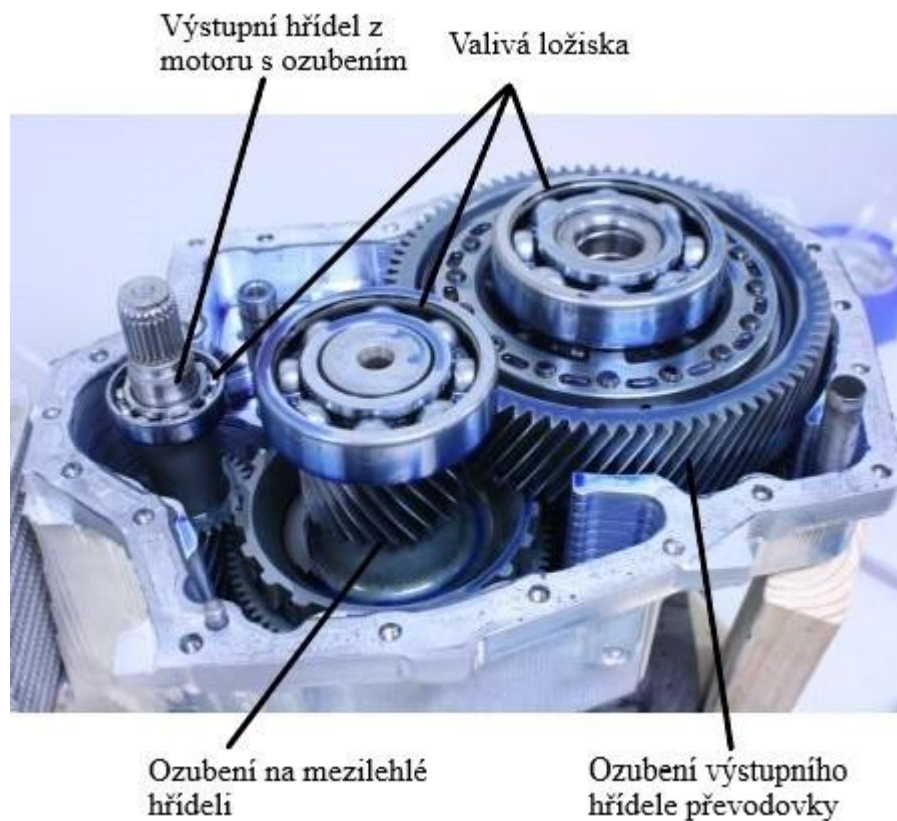
Nutným prvkem je motor B, jenž je primárním pohonem v této konfiguraci. Vůz není možné pohánět pouze spalovacím motorem. Rotor tohoto motoru je opět spojen s centrálním kolem nyní druhé planetové převodovky. Unášec je v tomto případě ale stacionární a pomocí satelitních kol spojen s korunovým kolem. Převodový poměr mezi motorem B a korunovým kolem je $2,636 : 1$. Motor B nabízí maximální kroučící moment $207 \text{ N}\cdot\text{m}$. Teoreticky výsledný maximální kroučící moment od tohoto pohonu je $545,7 \text{ N}\cdot\text{m}$. Reálný moment, vzhledem ke ztrátám, bude o něco málo nižší. Po obvodu spojeného ozubení je hnací čelní ozubení, které je dále spojeno s hnaným čelním ozubením, a to pak s finálním převodem na diferenciál. [4], [26]

Druhá planetová převodovka byla označena za převodovku redukcující rychlost motoru. Ovšem k redukcii rychlosti dochází na motoru A. V případě, že je aktivní pouze čistě elektrický pohon a spalovací motor je vypnut, je poměr otáček mezi motorem A a motorem B roven $1,014 : 1$.

Motory se tak točí téměř stejnou rychlostí. Ke snížení rychlosti motoru tedy dochází, jelikož v předchozích generacích byl tento poměr roven zhruba 2,6 : 1. Nižší poměr tak umožňuje větší rychlost vozu, aniž by bylo třeba se přiblížit k maximálním otáčkám motoru A. [4], [26]

2.4.2 PŘEVODOVÉ ÚSTROJÍ VOZU TESLA MODEL S

Společnost ve svém voze využívá jednostupňové převodovky, jejímž účelem je pouze snížit rychlost otáček motoru a zvýšit kroutící moment, který lze z motoru získat. Není zapotřebí žádné spojky a olejové čerpadlo je zde poháněno přímo převodovkou. Na obrázku 19 je možné vidět toto jednoduché provedení, které se skládá z ozubení na výstupní hřídeli z motoru, ozubení na mezilehlé hřídeli a ozubení na výstupní hřídeli z převodovky. Finální ozubení je pak spojeno s otevřeným diferencíálem, který rozvádí kroutící moment na dvě výstupní hnané hřídele. [5]



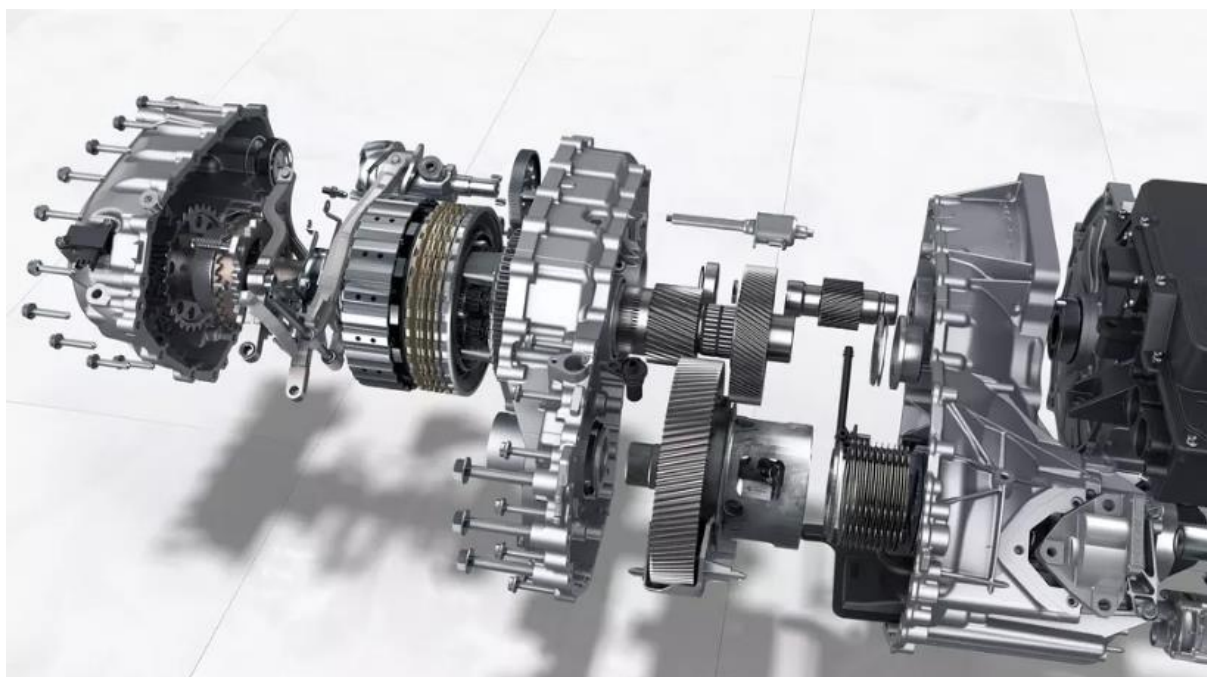
Obr. 19 Jednostupňový převod vozu Model S [5]

Vozy typu Model S se vyrábějí v různých variantách. Menší motory mají převodový poměr roven 9,325 : 1. Pro větší variantu motoru se používá převodový poměr 9,734 : 1. Standardní vůz s pohonem pouze zadní nápravy obsahuje elektromotor o maximálním výkonu 193 kW, jenž vyvine maximální kroutící moment 335 N·m. Je ovšem možné pořídit i tzv. „performance“ sadu, která obsahuje motor na zadní nápravě o maximálním výkonu 375 kW. Maximální kroutící moment je pak 720 N·m. [5]

2.4.3 VÍCESTUPŇOVÁ PŘEVODOVKA

Trendem v oblasti převodových ústrojí elektromobilů je pak vícestupňová převodovka. Jak již bylo zmíněno, elektromotory poskytují maximální kroutící moment již od téměř nulových otáček, ale při velmi vysokých otáčkách klesá. Jejich účinnost také není konstantní přes celou škálu rychlostí. Interval rychlostí, při kterých jsou nejučinnější, se může měnit. Problém tedy

nastává v případě, když se řidič s automobilem stavěným do městského provozu vydá na dálnici nebo naopak. Přidáním dalšího převodového stupně je tak možné zvýšit účinnost pohonného traktu a využívat správný převod v závislosti na stylu jízdy. Vícestupňová převodovka tak nabízí kompromis mezi otáčkami motoru a kroutícím momentem. Je také možné dosáhnout vyšších maximálních rychlostí vozu, aniž by bylo třeba dosáhnout výrazně vysokých otáček elektromotoru. Vzhledem k nižším otáčkám elektromotoru se snižuje spotřeba energie, a zvyšuje dojezd elektromobilu. Konstrukcí vícestupňových převodovek se zabývá například společnost Tesla nebo také společnost Porsche, která používá dvoustupňovou automatickou převodovku v modelu Taycan. Základní představu o konstrukci této převodovky si lze udělat z obrázku 20. [27]



Obr. 20 Dvoustupňová převodovka vozu Porsche Taycan [35]

Firma BMT Drive Solutions je dalším ze zástupců zabývajících se vývojem vícestupňových převodovek pro elektromobily. Dvoustupňová automatická převodovka této společnosti je určena pro osobní automobily. Výhodou je, mimo výše uvedených faktů, úspora financí, jelikož konstrukce převodovky umožňuje použití menšího elektromotoru, měniče a chladicího systému. Společnost také vyvinula čtyřstupňovou automatickou převodovku určenou pro nákladní elektromobily. [34]

3 MĚŘENÍ HLUKU A VIBRACÍ OD PŘEVODOVÝCH ÚSTROJÍ

3.1 PŘÍČINY HLUKU A VIBRACÍ U PŘEVODOVEK

Jednou z měřených charakteristik automobilů (elektromobily nevyjímaje) jsou také parametry noise, vibration and harshness (NVH), kde noise a vibration jsou akustická a vibrační stránka a výraz harshness pak označuje subjektivní vnímání hluku uživatelem. [28] U hybridních elektromobilů zůstává výrazným zdrojem hluku spalovací motor v případě, že vůz pracuje ve spalovacím nebo kombinovaném režimu. U čistě bateriových vozů a hybridů v elektrickém módu jsou vibrace a hluk od elektromotoru výraznější až při vyšších otáčkách. Vzhledem k tomu, že u BEV zcela chybí zdroj hluku od spalovacího motoru, do popředí se dostává zdroj vibrací a hluku od převodovky, ale také od kontaktu pneumatiky s vozovkou, výkonové elektroniky či systému vytápění, ventilace, resp. klimatizace. [29]

Princip vzniku vibrací a hluku u převodovky je stejný u spalovacích vozů i elektromobilů. Při záběru jednotlivých zubů převodu vznikají dynamické síly. Vlivem těchto sil dochází k vibracím jednotlivých komponent převodovky. Vibrace jsou poté přenesené na vnější povrch skříně, ze které se chvění vyzařuje ve formě hluku. Vznikající budící síly se periodicky opakují. Nežádoucí rázy pak lze zmírnit například zmenšením vůlí v mechanismu, zvětšením poddajnosti zubů nebo použitím vhodného maziva, a tím snížit hladinu akustického tlaku až o 4-6 dB. Naopak hluk od převodovky roste s větším zatížením a vyššími otáčkami. Vliv na výsledný hluk má také tvar převodové skříně. [30]

Dalším zdrojem hluku je nedokonalost valivých ložisek, a to zejména při vysokých otáčkách. Jejich geometrická nepřesnost, zapříčiněná výrobou, způsobuje vznik mechanických rázů mezi jednotlivými elementy ložisek. Vzniklé vibrace se vyzařují formou akustické energie přímo nebo skrze přilehlé komponenty do okolí. Hluk ložisek také způsobuje tzv. prokluz, který vzniká nedokonalým odvalováním. Dále je pak hluk převodového ústrojí způsoben řinčením volných kol a dalších částí převodovky. [29], [30]

3.2 MĚŘICÍ APARATURA

Soustava prvků potřebných pro měření se nazývá měřicí řetězec. Základním prvkem je snímač se zesilovačem. Snímač primárně udává kvalitu získaného souboru naměřených dat. Následující prvky řetězce pak pouze korigují nasnímaná data, mezi ně patří filtry, analyzátory, obvody upravující dynamické vlastnosti a usměrňovače. Těchto prvků by v ideálním případě nebylo třeba. Snímače jsou schopné měnit své vlastnosti v závislosti na změně vnějších podmínek pomocí kalibrátorů. Žádoucí je pak provádět kalibraci před zahájením měření a pro dosažení lepších výsledků i po a během měření. Důležitá je také volba vhodného záznamového zařízení. Výsledkem měření je grafické vyjádření hlukového pole pomocí izofón. [31]

Dva základní typy snímačů, které zde budou popsány, jsou akcelerometry a mikrofony, přičemž existuje řada dalších snímačů, ty se ale v praxi běžně nevyužívají. Mikrofon je snímač pro akustický tlak zvuku, který převádí zachycené kmity okolního prostředí na elektrický signál. Ze všech typů mikrofonů se pro kvalitní výsledky používá především elektrostatický (kondenzátorový) mikrofon, jehož výhodou je prakticky lineární frekvenční charakteristika v širokém rozsahu frekvencí a dobrá teplotní a časová stabilita. [28], [31]

Akcelerometry snímají vibrace a jsou na ně během měření kladeny zvláštní požadavky. Velký důraz je kladen na upevnění snímače a obecně se vyžaduje velký dynamický rozsah, široký kmitočtový rozsah, minimalizace účinků rušivých vlivů a minimální zkreslení výstupního

signálu a stabilita v čase. Nejvyužívanějším typem je piezoelektrický akcelerometr, jehož zástupce od firmy DJB Instruments je na obrázku 21. [31]



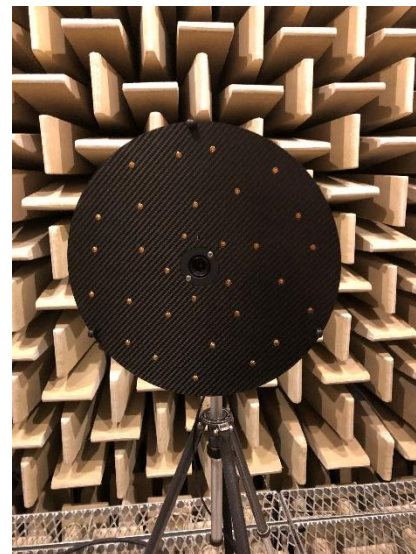
Obr. 21 Akcelerometr A/52/F od společnosti DJB Instruments [33]

V závislosti na snímané charakteristice se následně používají příslušná měřicí zařízení. Pro jednoduchý sinusový signál by stačil jednoduchý měřicí řetězec složený z mikrofonu, zesilovače a měřidla, ovšem pro složitější měření se přidávají do měřicího řetězce další obvody, měniče a náležité vstupy a výstupy externích filtrů. Takto vylepšený měřicí řetězec je pak nazýván zvukoměrem a je schopen efektivně měřit zvuk. Druhým důležitým zařízením jsou vibrometry, které měří vibrace. Klasické vibrometry vyžadují kontakt snímače s vibrujícím povrchem, což může negativně ovlivnit měření. Tuto nevýhodu pak odstraňují moderní laserové vibrometry. V praxi se také využívá analyzátorů, které mají tu výhodu, že v porovnání s vibrometry a zvukoměry umožňují i frekvenční analýzu.[28], [31]

Pro měření akustické intenzity a lokalizaci zdroje hluku se využívá akustická (intenzitní) sonda. V závislosti na velikosti objektu je možné sestavit síť měřených bodů, přičemž rozteč bodů se volí právě v závislosti na velikosti měřeného objektu. V každém bodě se pak měří akustická intenzita. Akustickou rychlost, a tím i intenzitu, lze určit z rozdílu akustických tlaků mezi dvěma mikrofony. Na výsledném intenzitním obrazu, který je v rovině definované měřicí sítí, pak lze určit zdroj hluku. Takovou intenzitní sondu od společnosti Brüel & Kjær, kterou by bylo možné využít pro naši aplikaci, lze vidět na obrázku 22. Chceme-li blíže určit zdroj hluku, je možné využít také akustickou kameru, jež využívá mikrofonního pole. Toto zařízení zobrazuje barevnou mapu, na které lze vidět jednotlivé zdroje hluku. Provedení akustické kamery, kterou by bylo též možné využít pro navrhovaný experiment, je na obrázku 23. [31]



Obr. 22 Intenzitní sonda Brüel & Kjær



Obr. 23 Akustická kamera

3.3 TESTOVACÍ ZAŘÍZENÍ PŘEVODOVEK

Zkoušení převodovek a jejich částí probíhá v provozních nebo laboratorních podmínkách. Zjišťují se především parametry jako je účinnost, provozuschopnost v různých teplotních režimech nebo celková tuhost. Velmi často měřeným parametrem jsou také vibrace a hluk, což se provádí v laboratořích. V provozních podmínkách se pak ověřuje funkce celého převodového ústrojí a vzájemná interakce mezi jednotlivými částmi. Metodika měření se pak volí v závislosti na cílech zkoušky. [32]

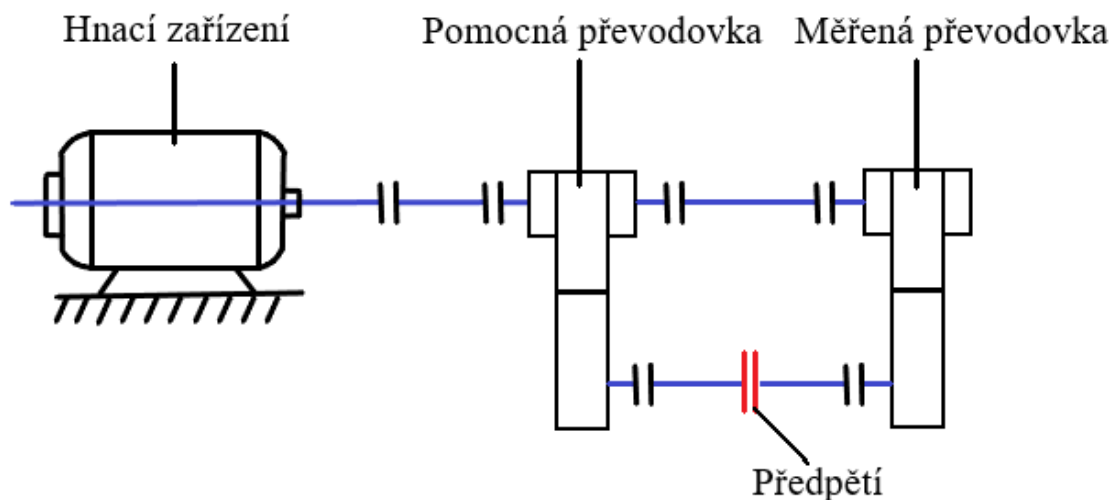
Testovací zařízení se dle způsobu zatěžování dělí následovně: [32]

- s přímým zatížením (otevřený silový kruh)
- s předpětím (uzavřený silový kruh)
- s dynamickým zatížením (elektrohydraulické pulzátory)
- se zatížením od setrvačných sil (setrvačnickové stavy)

Pro dále navrhovaný experiment s cílem měřit vibrace a hluk byl uvažován otevřený silový kruh a uzavřený silový kruh.

3.3.1 UZAVŘENÝ SILOVÝ KRUH

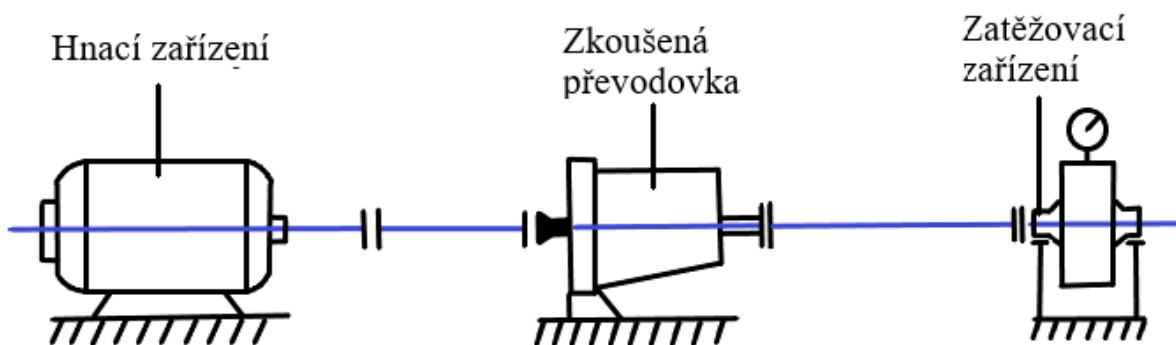
U zařízení s uzavřeným silovým kruhem jsou všechny díly namáhané zkušebním momentem. Zkušební moment vznikne předpětím, které je vyvoláno nejčastěji pomocí přírubové spojky, která ovšem neumožňuje plynulou změnu zatížení. V případě, že by změna krouticího momentu byla žádoucí, lze využít např. hydraulické spojky. Výhodou je, že hnací zařízení, například elektromotor, pohání celý převod zvenčí a zkušební moment na něj nepůsobí. K provedení uzavřené smyčky je třeba pomocná převodovka, která má stejný poměr vstupních a výstupních otáček a s testovanou převodovkou je spojena hřídelemi, které jsou vzájemně torzně předepnuty. Hlavní výhodou je úspora energie, jelikož elektrická energie potřebná k provozu slouží pouze k překonání ztrát, které vzniknou v celé měřicí soustavě. Příklad uzavřené smyčky se dvěma převodovkami je na obrázku 24. [28], [32]



Obr. 24 Schéma uzavřeného silového kruhu [32]

3.3.2 OTEVŘENÝ SILOVÝ KRUH

Zařízení s otevřeným silovým kruhem je varianta, kdy je energie hnacího stroje vedena skrze zkoušenou převodovku do zatěžovacího zařízení. Následně je pak v zatěžovacím prvku energie měřena bez dalšího využití, což je značnou nevýhodou. Hnací a zatěžovací zařízení je nutné dimenzovat pro stálé výkony, čímž se pro velké převodovky s vysokými výkony zvyšují provozní a pořizovací náklady. Tento typ se využívá v případě, že je testována převodovka společně s hnacím motorem. Hnací zařízení může být například asynchronní nebo stejnosměrný elektromotor. Jako zatěžovací zařízení se pak používají hydraulické nebo vířivé brzdy. Na obrázku 25 je schéma tohoto zařízení. [28], [32]

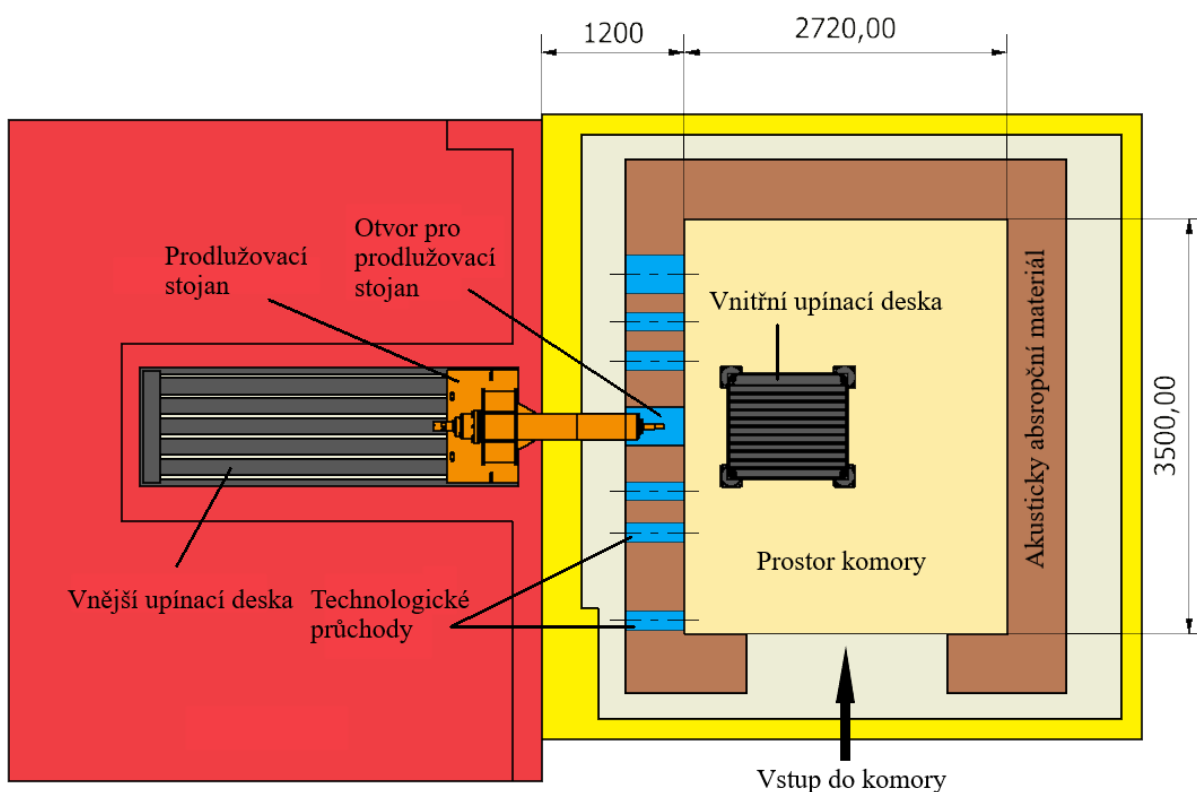


Obr. 25 Schéma otevřeného silového kruhu [32]

4 KONCEPČNÍ NÁVRH EXPERIMENTU

4.1 ZKUŠEBNÍ MÍSTNOST

Technický experiment s cílem měření vibrací a hluku lze nejlépe provést ve zkušebně s bezdozvukovou komorou. Důležité jsou vnitřní rozměry komory 3500 x 2720 mm, které limitují velikost zkušební stolice především. Důležitým prvkem komory je také vnitřní upínací deska z litiny, která slouží pro uchycení konstrukce pomocí T-drážek a její maximální nosnost činí 800 kg. Okolní podlaha je tvořena ocelovými rošty a deska je umístěna blíže ke stěně s technologickými průchody, které vedou ven z komory. Tyto průchody jsou pak využity pro kabeláž a výfukové či chladicí potrubí. Ve výšce 640 mm se nachází největší průchod o průměru 250 mm, který je v rovině symetrie desky a slouží jako vstup pro výkon. Stěny komory mají tloušťku 1200 mm a jsou tvořeny materiálem s dobrými akusticky absorpčními vlastnostmi. V okolí komory je vnější upínací deska pro montáž pohonu a součástí je i prostor pro obsluhu. [28]



Obr. 26 Schéma zkušebny s bezdozvukovou komorou [28]

Na obrázku 26 je schematicky znázorněn výchozí stav. Na vnější upínací desku je připevněn prodlužovací stojan, který slouží k propojení pohonu s měřenou převodovkou. Model zkušební místnosti byl poskytnut vedoucím práce. Konstrukce použitého prodlužovacího stojanu je obsahem diplomové práce Ing. Václava Otipky. [28]

4.2 VYBRANÁ PŘEVODOVKA

Pro návrh experimentu byla vybrána dvoustupňová automatická převodovka, přičemž model geometrie a základní parametry daného převodového ústrojí byly poskytnuty vedoucím práce. Důležité informace pro další úvahy a výpočty jsou přehledně shrnuty v tabulce 2. Nutno

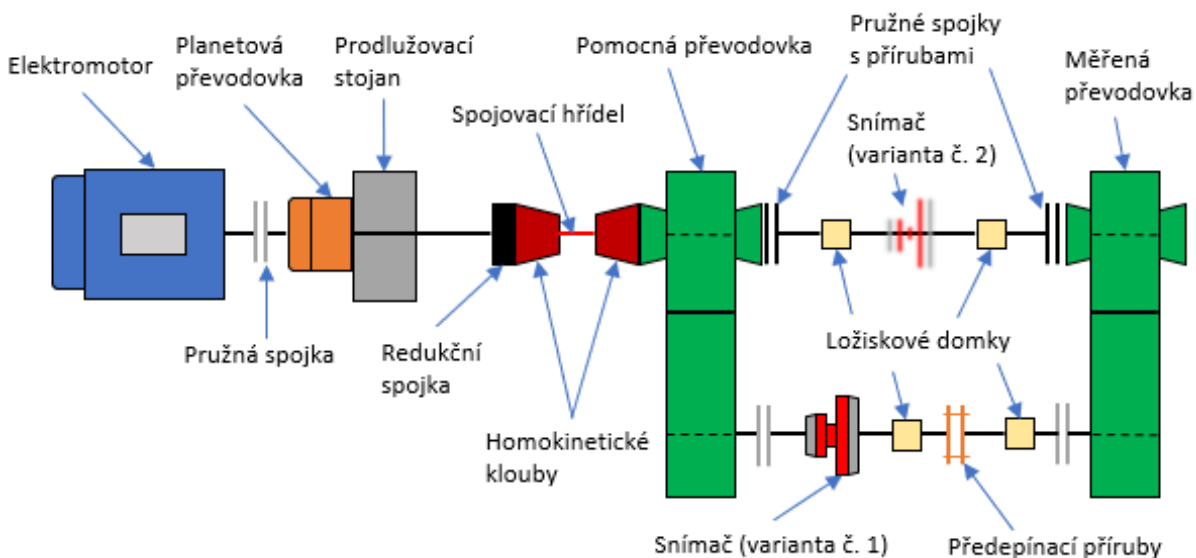
podotknout, že uvedené hodnoty jsou vztaženy k elektromotoru, se kterým je převodovka v součinnosti. Maximální hodnoty je elektromotor schopen dodávat krátkodobě. Převodovka byla vybrána především proto, že je možné ji použít v elektrických i hybridních elektromobilech.

Tab. 2 Parametry použité převodovky

Charakteristika	Udávaná hodnota
Maximální výkon [kW]	88
Nepřetržitý výkon [kW]	40
Maximální kroutící moment [N·m]	195
Nepřetržitý kroutící moment [N·m]	80
Maximální otáčky [min^{-1}]	13 300
I. rychlostní stupeň [-]	14,8
II. rychlostní stupeň [-]	5,05

4.3 KONCEPCE TESTOVACÍHO STAVU

Během návrhu testovacího stavu je třeba brát ohled na kladené požadavky. Z energetického hlediska je velmi výhodný uzavřený silový kruh. Tato varianta také snižuje pořizovací a provozní náklady celého stavu. Představu o zvolené koncepci si lze udělat z obrázku 27.

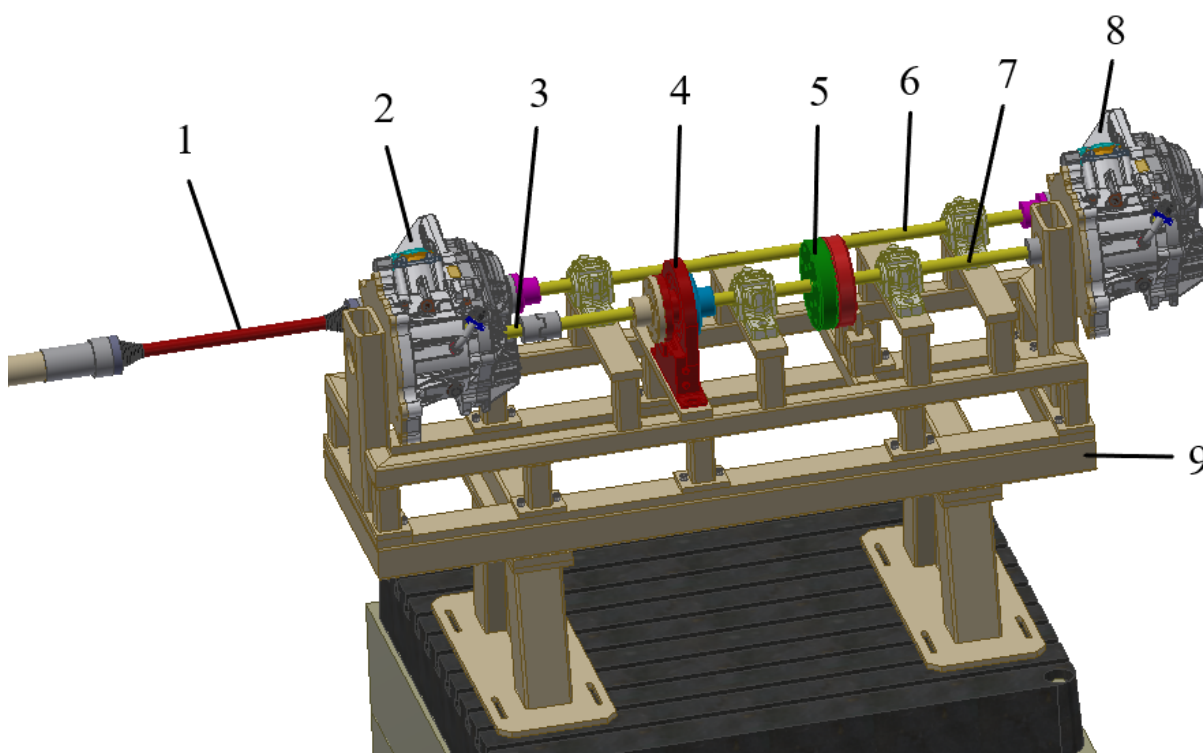


Obr. 27 Schéma finální koncepce

Výhodou navržené koncepce je mimo jiné možnost provádět testování opakovaně a dlouhodobě. Nevýhodou je potřeba dvou stejných převodovek, jelikož pomocná převodovka ovlivňuje výsledky měření vibrací a hluku, což však lze výrazně omezit vhodnou akustickou

izolací. Zvolená koncepce je také nevýhodná v tom, že nelze měnit zatěžovací moment v průběhu měření. V případě, že by byla použita varianta s otevřeným silovým kruhem, by bylo třeba vhodně zvolit brzdné zařízení, a to není v tomto případě žádoucí. Tato varianta se navíc používá především v případech, kdy testujeme převodovku i s pohonem.

Po zvážení výše uvedených argumentů je vhodnější zvolit uzavřený silový kruh, kde zátěžný moment ve smyčce vzniká torzním předepnutím spojovacích hřídelí. Konstrukční návrh testovacího stavu zohledňující podmínky zástavby do bezdozvukové komory je zobrazen na obrázku 28.



Obr. 28 Model uzavřené smyčky

1-spojovací hřídel, 2-pomocná převodovka, 3-vývod vstupního hřídele, 4-snímač, 5-předepínací příruba, 6-pomaloběžná větev, 7-rychloběžná větev, 8-měřená převodovka, 9-stolice

Z obrázku je patrné, že pomocná převodovka (2) je uložena stejně jako měřená (8), tedy v pozici, v jaké je uložena ve vozidle. Tímto způsobem uložení se lze vyhnout případným problémům s mazáním převodovky během měření. Je však nutné pomocnou převodovku upravit. Konkrétně se jedná o vyvedení vstupní hřídele na opačnou stranu. Konstrukční úpravu pomocné převodovky si lze dovolit, protože vibrace a hluk od této komponenty nejsou primárně měřeny. Samotné konstrukční úpravy pomocné převodovky jsou nad rámec této bakalářské práce.

Vyvedená vstupní hřídel (3) je spojena pružnou spojkou s hřídelí na rychloběžné větvi (7) a stejným způsobem je připojena i měřená převodovka. Konstrukční úpravy se omezí jen na obrobení drážkování vstupního hřídele do převodovky na stejný průměr jako hřídel rychloběžné větve a to proto, aby bylo možné využít spojení pružnou spojkou. Součástí rychloběžné větve (7) je i snímač momentu a otáček (4) a také předepínací příruba (5).

Na pomaloběžné větvi (6) jsou ložiskové domky pro případné využití druhé varianty snímače. Hřídel pomaloběžné větve je zakončena pružnými spojkami s přírubou, které zapadají do misek diferenciálu. Spojovací hřídel (1) propojuje konec prodlužovacího stojanu s uzavřenou smyčkou a je osazena homokinetickými klouby, které umožňují rovnoměrný přenos kroutícího momentu se stálými otáčkami i v případě nesouososti hřídelí. Celá smyčka je nesena stolicí (9), což je konstrukce, která zajišťuje správné upnutí převodovek a montáž jednotlivých prvků smyčky.

4.4 VÝPOČET ZTRÁT MĚŘICÍ SOUSTAVY

Z provedené rešerše je zřejmé, že pro správnou volbu pohonu testovacího stavu je nutné určit celkový ztrátový výkon měřicí soustavy. Maximální zátěžný stav byl určen z hodnot uvedených v tabulce 2, a to maximálního výkonu $P_{max}=88 \text{ kW}$ a maximálního zátěžného momentu $M_{max}=195 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Pro úplnost momentové charakteristiky byly dopočítány otáčky $n_{Mmax} [\text{min}^{-1}]$ ze vztahu (1) [36]:

$$n_{Mmax} = \frac{P_{max} \cdot 30}{\pi \cdot M_{max}}, \quad (1)$$

$$n_{Mmax} = \frac{88\,000 \cdot 30}{\pi \cdot 195} = 4\,309,43 \text{ min}^{-1}.$$

Ještě před výpočtem ztrátového výkonu je třeba uvést účinnosti jednotlivých komponent. Ty byly stanoveny na základě provedené rešerše a přehledně je shrnuje tabulka 3.

Tab. 3 Účinnosti a počty jednotlivých komponent

Komponenta	Účinnost [-]	Počet
Vybraná převodovka	0,93	2
Spojka	0,99	7
Ložiskový domek	0,98	4
Homokinetický kloub	0,99	2
Prodlužovací stojan	0,98	1
Planetová převodovka	0,97	1

Nejprve je třeba stanovit ztrátový výkon $P_{ZS} [W]$ ve smyčce dle vztahu (2) [36]:

$$P_{ZS} = P_S \cdot (1 - \eta_p^m \cdot \eta_s^m \cdot \eta_d^m), \quad (2)$$

kde $\eta_p [-]$ je účinnost převodovky, $\eta_s [-]$ účinnost spojky, $\eta_d [-]$ účinnost ložiskového domku, $m [-]$ počet daných komponent a $P_S [W]$ výkon ve smyčce.

Za výkon ve smyčce dosazujeme maximální výkon P_{max} , účinnosti bereme z tabulky 3 a po dosazení dostáváme:

$$P_{ZS} = 88\,000 \cdot (1 - 0,93^2 \cdot 0,99^6 \cdot 0,98^4) = 21\,905,7 \text{ W}.$$

Pro vyčíslení ztrátového výkonu celé soustavy je třeba určit také ztrátový výkon $P_{ZP} [W]$ mimo uzavřenou smyčku. Ten lze vypočítat ze vztahu (3) [36]:

$$P_{ZP} = P_{ZS} \cdot (1 - \eta_k^m \cdot \eta_{st}^m \cdot \eta_s^m \cdot \eta_{pl}^m), \quad (3)$$

kde $\eta_k [-]$ je účinnost homokinetického kloubu, $\eta_{st} [-]$ účinnost prodlužovacího stojanu a $\eta_{pl} [-]$ účinnost planetové převodovky.

$$P_{ZP} = 21\,905,7 \cdot (1 - 0,99^2 \cdot 0,98 \cdot 0,99 \cdot 0,97) = 1\,700,62 \text{ W}$$

Celkový ztrátový výkon celé měřicí soustavy $P_{ZC} [W]$ je dán vztahem (4):

$$P_{ZC} = P_{ZS} + P_{ZP}, \quad (4)$$

$$P_{ZC} = 21\,905,7 + 1\,700,62 = 23\,606,32 \text{ W}.$$

4.5 URČENÍ PARAMETRŮ UZAVŘENÉ SMYČKY

Dalším krokem je výpočet hodnot otáček a momentů na jednotlivých větvích. Vyjdeme z hodnot stanovených v kapitole 4.4. Pro rychloběžnou větev tedy uvažujeme maximální zátěžný moment M_{max} a otáčky n_{Mmax} .

Ze známých převodových poměrů (tabulka 2) a účinnosti měřené převodovky lze pomocí obecných vztahů (5) a (6) spočítat moment $M_1 [N \cdot m]$ pro první rychlostní stupeň a $M_2 [N \cdot m]$ pro druhý rychlostní stupeň na pomaloběžné větvi [36]:

$$M_1 = M_{max} \cdot i_1 \cdot \eta_p, \quad (5)$$

$$M_2 = M_{max} \cdot i_2 \cdot \eta_p, \quad (6)$$

kde $i_1 [-]$ je první rychlostní stupeň měřené převodovky a $i_2 [-]$ je druhý rychlostní stupeň měřené převodovky.

Stejně rychlostní stupně a účinnost použijeme i při výpočtu otáček $n_1 [min^{-1}]$ pro první rychlostní stupeň a $n_2 [min^{-1}]$ pro druhý rychlostní stupeň na pomaloběžné větvi. Ty lze vypočítat ze vztahu (7) a (8) [36]:

$$n_1 = \frac{n_{Mmax}}{i_1} \cdot \eta_p. \quad (7)$$

$$n_2 = \frac{n_{Mmax}}{i_2} \cdot \eta_p. \quad (8)$$

Po dosazení do rovnic (5) a (7) tak dostáváme hodnoty momentu a otáček pomaloběžné větve pro první rychlostní stupeň:

$$M_1 = 195 \cdot 14,8 \cdot 0,93 = 2\,683,98 \text{ N} \cdot \text{m},$$

$$n_1 = \frac{4309,43}{14,8} \cdot 0,93 = 270,8 \text{ min}^{-1}.$$

Dosazením do rovnic (6) a (8) dostáváme pak moment a otáčky pomaloběžné větve pro druhý rychlostní stupeň:

$$M_2 = 195 \cdot 5,05 \cdot 0,93 = 915,82 \text{ N} \cdot \text{m},$$

$$n_2 = \frac{4309,43}{5,05} \cdot 0,93 = 793,62 \text{ min}^{-1}.$$

Důležitým údajem je také hodnota maximálních otáček rychloběžné větve $n_{max} = 13300 \text{ min}^{-1}$. Pro další úvahy je vhodné vypočítat, jaké budou otáčky pomaloběžné větve pro n_{max} při prvním ($n_{P1max} [\text{min}^{-1}]$) a druhém ($n_{P2max} [\text{min}^{-1}]$) rychlostním stupni. Využijeme vztahy (9) a (10) [36]:

$$n_{P1max} = \frac{n_{max}}{i_1} \cdot \eta_p, \quad (9)$$

$$n_{P2max} = \frac{n_{max}}{i_2} \cdot \eta_p, \quad (10)$$

$$n_{P1max} = \frac{13300}{14,8} \cdot 0,93 = 835,74 \text{ min}^{-1},$$

$$n_{P2max} = \frac{13300}{5,05} \cdot 0,93 = 2\,449,31 \text{ min}^{-1}.$$

4.6 VOLBA SNÍMAČE KROUTICÍHO MOMENTU

Abychom byli schopni v průběhu experimentu měřit kroučící moment a otáčky, je součástí návrhu i snímač těchto veličin, který je důležitý také pro změření vyvolaného zátěžného momentu ve smyčce. Při výběru snímače je důležité brát ohled na to, jaká je maximální zatížitelnost snímače a také do jakých provozních otáček je schopen pracovat. Směrodatná je také přesnost snímače. Vybíráno bylo ze snímačů společnosti HBM. Z údajů uvedených na stránkách společnosti je zřejmé, že námi dále uvažované snímače požadavek přesnosti pro naši aplikaci splňují. [37]

Zvolený snímač od společnosti HBM nese označení T40B. Vyrábí se v několika variantách, jež se liší rozměry a velikostí snímaných momentů a otáček. První snímač, který se jeví jako vhodný, je T40B, jenž snímá kroučící moment v intervalu $\pm 5000 \text{ N} \cdot \text{m}$ a jeho maximální provozní otáčky jsou 14000 min^{-1} . Tento snímač by bylo vhodné umístit na pomaloběžnou větev. Na obrázku 27 se jedná o variantu č. 2. Vhodnou volbou by byl i z důvodu dalších aplikací. [38]

Tento navržený snímač je ovšem pro naši aplikaci příliš rozměrný a jeho měřicí rozsah zbytečně velký. Vhodnější variantou je umístit snímač na rychloběžnou větev. Maximální zátěžný moment je zde $195 \text{ N} \cdot \text{m}$ a maximální otáčky 13300 min^{-1} . Je tedy patrné, že bude stačit snímač

menších rozměrů i měřicích rozsahů, což by se projevilo i na ceně. Takový vhodný snímač řady T40B byl v katalogu firmy HBM nalezen a jeho parametry jsou shrnuty v tabulce 4. Na obrázku 27 se jedná o variantu č. 1. [38]

Snímač je schopen měřit statický i dynamický moment síly a otáčky jsou snímány magnetickým systémem. Snímač se skládá z rotorové měřicí části, jenž je opatřena otvory pro přírubu a statoru, který obsahuje elektroniku napájení rotoru a zpracovává signál momentu síly a otáček. Konstrukci snímače je možné vidět na obrázku 29. Výhodou snímače je jeho odolnost proti vibracím a také fakt, že součástí snímače nejsou ložiska, což je výhodou z hlediska měření vibrací a hluku. Společnost ke snímači dodává i vyhovující torzně tuhou spojku a příslušnou kabeláž. Zařízení je možné využít pro širokou škálu aplikací. [37], [38]

Tab. 4 Parametry snímače T40B 200 N·m [38]

Charakteristika	Hodnota z katalogového listu
Měřicí rozsah [N·m]	-200 až 200
Maximální provozní otáčky [min ⁻¹]	20 000
Napájecí napětí [V]	18 až 30
Třída přesnosti dle HBM [%]	< ±0,05 %
Pracovní rozsah teplot [°C]	-20 až 85
Frekvenční rozsah [Hz]	10 až 2 000



Obr. 29 Snímač řady T40B [38]

4.7 HNACÍ ZAŘÍZENÍ

Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.4, směrodatný při volbě pohonu je celkový ztrátový výkon 23,6 kW. Pro úplnost charakteristiky je však třeba dopočítat maximální krouticí moment M_p [N·m], který musí být pohon schopen vyvinout. Lze ho stanovit ze vztahu (11) [36]:

$$M_p = \frac{P_{zC} \cdot 30}{\pi \cdot n_1}, \quad (11)$$

$$M_p = \frac{23\,606,32 \cdot 30}{\pi \cdot 270,8} = 832,44 \text{ N} \cdot \text{m}.$$

Pro volbu hnacího zařízení je také třeba dbát na maximální otáčky, kde směrodatnou hodnotou z tohoto hlediska jsou maximální otáčky pomaloběžné větve $2449,31 \text{ min}^{-1}$. Pro měření vibrací a hluku je využíván na ÚADI dynamometr DS 736-4/V, jehož výkon v režimu motoru činí 74,5 kW a maximální dosažitelné otáčky jsou 6400 min^{-1} . Tento stroj má dostatečný výkon pro pokrytí ztrát a také vhodný rozsah otáček. Disponuje ovšem krouticím momentem pouze 80 N·m a není tedy pro naši aplikaci vhodný.

Ústav ovšem disponuje silnějším strojem. Konkrétně se jedná o elektromotor STIPAF L1B225M. Parametry, které bylo možné zjistit ze štítku motoru a dohledat v katalogu výrobce jsou uvedeny v tabulce 5. Uvedený výkon 206 kW zcela bez problému pokryje vzniklé ztráty v měřicí soustavě a zároveň poskytuje dostatečnou rezervu pro překonání setrvačných hmot a uvedení soustavy do provozu. Krouticí moment elektromotoru je také dostatečný.

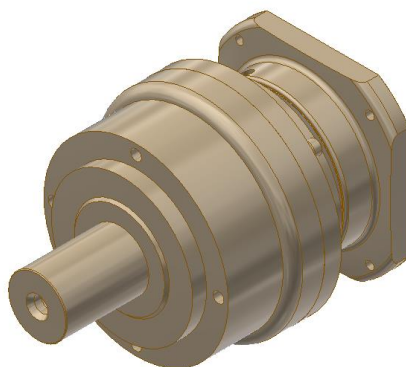
Tab. 5 Parametry elektromotoru STIPAF L1B225M

Charakteristika	Uvedená hodnota
Maximální výkon [kW]	206
Rozsah provozních otáček [min^{-1}]	0 až 1 314
Maximální krouticí moment [N·m]	1 498
Napájecí napětí [V]	400
Proud kotvou [I]	559

4.8 RYCHLOBĚŽNÁ PŘEVODOVKA

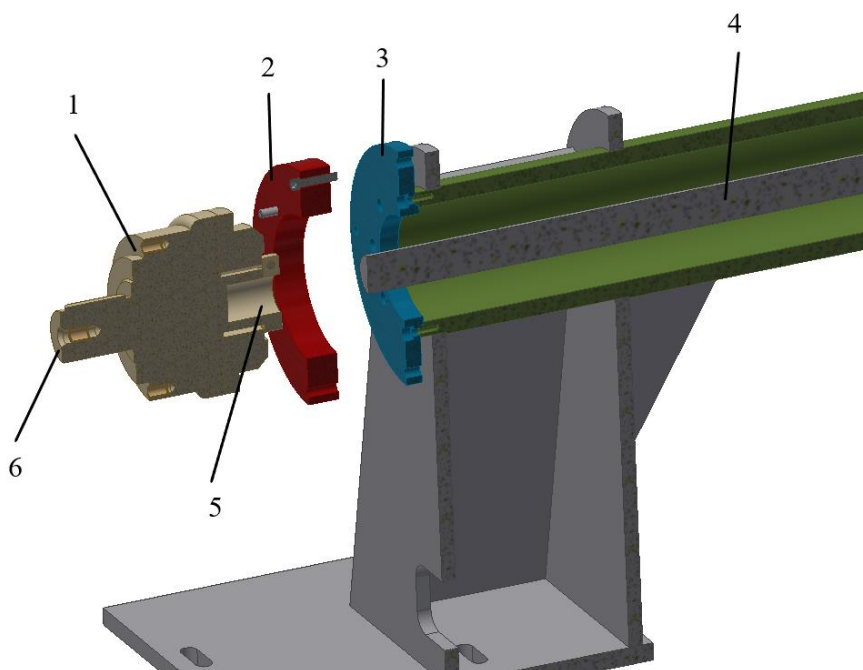
Lze si všimnout, že rozsah otáček námi zvoleného pohonu není dostatečný, a proto je třeba zvolit rychloběžnou převodovku, která rozsah zvýší. Vzhledem k tomu, že součástí prodlužovacího stojanu [28] je planetová převodovka, nabízí se toto řešení i v našem případě. Je třeba ovšem dodat, že zvolená planetová převodovka je instalována opačně. Při výběru převodovky je brán zřetel i na přenášený krouticí moment, který musí převodovka zvládnout. Finální volba padla na převodovku AE 235 od společnosti Apex Dynamics. [41]

Jedná se o jednostupňovou přímou planetovou převodovku s převodovým stupněm $i_{pl}=3$. Pomocí této převodovky se využitelný rozsah otáček zvýší na 0 až 3942 min^{-1} . Minimální převodový stupeň, který by navýšil rozsah otáček motoru je však 1,64 a je tedy zřejmé, že zvolený převodový poměr je naddimenzován. Je tomu proto, že se jedná o nejmenší stupeň, který firma Apex Dynamics nabízí. Na míru vyrobená převodovka by byla velmi drahá, a proto bylo voleno takto. Dle výrobce převodovka zvládá přenést moment až $1140 \text{ N}\cdot\text{m}$ a její výhodou je vysoká účinnost 97 % a možnost montáže ve všech polohách. Na stránkách společnosti je uveden model daného typu. [41] Představu si lze udělat z obrázku 30.



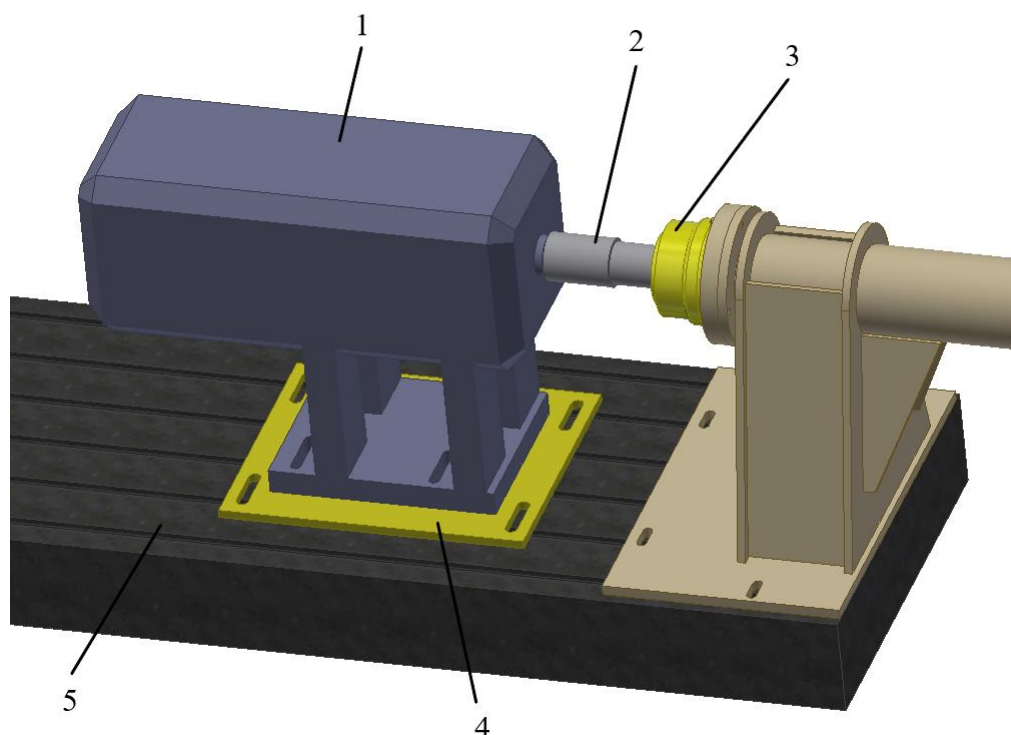
Obr. 30 Model převodovky AE 235 společnosti Apex Dynamics [41]

Pro správnou instalaci převodovky je třeba drobné konstrukční úpravy prodlužovacího stojanu. Návrh takové úpravy je na obrázku 31.



Obr. 31 Provedení konstrukční úpravy stojanu a montáž převodovky
1-převodovka, 2-mezikus převodovky, 3-středící víko, 4-hřídel stojanu, 5-objímka převodovky,
6-výstupní hřídel převodovky

Středící víko (3) je nejprve přišroubováno k trubce prodlužovacího stojanu stejnými otvory, jak je tomu v původní verzi. Pro sešroubování mezikusu převodovky (2) a středícího víka jsou obě komponenty co do průměru zvětšeny a mezikus byl ještě vhodně upraven tak, aby bylo možné k němu připevnit převodovku (1) a též ji vystředit. Vzhledem k otočené poloze převodovky byl upraven hřídel stojanu (4) tak, aby bylo možné vložit jej do převodovky, zajistit dotažením pomocí objímky (5) a přenést krouticí moment. Výstupní hřídel z převodovky (6) je dále spojena s výstupní hřídelí motoru. Model elektromotoru a spojení s převodovkou lze vidět na obrázku 32.

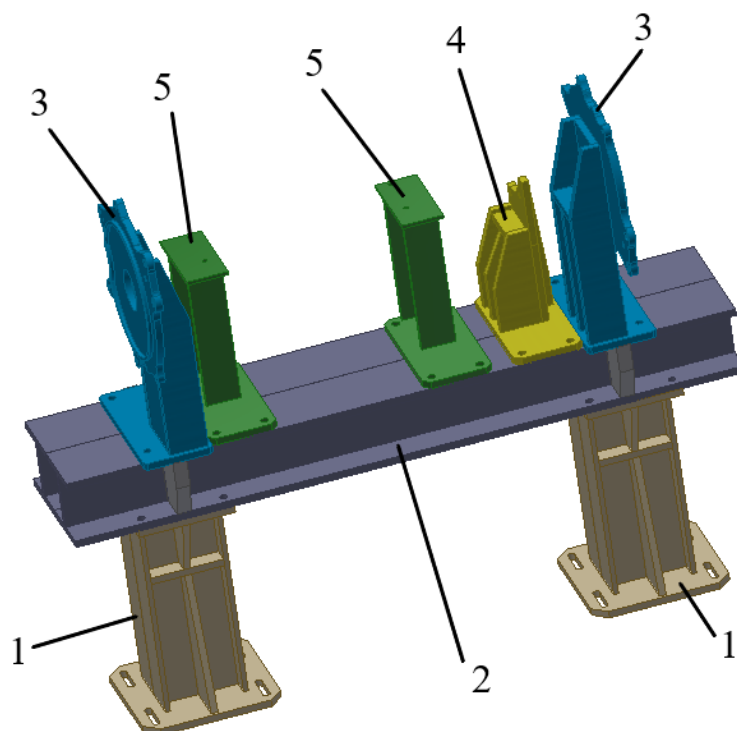


*Obr. 32 Model elektromotoru a spojení s převodovkou
1-elektromotor, 2-pružná spojka, 3-planetová převodovka, 4-distanční plech, 5-vnější upínací deska*

Výstupní hřídel zvoleného elektromotoru (1) není ve stejné výšce jako hřídel převodovky (3) a z tohoto důvodu je na vnější upínací desku (5) připevněn distanční plech (4) s vyfrézovanými drážkami jak pro jeho uchycení k desce, tak k následnému připevnění elektromotoru. Výstupní hřídel převodovky a elektromotoru jsou spojeny pomocí pružné spojky (2) a krouticí moment je přenášen perem.

4.9 STOLICE UZAVŘENÉ SMYČKY

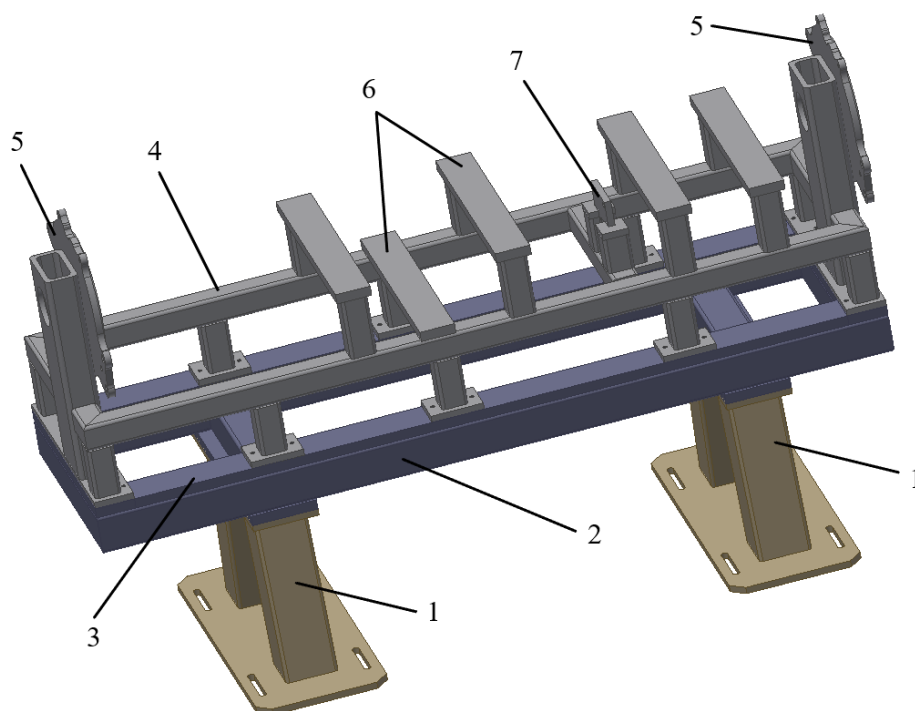
Na stolici, jež se nachází uvnitř akustické komory a umožňuje montáž komponent do uzavřené smyčky, byly kladeny náročnější požadavky. Mezi ty základní patří snadná montáž a případná možnost výměny komponent. První varianta stolice byla navržena ještě před finální úpravou celkové koncepce. Využito bylo převážně I-profilů a upínací desky převodovek jsou nevhodně orientovány. Z akustického hlediska první varianta obsahuje příliš mnoho odrazivých ploch, které by měly negativní dopad na měření vibrací a hluku. Na obrázku 33 lze vidět model první verze stolice.



Obr. 33 První verze stolice uzavřené smyčky

1-podpora, 2-upínací rám, 3-upnutí převodovky, 4-aretační stojan, 5-podpora domku a snímače

Tato negativa lze eliminovat použitím profilové oceli čtvercového nebo obdélníkového průřezu. Finální verze stolice je na obrázku 34.



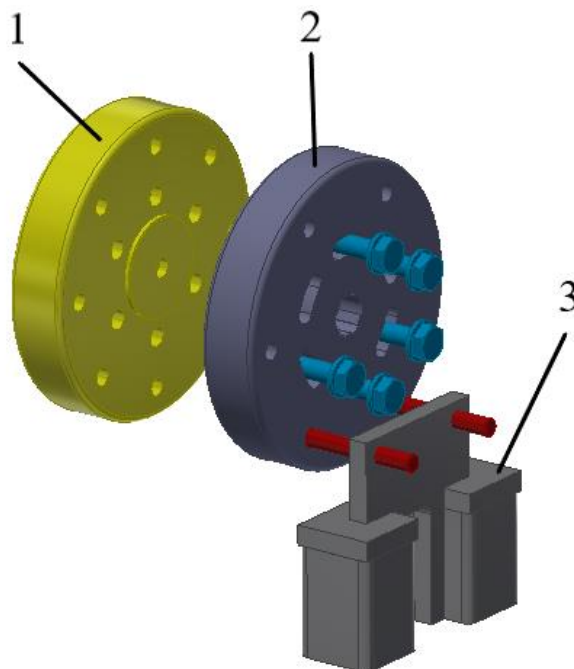
Obr. 34 Finální verze stolice uzavřené smyčky

1-podpora, 2-upínací rám, 3-plech, 4-nosná konstrukce, 5-upnutí převodovky, 6-podpora ložiskových domků a snímače, 7-aretační stojan

Celý svařenec se skládá ze tří menších svařenců. Podpora (1) je část, jež slouží k uchycení konstrukce k vnitřní upínací desce v akustické komoře. Na podporách je přišroubován upínací rám (2), na kterém jsou po obvodu navařeny plechy (3), které slouží jako přidaný materiál pro předvrtané díry, pomocí kterých je na desku přimontována nosná konstrukce (4). V případě potřeby je možné do navařených plechů předvrtat nové díry pro případnou změnu celkové koncepce. Samotný horní svařenec se pak skládá z již správně orientovaných upínacích prvků pro převodovky (5), podpor pro ložiskové domky a snímač momentu (6) a aretačního stojanu (7).

4.10 PRINCIP TORZNÍHO PŘEDEPNUTÍ

Jak již bylo zmíněno, zátěžný moment je do smyčky vnesen torzním předeprnutím hřídelí, k čemuž slouží předeprnávací příruby. Mechanismus předeprnutí je názorně ukázán na obrázku 35 a je inspirován řešením z diplomové práce Ing. Ondřeje Machálka [39].



Obr. 35 Princip torzního předeprnutí

Nejprve je pomocí kolíků aretační příruba (2) pevně spojena s aretačním stojanem (3), jenž je součástí vrchního svařence stolice. Následně dojde k pootočení druhé příruby (1) například pomocí páky a sešroubování přírub k sobě. Po vyndání kolíků je do smyčky vnesen zátěžný moment.

Součástí aretační příruby jsou vyfrézované drážky pro snadnější spojení přírub a otvory pro kolíky. Do příruby, které je pootočena, jsou vyvrtány otvory pro spojení s aretační přírubou a zároveň na větším průměru otvory pro páku, popř. mechanismus, který přírubu pootočí. Obě příruby jsou s hřídelemi rychloběžné větve spojeny pomocí drážkování, které zajistí přenos krouticího momentu a proti axiálnímu posuvu jsou příruby zajištěny šroubem.

ZÁVĚR

Vzhledem k neustálému vývoji v oblasti elektromobility bylo jedním z cílů této práce přehledně popsat jednotlivé koncepce a přiblížit charakteristické prvky. Čistě bateriové vozy a hybridní vozy se liší především přítomností spalovací jednotky (HEV) či její absencí (BEV), což výrazně ovlivňuje celý koncept elektromobilu. Společným prvkem, který je součástí každého elektromobilu, jsou trakční baterie, jejichž výhodou je možnost dobíjení během brzdění (rekuperace), ovšem souvisí s nimi řada problémů, jako například nebezpečí mechanického porušení jednotlivých článků, vznícení a také problematická činnost baterií při extrémních teplotách. S tím souvisí tepelný management baterií a u BEV také vyhřívání kabiny vozu. Pro elektrický pohon je nezbytná také výkonová elektronika, která upravuje napěťové poměry mezi jednotlivými komponentami. Z emisního hlediska je čistě elektrický pohon velmi výhodný, je však třeba dodat, že samotná výroba a pak následná likvidace starých baterií jsou velkou zátěží pro naši planetu. Elektrifikace vozového parku však vyžaduje vybudování rozsáhlé infrastruktury a je tedy otázkou, do jaké míry je elektromobilita šetrnější k životnímu prostředí v případě, že elektrická energie bude nadále vyráběna převážně v uhelných elektrárnách.

Přítomnost či absence spalovací jednotky výrazně ovlivňuje také koncepci pohonného traktu. Sériové hybridy využívají spalovací motor pouze pro pohon generátoru, který dobíjí baterie, přičemž k pohonu vozu slouží pouze elektromotor. U paralelních hybridů se na pohonu vozu podílí spalovací motor i elektromotor a míru příspěvku elektromotoru určuje jeho velikost a pozice. Možnost přecházet mezi těmito principy pohonu umožňuje sériově-paralelní hybrid, který využívá planetové převodovky a kombinuje výhody obou typů, což umožňuje velmi dobrou adaptaci na změny jízdních stylů a snižuje spotřebu paliva a elektrické energie. Pohonný trakt čistě bateriových vozů lze rozdělit především podle vzájemné polohy elektromotoru a převodovky. Usazení elektromotoru s převodovkou a diferenciálem na přední či zadní nápravě je ze všech konfigurací nejběžnější a používá ho například společnost Tesla ve svých vozech. Zajímavou koncepcí je pak tzv. „in-wheel“ motor, kdy jsou elektromotory nasazeny přímo na náboj kola.

Převodové ústrojí vozu Toyota Prius 2010 je mechanicky složitou záležitostí v porovnání s jednostupňovým pevným převodem vozu Model S. Obě koncepce jsou však dlouho používané, a proto jsou aktuálně trendem vícestupňové převodovky, jejichž zástupcem je například převodovka vozu Porsche Taycan. Vzhledem k neustálému vývoji těchto převodovek byl vypracován návrh experimentu s cílem měřit vibrace a hluk od dvoustupňové automatické převodovky, kterou je možné použít v BEV i HEV.

Na základě provedené rešerše byl navržen testovací stav. Vibrace vznikají primárně při záběru ozubených kol a sekundárně nedokonalostí ložisek. Koncepční návrh testovacího stavu zohledňuje potřebu měřit vibrace a hluk a s tím spojené požadavky na měřicí aparaturu. Za tímto účelem byla provedena rešerše měřicí aparatury, kterou bylo možné pro daný úkol použít a která je k dispozici na ÚADI. Běžně využívanou a vhodnou aparaturou, jež je možné instalovat v bezdozvukové komoře, je intenzitní sonda, akustická kamera a akcelerometry. Co se způsobu testování převodovek týče, jednou z variant byl otevřený silový kruh, u kterého je energie hnacího zařízení vedena skrz zkoušenou převodovku do brzdného zařízení, kde je bez dalšího využití mařena. Uvažován byl také uzavřený silový kruh, jehož princip spočívá v uzavření smyčky pomocí dvou převodovek o stejných převodových poměrech a vnesení zátěžného momentu, který se nepřenáší na hnací zařízení, přičemž k pohonu smyčky stačí pouze ztrátový výkon.

Důležitým krokem byla správná volba způsobu zatěžování. Z energetického a finančního hlediska bylo zvoleno zatěžování s předpětím, tedy uzavřená smyčka, která je primárně tvořena pomocnou a měřenou převodovkou. Pro správný průběh měření je nutné po celou dobu znát aktuální hodnoty krouticího momentu a otáček na jednotlivých větvích a z tohoto důvodu byl zvolen vhodný snímač obou parametrů od společnosti HBM řady T40B. Ze dvou uvažovaných variant byl vybrán snímač verze 200 N·m a umístěn na rychloběžnou větev.

Po výpočtu směrodatných parametrů byl zvolen elektromotor STIPAF L1B225M. Z důvodu nízkého rozsahu otáček bylo nutné koncepční návrh doplnit o převodové ústrojí AE 235 výrobce Apex Dynamics s převodovým stupněm 3, což umožní měřit vibrace a hluk při všech převodových stupních. Zvolená planetová převodovka byla vyměněna za stávající převodovku prodlužovacího stojanu. Vzhledem k novým rozměrům a opačnému uložení převodovky bylo zapotřebí stojan konstrukčně upravit. Další drobnou úpravou bylo přidání distančního plechu na vnější upínací desku tak, aby výstupní hřídel elektromotoru byla ve stejné výšce s planetovou převodovkou.

Finální verze stoličky uzavřené smyčky je navržena tak, aby bylo možné změnit polohu komponent nebo stoličky demontovat. Použití profilové oceli minimalizuje odrazivé plochy a umožňuje tak efektivněji měřit vibrace hluk. Dalším krokem by mělo být detailní rozpracování konceptu a provedení modální analýzy, deformačně-napěťové analýzy a následné vytvoření komplexního výpočtového modelu pro detailní popis vibroakustického projevu.

V práci je navržen koncept torzního předepnutí pomocí přírubové spojky, jenž byl využit i v diplomové práci Ing. Ondřeje Machálka. Ten je umístěn na rychloběžnou větev z důvodu výskytu menšího krouticího momentu, a tedy snazšího předepnutí.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Vědecké okénko: Na cestě do historie elektromobility, díl 1. aneb jak to všechno začalo. In: *Www.elektrickevozy.cz* [online]. Praha: ArteMan, 2011, 25.10.2019 [cit. 2020-01-29]. Dostupné z: <https://elektrickevozy.cz/clanky/vedecke-okenko-na-cestech-do-historie-elektromobility-dil-1-aneb-jak-to-vsechno-zacalo>
- [2] Stručná historie elektromobilů. In: *Elektromobily-os* [online]. Sedlec-Prčice: Asociace pro elektromobilitu České republiky, 2015 [cit. 2020-01-29]. Dostupné z: <http://www.elektromobily-os.cz/stru%C4%8Dn%C3%A1-historie-elektromobilu>
- [3] Sibrandus Stratingh první elektrický vůz. In: *Www.elektrickevozy.cz* [online]. Praha: ArteMan, 2011, 2019 [cit. 2020-01-29]. Dostupné z: <https://elektrickevozy.cz/clanky/vedecke-okenko-na-cestech-do-historie-elektromobility-dil-1-aneb-jak-to-vsechno-zacalo>
- [4] EMADI, Ali. *Advanced Electric Drive Vehicles*. 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300: CRC Press, 2015. ISBN 13: 978-1-4665-9770-9.
- [5] *Tesla* [online]. 3500 Deer Creek Road, Palo Alto, CA 94304: Tesla Motors, 2003 [cit. 2020-01-29]. Dostupné z: <https://www.tesla.com/>
- [6] *ŠKODA AUTO* [online]. Mladá Boleslav: ŠKODA AUTO, 1895 [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: <https://www.skoda-auto.cz/>
- [7] MIŠKOVSKÝ, Ondřej. Typy elektromobilů a jak je rozeznat. In: *Www.elektrickevozy.cz* [online]. Praha: ArteMan, 2011, 3. 4. 2019 [cit. 2020-02-01]. Dostupné z: <https://elektrickevozy.cz/clanky/typy-elektromobilu-a-jak-je-rozeznat>
- [8] FREI, Martin. Vodíkový pohon automobilů: Nechceme lithium, chceme vodík. In: *Auto.cz* [online]. Praha: CZECH NEWS CENTER, 2001, 21. 4. 2018 [cit. 2020-02-01]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/vodikovy-pohon-automobilu-nehceme-lithium-chceme-vodik-121182>
- [9] SANDÉN, Björn a Pontus WALLGREN. *SYSTEMS PERSPECTIVES ON ELECTROMOBILITY*. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2014. ISBN 978-91-980973-9-9.
- [10] Electric Car Components and Functions. *Omazaki* [online]. Banten, Indonesia: PT. Omazaki Envirokal Prakarsa [cit. 2020-02-01]. Dostupné z: <https://www.omazaki.co.id/en/electric-vehicle-components/>
- [11] Plug-in Hybrid Electric Vehicle. In: *Alternative Fuels Data Center* [online]. USA: U.S. Department of Energy, 1991 [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: https://afdc.energy.gov/sp/assets/car_pages/plugin-b98fca6b853e4470c62d75b1ce3c2e9534531b60391068aaa622815258ca6839.jpg
- [12] Infographics electrovehicles czech. In: *ŠKODA Storyboard* [online]. Mladá Boleslav: ŠKODA AUTO, 1895 [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: <https://cdn.skoda-storyboard.com/2019/02/infographics-electrovehicles-czech.jpg>

- [13] KAPTAN, Deniz a Galip CANSEVER. Battery Chargers in Electric Vehicles. *IEEE Xplore Digital Library* [online]. 2018 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT): IEEE, 2018, , 1-3 [cit. 2020-02-11]. DOI: 10.1109/CEIT.2018.8751837. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8751837>
- [14] Tesla 3rd generation wall connector - Model 3 charging. In: *Teslarati* [online]. USA, Kalifornie: Teslarati, [2013] [cit. 2020-02-12]. Dostupné z: <https://www.teslarati.com/wp-content/uploads/2020/01/tesla-3rd-gen-wall-connector-model-3-charging.jpg>
- [15] Ion flow in lithium-ion battery. In: *Battery University* [online]. Kanada, Vancouver: Cadex, 2003 [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/_img/content/final1.jpg
- [16] Lithium-iontový akumulátor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Lithium-iontov%C3%BD_akumul%C3%A1tor
- [17] Nikl-metal hydridový akumulátor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Nikl-metal_hydridov%C3%BD_akumul%C3%A1tor
- [18] JAGUEMONT, Joris, Loic BOULON, Yves DUBE a Francois MARTEL. Thermal Management of a Hybrid Electric Vehicle in Cold Weather. *IEEE Transactions on Energy Conversion* [online]. 2016, 2016(31), 11 [cit. 2020-02-14]. DOI: 10.1109/TEC.2016.2553700. ISSN 08858969. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TEC.2016.2553700>
- [19] *Grepow Rechargeable Battery* [online]. Shenzhen: Grepow Battery, 1998 [cit. 2020-02-14]. Dostupné z: <https://www.grepow.com/>
- [20] MARSHALL, Garrett, Colin MAHONY a Matthew RHODES. Thermal Management of Vehicle Cabins, External Surfaces, and Onboard Electronics: An Overview. *Engineering* [online]. Elsevier, 2019, , 1-16 [cit. 2020-02-17]. DOI: 10.1016/j.eng.2019.02.009. ISSN 20958099. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809918312529>
- [21] Opatření v oblasti klimatu. *Evropská komise* [online]. Brusel, Belgie: Evropská unie, 1993 [cit. 2020-02-17]. Dostupné z: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars_en
- [22] ZHUANG, Weichao, Shengbo LI (EBEN) a Xiaowu ZHANG. A survey of powertrain configuration studies on hybrid electric vehicles. *Applied Energy* [online]. Elsevier, 2020, (262), 1-17 [cit. 2020-02-29]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114553. ISSN 03062619. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920300659>
- [23] FELDEN, Matthias, Patrick BÜTTERLING, Peter JECK, Lutz ECKSTEIN a Kay HAMEYER. Electric Vehicle Drive Trains : From the Specification Sheet to the Drive-Train Concept. *IEEE Xplore Digital Library* [online]. ©2020, October, 2010, , 3-9 [cit. 2020-03-18]. DOI: 10.1109/EPEPEMC.2010.5606531. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5606531>

- [24] PARK, Gwangmin, Seonghun LEE, Sungho JIN a Sangshin KWAK. Integrated modeling and analysis of dynamics for electric vehicle powertrains. *Expert Systems with Applications* [online]. Elsevier, 2014, 2014, 41(5), 2595-2607 [cit. 2020-03-18]. DOI: 10.1016/j.eswa.2013.10.007. ISSN 09574174. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417413008129>
- [25] DAVIS, Sam. In-Wheel Motor Systems Will Propel EV Performance. In: *Power Electronics* [online]. USA: Endeavor Business Media, ©2020, červenec, 2018 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://www.powerselectronics.com/markets/automotive/article/21864197/inwheel-motor-systems-will-propel-ev-performance>
- [26] KELLY, John D. 3rd Generation Prius Transaxle - P410 Quick Look. In: *Youtube* [online]. Weber State University (WSU) - Department of Automotive Technology - Transmission Lab.: Weber State University, 2017 [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=w_mc17CoyJs
- [27] SENSIBA, Jennifer. EV Transmissions Are Coming, And It's A Good Thing. In: *Clean Technica* [online]. USA: CleanTechnica.com, ©2020 [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://cleantechnica.com/2019/07/22/ev-transmissions-are-coming-and-its-a-good-thing/>
- [28] OTIPKA, Václav. *Konstrukční návrh zkušebního stavu s uzavřenou smyčkou toku momentu pro experimentální ověření parametrů převodových ústrojí*. Brno, 2018, 106 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Aleš Prokop, Ph.D.
- [29] TANGEMANN, Cristian. NVH: Reducing unfamiliar powertrain noises in electric vehicles. In: *Automotive iQ* [online]. Berlín, Německo: IQPC, ©2020, 15.10.2019 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://www.automotive-iq.com/powertrain/articles/nvh-reducing-unfamiliar-powertrain-noises-in-electric-vehicles>
- [30] NOVÝ, Richard. Hluk částí strojů. RICHARD, Nový. *Hluk a chvění*. České vysoké učení technické v Praze: © Richard Nový, ©1995, s. 220-228. ISBN 978-80-01-04347-9.
- [31] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace: Měření a hodnocení*. Praha: Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-90 1936-2-5.
- [32] VLK, František. Převodová ústrojí. VLK, František. *Zkoušení a diagnostika motorových vozidel*. 2. vydání. Brno: Vlk, František, 2005, s. 217-237. ISBN 80-239-3717-0.
- [33] DJB Industrial 52. In: *DJB Instruments: Sensing Engineering Innovation* [online]. Mildenhall, UK: DJB Instruments, ©2020 [cit. 2020-04-13]. Dostupné z: <https://www.djbinstruments.com/app/djb/assets/images/DJB-Industrial%20-%2052-web.jpg?v=1504630160>
- [34] *BMT Drive solutions* [online]. Kampveldstraat 51, 8020 Oostkamp Belgium: BMT Drive solutions, [2018] [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://bmtdrivesolutions.com/>

- [35] *Porsche AG* [online]. Stuttgart, Německo: Dr. Ing. h.c. F. Porsche, ©2020 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.porsche.com/international/>
- [36] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE, Richard G. (Richard Gordon) BUDYNAS, Martin HARTL a Miloš VLK. *Konstruování strojních součástí*. V Brně: VUTIUM, 2010, xxv, 1159 s. : il. ; 26 cm. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [37] Snímače kroutícího momentu. *HBM* [online]. Brno: HBP měřící technika, ©2020 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <https://www.hbm.cz/kategorie/snimace-a-senzory-mechanickych-velicin/snimace-krouticiho-momentu/>
- [38] T40B; Torque Flange; Data sheet; B03406. In: *HBM* [online]. Brno: HBP měřící technika, ©2020 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <https://www.hbm.cz/wp-content/uploads/B03406.pdf>
- [39] MACHÁLEK, Ondřej. *Návrh testovacího stavu pro dlouhodobé testování spojek určených pro kolejová vozidla*. Brno, 2019, 106 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Kamil Řehák, Ph.D.
- [40] *Richtek* [online]. Taiwan: Richtek Technology, 1998 [cit. 2020-06-15]. Dostupné z: https://www.richtek.com/?sc_lang=en
- [41] AE řada. *Apex Dynamics Czech - Precizní planetové převodovky* [online]. Otrokovice: Apex Dynamics, 2013 [cit. 2020-06-18]. Dostupné z: <https://www.apexdynaczech.cz/produkty/prima-planetova-prevodovka-ae/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

i_1	[-]	první rychlostní stupeň měřené převodovky
i_2	[-]	druhý rychlostní poměr měřené převodovky
i_{pl}	[-]	převodový poměr planetové převodovky
M_1	[N·m]	kroučící moment pomaloběžné větve při prvním převodovém stupni
M_2	[N·m]	kroučící moment pomaloběžné větve při druhém převodovém stupni
M_{max}	[N·m]	maximální zátěžný moment
M_p	[N·m]	maximální kroučící momentu pohonu
n_1	[min ⁻¹]	otáčky pomaloběžné větve při prvním převodovém stupni
n_2	[min ⁻¹]	otáčky pomaloběžné větve při druhém převodovém stupni
n_{max}	[min ⁻¹]	maximální otáčky rychloběžné větve
n_{Mmax}	[min ⁻¹]	otáčky při maximálním zátěžném momentu
n_{P1max}	[min ⁻¹]	otáčky pomaloběžné větve při I. převodovém stupni a max. otáčkách
n_{P2max}	[min ⁻¹]	otáčky pomaloběžné větve při II. převodovém stupni a max. otáčkách
P_{max}	[W]	maximální výkon ve smyčce
P_S	[W]	výkon ve smyčce
P_{ZC}	[W]	celkový ztrátový výkon
P_{ZP}	[W]	ztrátový výkon mimo smyčku
P_{ZS}	[W]	ztrátový výkon ve smyčce
η_d	[-]	účinnost ložiskového domku
η_k	[-]	účinnost homokinetického kloubu
η_p	[-]	účinnost použité převodovky
η_{rp}	[-]	účinnost rychloběžné převodovky
η_s	[-]	účinnost spojky
η_{st}	[-]	účinnost prodlužovacího stojanu
<i>AC</i>		Alternating current
<i>BEV</i>		Battery Electric Vehicle
<i>BMS</i>		Battery Management System
<i>DC</i>		Direct current
<i>DCM</i>		stejnoseměrný motor
<i>EMA</i>		Elektrický městský automobil
<i>EV</i>		Electric Vehicle
<i>FCEV</i>		Fuel Cell Electric Vehicle
<i>HEV</i>		Hybrid Electric Vehicle
<i>IGBT</i>		Insulated Gate Bipolar Transistor
<i>IM</i>		indukční motor
m	[-]	počet daných komponent

<i>MOSFET</i>	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
<i>NVH</i>	Noise Vibration and Harshness
<i>PMSM</i>	synchronní motor s permanentními magnety
<i>PSD</i>	Power Split Device
<i>SRM</i>	reluktanční motor
<i>ÚADI</i>	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
<i>ZEV</i>	Zero-Emission Vehicle mandate