



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A BIOMECHANIKY

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

VIBRACE A HLUK ELEKTROVOZIDEL

VIBRATION AND NOISE OF ELECTRIC VEHICLES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTORPRÁCE

AUTHOR

Josef Winter

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kamil Řehák, Ph.D.

BRNO 2020

Zadaní bakalářské práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: **Josef Winter**
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Mechatronika
Vedoucí práce: **Ing. Kamil Řehák, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

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:

Vibrace a hluk elektrovozidel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vibrace a hluk jsou dnes velmi aktuálním tématem, především z pohledu zvyšujícího komfortu vozidel obecně. Tato problematika se však mezi jednotlivými typy vozidel významně odlišuje. V případě elektromobilu je zásadní absence spalovacího motoru.

Cíle bakalářské práce:

Provést rešerši dostupné literatury.

Vytvořit přehled zdrojů hluku u elektromobilu.

Vytvořit přehled technických experimentů, které se používají při vývoji elektrovozidel.

Seznam doporučené literatury:

SMETANA, Ctirad. Hluk a vibrace: Měření a hodnocení. Praha: Sdělovací technika, 1998. ISBN 80-90 1936-2-5.

SANDÉN, Björn a Pontus WALLGREN. SYSTEMS PERSPECTIVES ON ELECTROMOBILITY. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2014. ISBN 978-91-980973-9-9.

EMADI, Ali. Advanced Electric Drive Vehicles. 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300: CRC Press, 2015. ISBN 13: 978-1-4665-9770-9.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou vibrací a hluku neboli Noise, Vibration and Harshness (NVH) u elektromobilů typu Battery Electric Vehicle (BEV), kde byla zaměřena především pozornost na pohonný systém těchto vozidel, neboť došlo k významné změně koncepce pohonného traktu vzhledem ke konvenčním automobilům. Cílem této práce je představit jednotlivé zdroje hluku či vibrací u BEV, a také některé experimenty, které s touto problematikou souvisí. Na závěr bylo provedeno měření a vyhodnocení výsledků u elektromobilu Hyundai Kona, který byl zapůjčen z Ústavu automobilního a dopravního inženýrství (ÚADI).

Klíčová slova

vibrace, hluk, NVH, elektromobil, BEV, elektromotor, převodové ústrojí, měřicí přístroje, akustické veličiny, zvukové komory, metodika měření

Abstract

This bachelor thesis deals with problematics with noises and vibrations else known as Noise, Vibration and Harshness (NVH) at electric vehicles type Battery Electric Vehicle. The attention is drawn to the powertrain system because the powertrain system was electrified. The goal of this thesis is to present sources of noise and vibrations and to show examples of experiments that are done on the vehicles to improve driving comfort of driver and passengers. In the end the measurement and analysis of noises and vibrations were done at electric vehicle by Hyundai from Institute of Automotive Engineering.

Klíčová slova

vibration, noise, NVH, electric vehicle, BEV, electric motor, transmission, measuring devices, acoustic parameters, acoustic chambers, methods of measuring

Bibliografická citace

WINTER, Josef. Vibrace a hluk u elektrovozidel. Brno, 2021. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky. 86 s. Vedoucí bakalářské 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 18. 5. 2021

.....

Josef Winter

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Kamilu Řehákovi, PhDr. za odborné vedení práce, za pomoc a rady při zpracování této práce. Dále bych rád poděkoval své rodině, která mě po celou dobu studia podporovala.

OBSAH

ÚVOD	9
1. ÚVOD DO ELEKTROMOBILŮ	10
1.1 Historie elektromobility	10
1.2 Základní rozdělení elektromobilů	12
2. AKUSTICKÉ VELIČINY, JEDNOTKY A PŘÍSTROJE	15
2.1 Akustický tlak	15
2.2 Akustický výkon	15
2.3 Akustická intenzita	16
2.4 Hladiny akustických veličin	17
2.5 Měřicí přístroje	17
2.5.1 Mikrofon	19
2.5.2 Akcelerometry	20
2.5.3 Intenzitní snímače	20
2.5.5 Akustická kamera	21
2.6 Transfer Path Analysis	21
3. ZVUKOVÉ KOMORY	23
3.1 Bezdozvuková komora	23
3.2 Dozvukové komory	24
3.3 Běžné měřicí místnosti	26
4. METODIKA MĚŘENÍ HLUKU	27
4.1 Charakteristika vzorového hluku	29
4.2 Měřicí pozice	29
4.3 Měřicí prostředí	30
4.4 Měření a analýza	30
4.5 Ověření výsledků	32
5. ZDROJE HLUKU A VIBRACÍ U VOZIDLA TYPU BEV	33
5.1 Pohonný systém u BEV	34
5.1.1 Elektronická řídicí jednotka	36
5.1.2 Elektromotor	37
5.1.3 Převodové ústrojí	39
5.1.4 Další zdroje hluku	42
5.2 Hluk a vibrace způsobené interakcí se silnicí	43
5.2.1 Pneumatiky	44
5.2.2 Brzdy	45
5.3 Hluk vzniklý při jízdě vozidla vlivem větru	46

5.4	Hluk způsobený vedlejšími systémy	48
6.	TECHNICKÉ EXPERIMENTY NA VOZIDLECH BEV	50
6.1	Aerodynamika	50
6.2	Analýza, měření a optimalizace pohonného systému.....	53
6.3	Měření hluku u pneumatik určených pro elektromobil	59
7.	EXPERIMENT MĚŘENÍ HLUKU A VIBRACÍ	61
7.1	Příprava měření	61
7.2	Analýza mikrofonů	65
7.3	Analýza akcelerometrů.....	69
ZÁVĚR	74
Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin		81

ÚVOD

Elektromobilita má v dnešní době mnoho příznivců i odpůrců. Jedná se o jednu z mnoha cest k udržitelnější budoucnosti s nízkým množstvím smogu v ovzduší, a i proto se stále ve větší míře stává elektromobilita součástí našeho běžného života.

Drtivá většina automobilů je dnes poháněna spalovacími motory, ať už se jedná o osobní nebo nákladní vozy. S postupným vývojem roste i množství vyprodukovaných automobilů. Neustálá produkce automobilů se spalovacím motorem má velmi negativní vliv na ekologický stav planety Země. Vlivem globálního oteplování byl tlak ze strany politiků a světových organizací tak velký, že vedl k rozvoji elektromobility, což se jeví jako jedno z řešení světové problematiky s emisemi. Hlavním znakem elektromobilů je absence spalovacího motoru a omezení jeho činnosti. Tím pádem byla změněna celá koncepce vozidel, kde došlo k elektrifikaci pohonného systému.

Elektrifikace pohonného systému nám umožňuje dosáhnout nižších emisí CO₂. Toto zahrnuje nové koncepty, které jsou ve své podstatě odlišné od automobilu se spalovacím motorem. Třebaže jsou elektromobily tišší než konvenční vozidla, vnitřní hluk je poznamenán vysokofrekvenčním hlukem vlivem využití výkonové elektroniky. Začleněním výkonové elektroniky, speciálně pulsně šířkové modulace například v invertoru, můžeme slyšet specifické zvukové efekty.

Tradiční zdroje hluku během jízdy řidiče vyvolanými prouděním vzduchu kolem vozidla, hluk související s kontaktem pneumatik s vozovkou a stejně také další komponenty jako například olejová pumpa, HVAC (Heating, ventilation, air – conditioning) nebo alternátor nejsou nadále hlukově potlačeny spalovacím motorem.

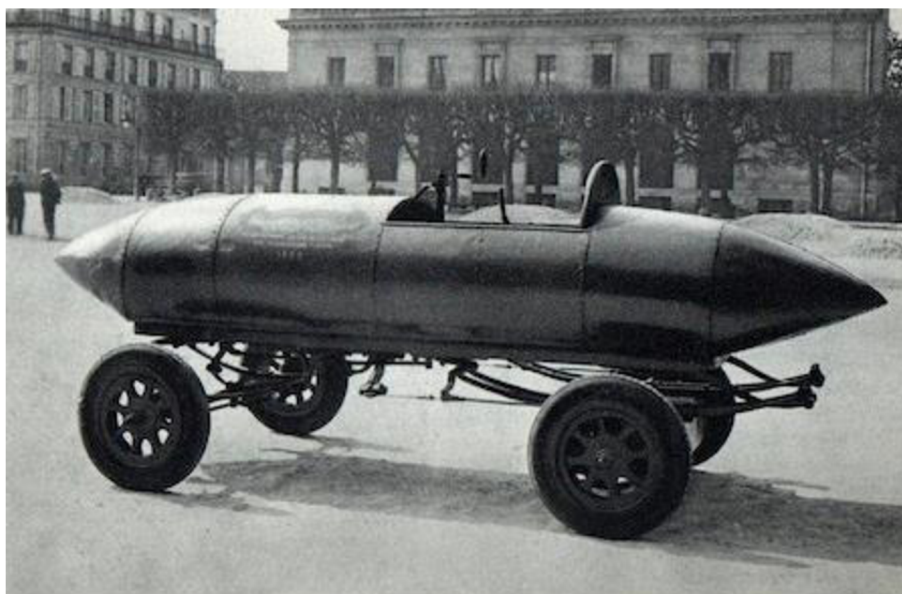
S řešením problémů týkajících se NVH souvisí řada experimentů za účelem analýzy, vyhodnocení a následné modifikace problému. Jedná se například o aerodynamiku vozidla či experimenty prováděné na elektrifikovaném pohonném systému.

1. ÚVOD DO ELEKTROMOBILŮ

1.1 Historie elektromobility

Počátek elektromobility lze datovat k roku 1821, kdy anglický chemik Michael Faraday sestrojil elektrický motor. Za první elektromobil lze považovat vůz z roku 1835, který sestrojil nizozemský profesor chemie a mechaniky Sibrand Stratingh. Tento vůz fungoval na jednorázové články, které bylo po použití nutné vyhodit. Roku 1859 vynalezl francouzský fyzik Gaston Planté olověný akumulátor a tímto vznikla v dnešní době známá autobaterie. O necelých 30 let později byla při vývoji zanechána i česká stopa, kdy František Křížík sestrojil vlastní hnaný kočár. Tento stroj obsahoval 42 olověných článků a motor vytvářel výkon o velikosti 3,6 kW.[1], [2]

V roce 1899 Belgičan Camille Jenatzy překonal, jako první na světě, rychlost 100 km/h. Vůz byl vybaven dvěma motory s výkonem 25 kW, který vážil téměř tunu viz. obr. 1. [1] Z počátku 20. století byl procentuální podíl elektromobilů 40 %. Velkým problémem byl nízký dojezd také s nízkou provozní rychlostí a v této době přinesl objev spalovacího motoru. [2]



Obr.1 Vůz Belgičana Camille Jenatzy [1]

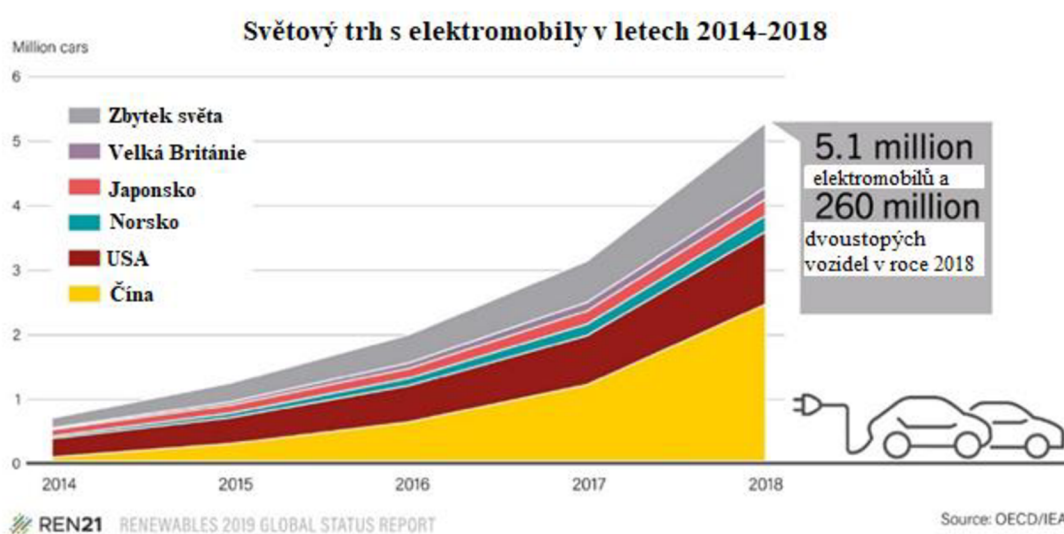
V roce 1908 se stal fenoménem Ford model T, který poskytoval vyšší dojezd, rychlost a dostupnost. [1] Díky dostupnému benzínu se na dlouhou dobu usadili automobily se spalovacím motorem. Do automobilu byl dodán startér, který dokázal roztočit motor tak, aby byl schopen dále pracovat díky své vlastní energii. Spalovací motory prošly výrazným vývojem např. uspořádání ventilových rozvodů, účinnost spalování nebo dostupností naftových variant.

Postupné řešení základních chyb spalovacích motorů a masový nárůst výroby vedl k motorizaci širšího počtu obyvatelstva. Elektromobily se bohužel na tomto rozvoji téměř nepodílely. Zájem o elektromobilitu se vrátil po ropné krizi v letech 1973 a 1979. [2] Později se přidaly dopady ze znečištění výfukovými zplodinami, což způsobilo průlom v návratu k elektromobilitě.

Dalším zlomovým bodem bylo přijetí zákona o vozidlech s nulovými emisemi nebo jinak řečeno ZEV (Zero Emission Vehicle) v roce 1990 v Kalifornii, který nařizuje prodejčům aut prodávat elektrická vozidla a kamiony. [2]

Globální trh s elektromobily dosáhl v roce 2018 nárůst oproti roku 2017 o 63 % viz. obr. 2. Téměř bylo prodáno 2 miliony nových vozů. Jako mocnost na globálním trhu s elektromobily lze označit Čínu, která má necelý 50-ti procentní podíl na trhu s elektromobily. S prodejem elektromobilů souvisí i stavba dobíjecích stanic, kdy jen za rok 2018 bylo postaveno 100 000 stanic. [3] K nejpoblárnějším automobilům patří Nissan Leaf, Tesla Model S, Fiat 500e, Chevrolet Bolt EV nebo Volkswagen e-Golf. [6]

Významnou společností v oblasti elektromobility je Tesla, která udává trend v oblasti elektromobilů. Významnými modely této značky jsou Model S, Model X, Model 3 a v poslední době novinka Cybertruck. V roce 2020 představila česká automobilka ŠKODA AUTO svůj první elektromobil s názvem Škoda Enyaq iV. Německá automobilka BMW má své modely i3 a i8. Automobilka Toyota se může chlubit značně využívaným modelem Toyota Prius. [4]



Obr.2 Vývoj prodeje elektromobilů v letech 2014-2018 [3]

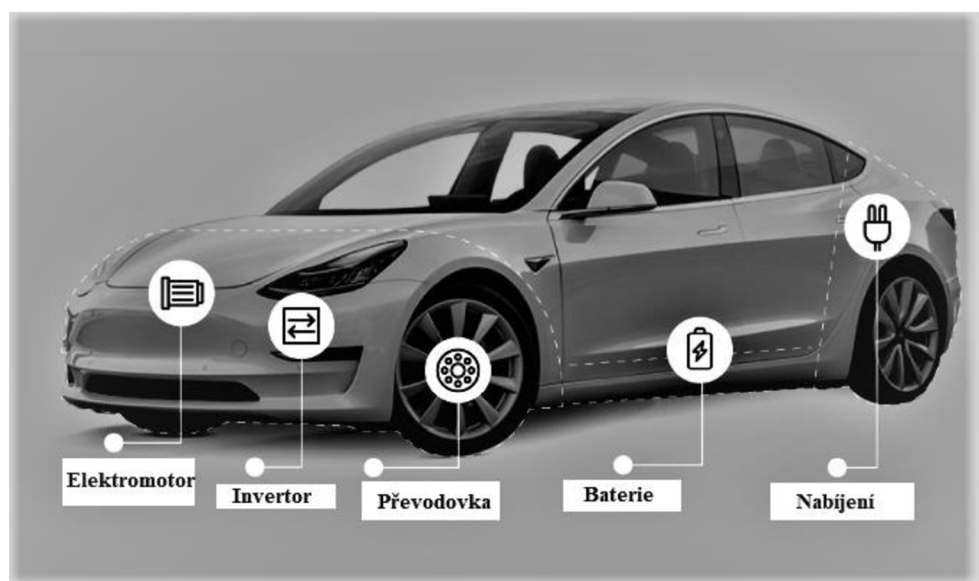
1.2 Základní rozdělení elektromobilů

Elektromobil je motorové vozidlo, které na rozdíl od automobilu se spalovacím motorem, využívá elektrický pohon. Pro akumulaci energie využívá tento typ vozidel ve většině případů bateriové články a energie je získávána z dobíjecích stanic nebo rekuperací. Existují ovšem jiné varianty jako vodíkové palivové články. [8] Základní součástí elektromobilu je elektrický točivý stroj, který slouží jako generátor nebo jako trakční motor. [5] Elektromobily můžeme dělit podle toho, jak a v jaké míře využívají elektrickou energii. Dělení elektromobilů na základní úrovni je následující: [7]

- BEV (Battery Electric Vehicles)
- HEV (Hybrid Electric Vehicles)
- FCEV (Full cell Electric Vehicle)

Vozidla typu BEV jsou poháněna elektromotorem a svou energii uchovávají v bateriových člancích. Tuto energii získávají z dobíjecích stanic. Mezi známé vozy patří Jaguar I-Pace s dojezdem až do 500 km nebo česká Škoda CITIGO. [7] Tento typ vozidla nás z pohledu této práce zajímá nejvíce. Hlavními komponenty BEV jsou viz. obr. 3: [5]

- Baterie
- Invertor
- Převodovka
- Elektromotor
- Nabíjení



Obr. 3 Podstatné komponenty u BEV [11]

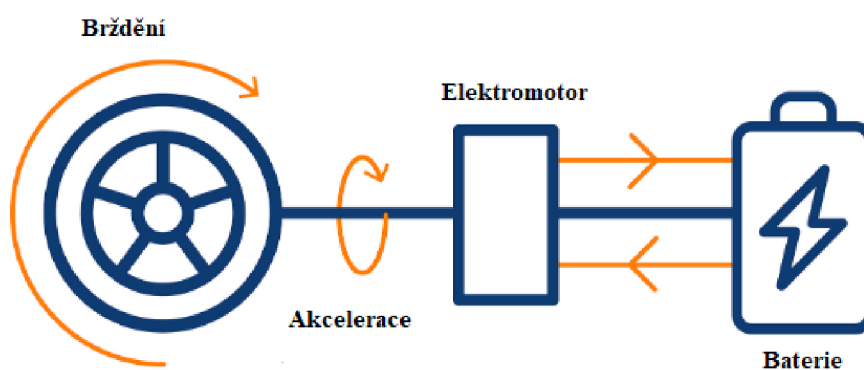
Elektromobil FCEV využívá vodíkový pohon. Jako u předchozího typu využívá elektromotor, ale liší se získáváním elektřiny. [5] Tu získá tak, že část trakční baterie je nahrazena nádrží na vodík a sestavou palivových článků, ve kterých se vodík pomocí chemické reakce přemění na elektřinu a vodní páru.

Hybridní elektromobily HEV můžeme dále dělit následovně: [5]

- Sériový hybrid
- Paralelní hybrid
- Kombinovaný hybrid
- Micro hybrid
- Plug-in hybrid

Paralelní hybrid je takový typ hybridu, kde je využit pouze jeden elektromotor umístěný v ose klikového hřídele se spalovacím motorem. [48] Tomuto typu vozidla se také říká mild-hybrid. Vůz je schopen vykonávat jízdu ve čtyřech režimech. Auto může být poháněno jak spalovacím motorem v kombinaci s elektromotorem, tak pouze samotným elektromotorem.

Vyskytuje se zde i režim rekuperace brzděné energie viz. obr. 4 a dobíjení akumulátoru samotným elektromotorem. Elektromotor tak vykonává roli pohonu i generátoru střídavého proudu. Aby bylo umožněno oddělení jízdních režimů od elektromotoru a spalovacího motoru, je zde využita třecí spojka. [48] Významným plusem tohoto typu vozidla je jeho servisní nenáročnost a dojezd na delší trasy.



Obr. 4 Princip rekuperace [11]

U sériového hybridu je využit spalovací motor jako generátor energie, který dobíjí baterii. Samotný pohon je zde zajištěn elektromotorem. [5] Sériový hybrid se ve většině případů využívá pro prodloužení dojezdu.

Kombinovaný hybrid je ze všech dříve zmíněných typů hybridů nejvyspělejší. Někdy je tento typ označován také jako strong případně full hybrid. Kombinací předchozích typů dosáhneme roztočení hnací nápravy buď elektromotorem nebo spalovacím motorem. [48] Vyskytují se zde dva elektromotory, které fungují coby jako motor-generátor a nebo jako hnací motor. Výhodou tohoto typu je výběr možných jízdních režimů.

Micro hybrid není ve své podstatě hybrid, neboť je omezen pouze na systém start/stop s možností rekuperace. [5] Spalovací motor je spouštěn reverzibilním alternátorem a ne startérem.

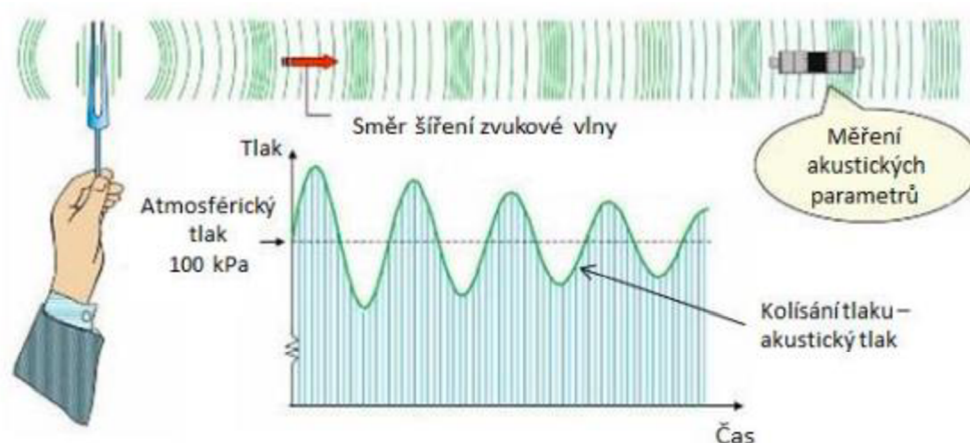
Plug-in hybrid může být kterýkoliv hybrid z předchozích typů s výjimkou micro hybridu. Hlavní odlišností je možnost dobíjení trakčního akumulátoru ze sítě. Umožňují tedy schopnost delšího dojezdu než klasické hybridy. Tyto hybridy využívají jako akumulátor lithium-iontové baterie. Jako nevýhoda může být zde považována nízká účinnost rekuperace energie v závislosti na dobíjení ze zásuvky. [48]

2. AKUSTICKÉ VELIČINY, JEDNOTKY A PŘÍSTROJE

2.1 Akustický tlak

Akustický tlak je označení změny tlaku způsobené kmitáním částic. Nejnižší akustický tlak, který je možné slyšet, se pohybuje okolo 20 μPa . [39]

Akustický tlak p [Pa] chápeme jako odchylku celkového tlaku od tlaku v klidném stavu při vlnění ve vyšetřovaném prostředí znázorněné na obr. 5. Akustický tlak je poté položen barometrickému tlaku p_b . [15]



Obr.5 Průběh akustického tlaku [15]

Velikost akustického tlaku závisí na několika faktorech, zejména na vzdálenosti od zdroje hluku, orientaci příjemce, teplotním a rychlostním gradientu prostředí a na dalších faktorech. Z této veličiny se dopočítává akustický výkon P [W]. [14]

2.2 Akustický výkon

Akustický výkon P [W] je množství akustické energie, která projde myšlenou plochou za jednotku času. [15]

Akustický výkon lze definovat vztahem:

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v} = F \cdot v = p \cdot v \cdot S, \quad (1)$$

kde: p [Pa] – akustický tlak, v [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] – rychlost kmitajících částic, S [m^2] – plocha

2.3 Akustická intenzita

Akustická intenzita I [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$] je vektorová veličina určující směr na množství toku akustické energie v daném místě prostředí. [24] Vektor je časově průměrovaný součin okamžitého tlaku, který odpovídá okamžité rychlosti kmitajících částic v daném místě. [39]

$$I = \overline{p(t) \cdot v(t)} \quad (2)$$

Akustická intenzita vzhledem k tomu, že se jedná o vektorovou veličinu, nám umožňuje určit směr šíření akustického vlnění, což je výhoda oproti akustickému tlaku, který je skalár. V technické praxi se z pravidla měří pouze akustický tlak a ne akustická rychlost. [24] Můžeme tedy využít poměru mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí. Zavádí se tedy měrný vlnový odpor známý jako impedance Z [Ns/m^3] podle vztahu: [15], [38]

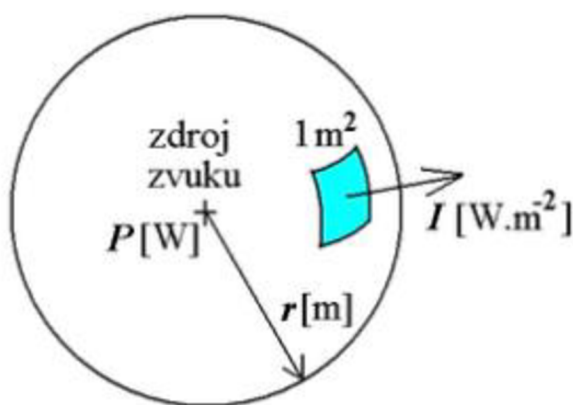
$$Z = \rho \cdot c = \frac{p}{v}, \quad (3)$$

kde c je rychlost zvuku.

Můžeme též uvažovat zdroje jako body v případě malých rozměrů v porovnání s jejich vzdáleností od příjemce. U bodového zdroje se akustická energie šíří rovnoměrně do všech směrů viz. obr. 6. Výstupní výkon zdroje prochází sférickou plochou poloměru r . [39]

Intenzita této plochy je

$$I = \frac{P}{4\pi \cdot r^2} \quad (4)$$



Obr. 6 Šíření zvuku od bodového zdroje [57]

2.4 Hladiny akustických veličin

Každý člověk vnímá akustický tlak ve velice širokém spektru hodnot. Akustický tlak prahu slyšitelnosti se pohybuje okolo hodnoty $2 \cdot 10^{-5}$ Pa a tuto hodnotu bereme jako referenční. Hodnota, kdy už začínáme cítit bolest, je 100 Pa. [39]

Lidské ucho nereaguje na zvukový podnět lineárně, ale vnímání je úměrné logaritmu tohoto podnětu a proto byla zavedena tzv. logaritmická měřítka. Tyto vyjádření nazýváme *hladiny akustických veličin*, které můžeme definovat vztahem [39]

$$L = \log \frac{A}{A_0} = \frac{\text{hodnota porovnávané veličiny}}{\text{hodnota referenční}} \quad (5)$$

Jednotkou je **bel**, ale v praxi se využívají **decibely** [dB].

- Hladina akustického výkonu L_W [39]

$$L_W = 10 \cdot \log \frac{W}{W_0}, \quad (6)$$

kde W je hodnocený akustický výkon a $W_0 = 10^{-12}$ W je referenční výkon.

- Hladina akustické intenzity L_I [39]

$$L_I = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}, \quad (7)$$

Kde I je měřená akustická intenzita a $I_0 = 10^{-12}$ W/m² je referenční výkon.

- Hladina akustického tlaku L_P [39]

$$L_P = 10 \cdot \log \frac{p^2}{p_0^2}, \quad (8)$$

kde p je akustický tlak a $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ je referenční hodnota akustického tlaku.

2.5 Měřicí přístroje

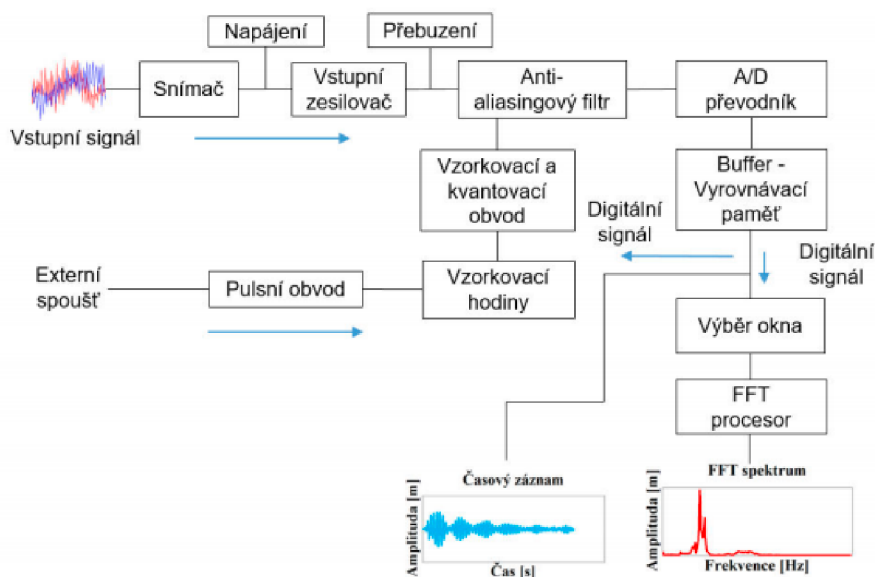
Soustavu prvků potřebných pro měření hluku a vibrací nazýváme tzv. měřicí řetězec, který je znázorněn na obr. 7. Základním stavebním kamenem celé soustavy je snímač se zesilovačem. Snímač udává kvalitu získaného souboru naměřených dat. Následující komponenty řetězce poté pouze korigují nasnímaná data. Mezi tyto prvky patří filtry, analyzátory, obvody upravující dynamické vlastnosti a usměrňovače. [14] Snímače jsou schopné měnit svou funkci podle závislosti na změně vnějších podmínek za pomoci kalibrátorů. Je nutné provádět kalibraci před zahájením měření a pro dosažení výsledků i po a během měření.

Základní typy snímačů jsou akcelerometry a mikrofony. Mikrofon je snímač pro akustický tlak zvuku a akcelerometry snímají vibrace. Důraz je kladen na upevnění akcelerometru, kde se vyžaduje velký dynamický rozsah, široký kmitočtový rozsah, minimální zkreslení výstupního signálu, minimalizace účinků rušivých vlivů a stabilita v čase. [14]

V závislosti na charakteristice, kterou měříme, se následně používají příslušná měřicí zařízení. Pro jednoduchý sinusový signál by pouze stačil jednoduchý měřicí řetězec složený ze zesilovače, mikrofonu a měřícího přístroje. Pro složitější měření se přidávají do obvodu měniče, vstupy a výstupy externích filtrů. Tento řetězec nazýváme zvukoměr. [32]

Dalším důležitým zařízením jsou vibrometry, které měří vibrace. Klasické vibrometry potřebují kontakt snímače s vibrujícím povrchem, což může nepříznivě ovlivnit měření. [32] V praxi se také využívá analyzátorů, které mají výhodu v porovnání s vibrometry a zvukoměry umožňují i frekvenční analýzu.

Pro měření akustické intenzity a lokalizaci zdroje hluku se využívá akustická (intenzitní) sonda. V závislosti na velikosti objektu je možné sestavit síť měřených bodů, kde rozteč daných bodů se volí právě v závislosti na měřeném objektu a jeho velikosti. [32] V každém bodě se poté měří akustická intenzita. Akustickou rychlost lze vyšetřit z rozdílu akustických tlaků mezi dvěma mikrofony. Na výsledném intenzitním obrazu, který je v rovině definované měřící sítí, poté lze určit zdroj hluku. Chceme-li přesněji určit zdroj hluku, je možné využít akustickou kameru, jež využívá mikrofonní pole.



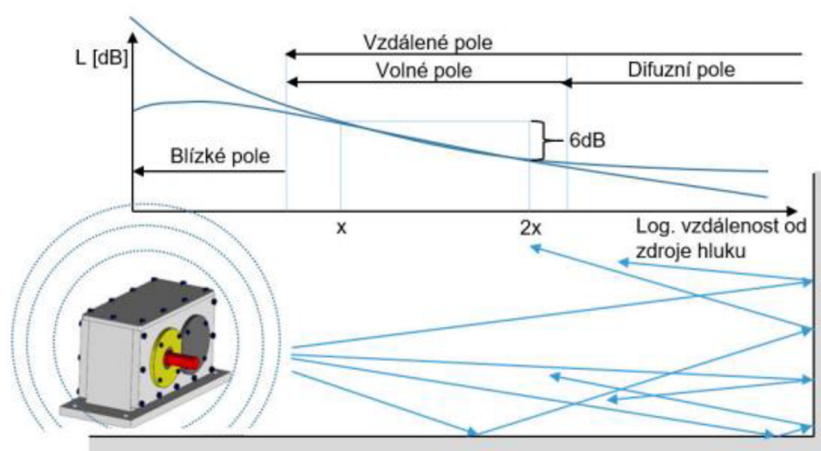
Obr. 7 Měřicí řetězec [32]

2.5.1 Mikrofon

Jedná se o akusticko-mechanicko-elektrický měnič, který snímá kmitání a následně jej převádí na elektrický signál. V dnešní době se využívají reciproké měniče např. dynamický, elektrostatičtý nebo piezoelektrický. [14] K přesnějšímu měření jsou využívány výhradně kondenzátorové mikrofony. Kondenzátorový mikrofon pracuje tak, že kmity rozechvívají membránu, která je jednou z elektrod kondenzátoru. Změnou polohy membrány se mění kapacita kondenzátoru. Právě tato změna je následně přeměna na elektrický signál. [14]

Je využíván z důvodu lehce dosažitelné kmitočtové charakteristiky ve slyšitelném rozsahu, malé hmotnosti a rozměru. Citlivost mikrofonní vložky je přímo úměrná velikosti polarizačního napětí a je stálá, neboť se po dlouhé době změní pouze o 0,2 dB. Pro citlivost byla zavedena veličina korekční faktor [dB] vztažená k „normované“ citlivosti, která je 50 mV/Pa. [14] Citlivost mikrofonu je ovlivňována vnějšími vlivy jako například tlak, teplota, vlhkost vzduchu nebo proud vzduchu kolem mikrofonu. Pokud se zvyšuje atmosférický tlak, citlivost klesá. Na citlivosti se neprojeví vliv teploty ani vlhkost pokud nebude překročen rosný bod.

Rozdělení mikrofonů bylo provedeno z hlediska užití ve volném, difúzním a tlakovém poli viz. obr. 8. Blízke pole je takové pole, kde pozorujeme významnou změnu akustického tlaku nebo intenzity vzhledem k malé vzdálenosti od zdroje, neboť směr rychlosti kmitání částic není shodný se směrem šíření

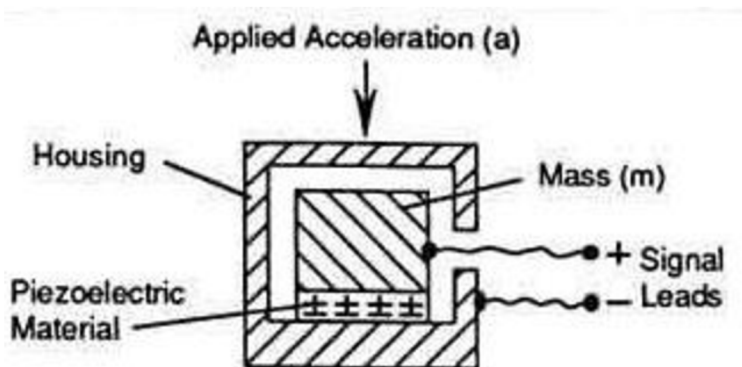


Obr. 8 Rozdělení akustických polí [32]

akustických vln. [32] Hraniční vzdálenost pro blízke pole je $\frac{1}{4}$ vlnové délky. U volného pole je předpoklad šíření vln v přímých vlnoplochách a platí zde, že pokud zdvojnásobíme vzdálenost od zdroje, poklesne měřená hladina akustické intenzity nebo tlaku o 6 dB. [32] V difúzním poli dochází k interferenci přímých a odražených vln, protože dochází k rovnoměrnému rozložení akustického tlaku a intenzita se nemění s místem příjemce. [32]

2.5.2 Akcelerometry

Akcelerometry se využívají pro měření dynamického zrychlení v důsledku otřesů, pohybu, úderu nebo vibrací s nízkým kmitočtem a samozřejmě s malou amplitudou. Zařízení se přidělá přímo na objekt, který vibruje, což dovoluje přetvořit energii chvění na elektrický signál. [16] V jednoduchosti se jedná o převodník zrychlení, který měří svůj



Obr.9 Jednoduché blokové schéma principu akcelerometru [17]

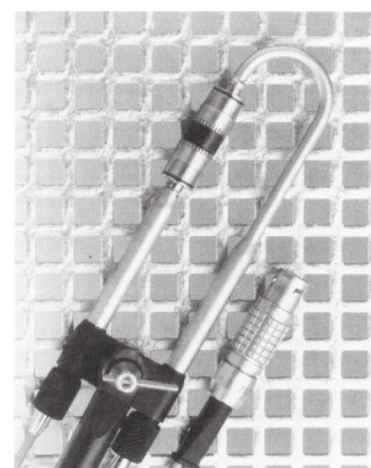
vlastní pohyb ve 3D prostoru. Existují tři druhy akcelerometrů a to kapacitní, piezorezistivní a piezoelektrický. [17] V našem případě nás nejvíce zajímá posledně zmíněný piezoelektrický, který slouží k měření vibrací.

Funkce je podobná fungování piezorestivních akcelerometrů, kde princip připomíná funkci tenzometru. Tyto akcelerometry tohoto typu jsou vybaveny materiálem, který působením vnější síly deformuje, čímž se v okamžiku změní odpor. [16] Změna odporu se dále převádí na elektrický signál viz. obr. 9. U piezoelektrický vlivem zrychlení se nemění odpor, ale vytváří elektrické napětí dané hodnoty. Výstupní signál se obvykle zesiluje a teplotně kompenzuje. Pohyb objektu je zjednodušen přenosem signálu na vstup integrátoru.

2.5.3 Intenzitní snímače

Sonda intenzity viz. obr. 10 je dvoukanálová sonda, která umožňuje snadné měření akustické intenzity. Měření je založeno na použití dvojice mikrofonů. Akustická intenzita je vektor, ze kterého dostaneme informaci o směru toku energie. [14] Akustická intenzita je podkladem pro výpočet akustického výkonu, který je definován jako součin intenzity a měřené plochy. Sondu můžeme využít pro snadnou lokalizaci zdroje hluku.

Kalibrace těchto snímačů musí být u obou mikrofonů současná. Jsou využívány speciální komůrky, které se nasazují na intenzitní sodnu. [18]



Obr. 10 Intenzitní snímač [16]

2.5.4 Zvukoměry

Jedná se o zařízení viz. obr. 11, které reaguje na zvuk a umožňuje měření hladin hluku. Obsahují mikrofon, ústrojí, které zpracovává signál, a indikační zařízení. [14] K parametrům zvukoměru patří dynamický a frekvenční rozsah, počet a druh frekvenčních analýz, počet měřicích kanálů, forma výstupu měřených dat a možnost připojit snímače vibrací nebo intenzitní sondy. [19]



Obr. 11 Zvukoměr [20]

2.5.5 Akustická kamera

Jde o zařízení osazené vizuální kamerou a několika akustickými senzory viz. obr. 12, které umožňuje vizualizaci intenzity akustického signálu do obrazu, který je podložen vizuálním snímkem. [45] Snímek nám poskytuje přesnou lokaci zdroje akustického signálu. Při manipulaci s akustickou kamerou je nutná přibližná vzdálenost. Systém dokáže v reálném čase zaznamenat a zanalyzovat rychlé akustické děje, včetně impulsních dějů. [44]

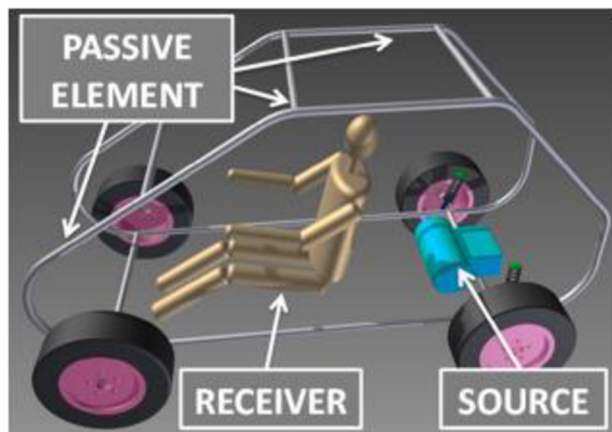


Obr. 12 Akustická kamera [44]

2.6 Transfer Path Analysis

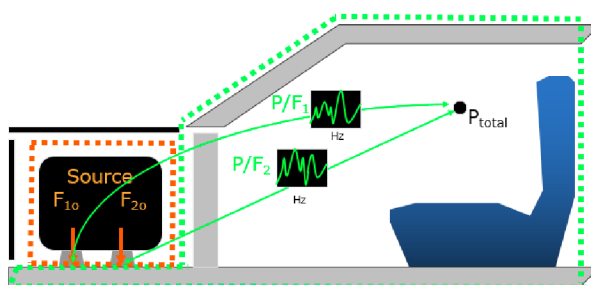
Metoda Transfer Path Analysis (TPA) byla vyvinuta v 80. letech 20. století jako nástroj pro řešení problémů souvisejících s NVH. Tato metoda má za hlavní cíl snížit hluk a zlepšit komfort kvality jízdy z pohledu řidiče v kabině. [21]

Transfer Path Analysis může být prováděna simulací nebo přímým testováním. Umožňuje nám trasovat tok akustické energie od zdroje (source) přes řadu elementů (passive element) až ke zdroji, který je hlukem ovlivněn (receiver) viz. obr. 13. [21] Jedná se o tzv. source-path-receiver systém.



Obr. 13 Source-path-receiver systém [46]

$$P_{\text{total}} = \underbrace{\left(\frac{P}{F_1} * F_{10} \right)}_{P_1} + \underbrace{\left(\frac{P}{F_2} * F_{20} \right)}_{P_2}$$



Obr. 14 Výpočet celkového akustického tlaku [21]

V metodě TPA jsou identifikovány síly (operational force = OF) ze zdroje a také přenosové funkce (transfer function = TF) mezi hlavním cílovým subjektem. Tyto síly a přenosové funkce jsou závislé na frekvenci. [21] Na obr. 14 lze vidět výpočet předpokládaného celkového akustického tlaku P_{total} ve vyšetřovaném místě v tomto případě kabině vozidla. Každá cesta přispívá svou měrou na celkovém akustickém tlaku v kabině. [32] Podle toho, která cesta více přispívá k akustickému hluku, porovnáváme jednotlivé příspěvky mezi sebou ($P_1 \leq P_2, P_1 \geq P_2$).

Podle vzniku hluku dělíme cesty na: [21]

- Airborne – hluk přenášený vzduchem ze zdroje
- Structureborne – hluk je přenášen přes strukturu vozidla

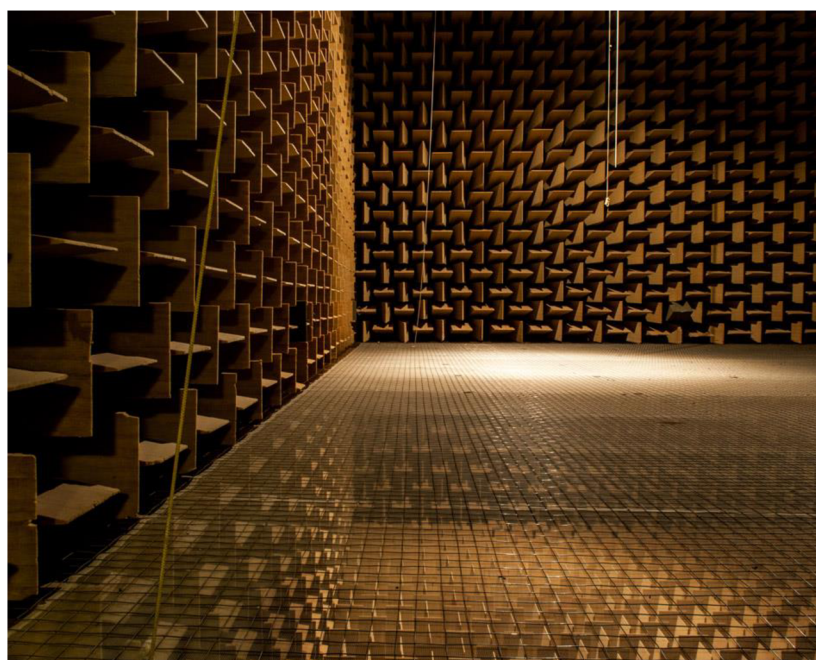
3. ZVUKOVÉ KOMORY

S určováním vibrací a hluku u elektromobilu souvisí celá řada experimentů od určování hladiny akustického tlaku až po analýzy signálů. Je jen na uživateli jaký přístup zvolí podle úrovně náročnosti řešeného problému. Pro účely akustických měření je nutné definovat vlastnosti zvukového pole. Nejčastější volbou se stávají uměle vytvořené komory.

3.1 Bezdozvuková komora

Bezdozvuková komora je pojmenována po dozvuku, což je doba od vypnutí zdroje zvuku do úplné ztráty trvání zvuku v místnosti. [39] Jedná se o čas, za který se hladina akustického tlaku v uzavřeném prostoru sníží po vypnutí zdroje zvuku o 60 dB. V této komoře dochází k nejpřesnějším výsledkům.

Bezdozvuková komora je místnost viz. obr. 15, ve které je absorbováno veškeré mechanické vlnění, které dopadá na stěny místnosti. V této komoře je umístěn zdroj zvuku, který produkuje zvukové pole. [41] Toto pole odpovídá volnému zvukovému poli, které vzniká ve vzdálenosti větší než $\frac{1}{4}$ vlnové délky od zdroje zvuku. Oblast menší $\frac{1}{4}$ vlnové délky, kde se nachází tzv. Fresnelovo pole, emituje prudkou změnu akustického tlaku. [40] Celá místnost tj. stěny, strop a podlaha jsou pokryty absorpčním materiálem, který vylučuje odraz zvukových vln.



Obr. 15 Bezdozvuková komora na DTU v Dánsku [42]

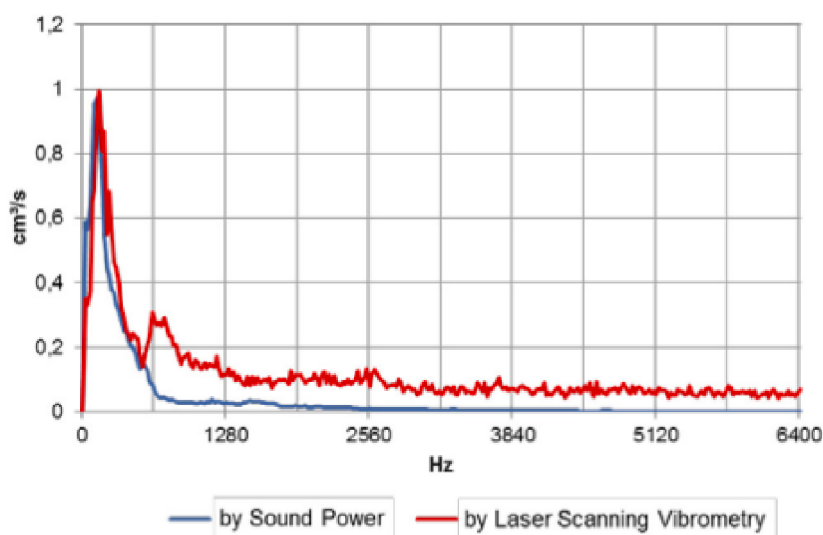
Tuto bezdozvukovou komoru lze nalézt například na německé univerzitě v Karlsruhe (Karlsruhe Institute of Technology) nebo ve Stuttgartu (Universität Stuttgart). Byl zde proveden experiment na měření hluku v interiéru vozidla typu BEV viz. obr. 16. Experiment se skládal ze dvou metod. Bylo vycházeno ze zdroje [58].



Obr. 16 Zkušební vozidlo [58]

První metoda byla využití zařízení, které obsahuje 12 reproduktorů tzv. dodecahedral speaker. Naměřené hodnoty poté byly převedeny na akustický výkon.

Ve druhé metodě se jednalo o využití metody Laser – Scanning Vibrometry. U obou metod bylo dosaženo podobných výsledků do pásma okolo 600 Hz. Pro vyšší hodnoty frekvencí se výsledky liší, což lze vidět na obr. 17, který ukazuje závislost objemového průtoku (volume velocity) na frekvenci.



Obr. 17 Porovnání výsledků z měření pomocí dvou metod [58]

3.2 Dozvukové komory

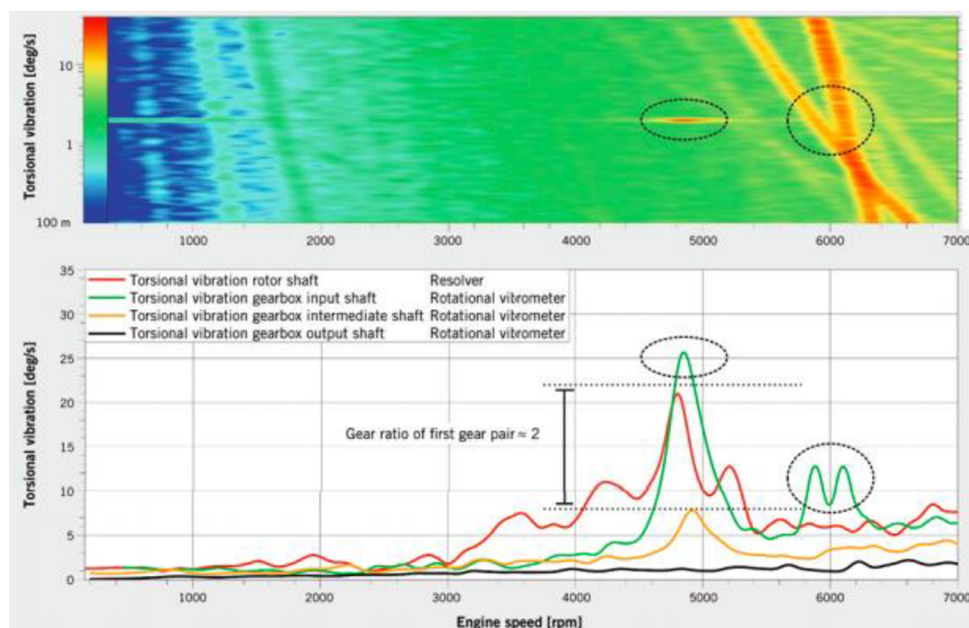
Jsou úplným protikladem bezdozvukových komor, neboť jejich prostory jsou s hladkou či tvrdou povrchovou úpravou viz. obr. 18, aby byla zajištěna dobrá odrazivost v širokém frekvenčním rozsahu. Zvukové pole v těchto komorách je difúzní a hlavní charakteristikou je rovnoměrné rozložení zvukové energie ve všech místech akustického pole. [41]

Převážně se v těchto komorách provádí měření akustického výkonu a měření zvukové pohltivosti. [41] Hlavními výhodami této komory jsou použití jednoho mikrofону, měření akustického výkonu a měření tichých zdrojů. Na druhé straně ztrácíme informaci o směru šíření hluku.



Obr. 18 Dozvuková komora v Drážďanech [43]

Dozvuková komora byla využita například u měření akustiky u pohonného systému na univerzitě v Karlsruhe (Institute of Product Engineering at the Karlsruhe Institute of Technology) ve spolupráci s Daimler AG. [59] Převodový systém se skládal ze synchronního stroje s permanentním magnetem a jednostupňovou převodovkou. Hlavním cílem bylo měřit rychlost v oblasti 50 km/h, neboť při této rychlosti je hluk slyšitelný a zároveň není eliminován hlukem pod hodnotu 2000 Hz způsobeným obtékáním vzduchu (Wind Noise) a při kontaktu s vozovkou (Road Noise). Výsledky viz. obr. 19 ukázaly, že nejkritičtější z hlediska hluku, jsou otáčky motoru v rozsahu 5000 – 6000 otáček za minutu.



Obr. 19 Výsledky měření [59]

3.3 Běžné měřicí místnosti

Většina měření se provádí v místnostech, které nejsou ani dozvukové ani bezdozvukové, ale z hlediska akustických parametrů se nacházejí uprostřed mezi oběma komorami. V takovýchto místnostech je obtížné určit měřicí místo v případě, kdy je nutné měřit zvuk, který je vyzařován daným zdrojem. [41] Při měření a hodnocení hluku či vibrací je nutné dbát na vyloučení a omezení co největšího počtu možných metodických chyb. Hladiny měřené v příliš malé vzdálenosti od zdroje zvuku či hluku, se mohou výrazně lišit i při malých změnách polohy mikrofonu zvukoměrného zařízení. [41] V praxi při měření akustického tlaku se nedoporučuje měření v blízkém zvukovém poli zdrojů zvuku a hluku.

Měření ve velké vzdálenosti od zdroje také nevylučuje metodické chyby. Příčinami mohou být odrazy zvukových vln. Tato část tzv. vzdáleného pole se nazývá polem dozvukovým. Mezi blízkým a dozvukovým polem se nachází pole volné. Většina měření by měla být prováděna právě v tomto poli. Malé rozměry místnosti mohou znamenat nedosažení této oblasti a je nutné zavést opravy, které podléhají prostoru a přítomnosti odražených vln. [41]

4. METODIKA MĚŘENÍ HLUKU

Následující kapitoly jsou podle zdroje [47]. První krok k jakémukoliv řešení problémů je proces, který můžeme označit jako analýza situace neboli *Situation Analysis*. Je důležité rušivý hluk dobře popsat a charakterizovat za účelem stanovení konkrétních závěrů. Existují čtyři hlediska, která musí být popsána:

- Charakter hluku
- Provozní parametry
- Vliv prostředí
- Lokalizace subjektu

Charakter hluku obsahuje velké množství informací o svém původu. Charakterizace zvuku je ze své podstaty subjektivní, zatímco provozní a environmentální parametry jsou čistě objektivní, měřitelné hodnoty.

Charakter hluku

Charakter hluku lze popsat pomocí jednoduchých subjektivních termínů. To je zejména užitečné pro inženýry nebo testovací řidiče, kteří nejsou dostatečně seznámeni s NVH či psychoakustickými pojmy jako je např. tonalita, ostrost nebo modulace. Charakterizace hluku je obzvláště snadná při použití protikladných pojmů jako vysoká/nízká, temné/jasné nebo měkké/hrubé. Na základě různých metrických specifikací byl stanoven následující výběr:

- Základní vlastnosti (Basic Properties)
 - Sluchové/haptické
 - Lokalizace frekvence
 - Rozsah frekvence
 - Směr šíření
 - Doba trvání
 - Tonalita
 - Definice
 - Impulzivnost

- Srovnávací vlastnosti
 - Bzučení
 - Rachot
 - Pískání
 - Kvílení
 - Chrastění
 - Syčení
 - Drhnutí
 - Klapání

Provozní parametry

Provozní parametry zahrnují všechny parametry, které popisují aktuální stav systému jako je například rychlost, zatížení, počet cyklů, teplota nebo působící tekutiny. Pokud se jev vyskytuje v dynamické situaci, je důležité také popsat gradient výše zmíněných parametrů např. pokud se rychlost zvyšuje či teplota stoupá či klesá. Z tohoto důvodu se doporučuje brát parametry jako stacionární. Proto by měření mělo probíhat při stabilní provozní teplotě. V závislosti na situaci může být důležité vyloučit předpoklady, za kterých ke vzniku hluku nedojde.

Vliv prostředí

Parametry prostředí zahrnují všechny parametry, které popisují prostředí, ve kterém se zkouška provádí, jako je například teplota, vlhkost či rychlost větru. Na jedné straně mohou tyto faktory být příčinou jevů souvisejících s NVH, ale na druhé straně jsou velkým faktorem nejistot a odchylek a měření. Tyto faktory mohou působit jako maskovací efekt, který odvádí pozornost řidiče od jiných rušivých elementů. Tyto nejistoty lze eliminovat pomocí měřicího válce v dozvukové komoře, kde lze většinu environmentálních parametrů brát jako stacionární.

Je také důležité zdokumentovat faktory, které mohou ovlivnit vnímání hluku. Například otevřené okno, zapnutá klimatizace nebo protihlukové stěny. Toto je zejména důležité při výběru měřicích poloh.

Lokalizace subjektu

V mnoha případech je řidič schopen zhruba lokalizovat zdroj hluku, alespoň směr, ze kterého přichází. Toto vždy pomůže pro urychlení celého procesu identifikace.

4.1 Charakteristika vzorového hluku

V případě BEV byl hluk popsán zkušebním jezdce jako hvízdající hluk, který je vysoký a stoupající vzhledem k frekvenci. Zvýšení tónu bylo popsáno jako úměrné rychlosti vozidla, ke kterému došlo během středního až vysokého zrychlení a také během rekuperace. Charakter hluku ukazuje, že hlavní příčina hluku se nachází v pohonném systému. Hluk se vyskytoval u vozidla při rychlosti od 24 – 28 km/h a lze jej vnímat s otevřeným i zavřeným okénkem. Při uzavření oken došlo k výraznému snížení hluku, který ale náročný řidič bude stále vnímat. Tento hluk se objevoval při různých testech s teplotou prostředí mezi 5 °C až 25 °C.

Zpočátku nemáme žádnou informaci o tomto jevu s výjimkou skutečnosti, že byl tento hluk posouzen pouze subjektivně. Prvním krokem je tedy měření akustického tlaku u ucha řidiče.

Z analýzy provozních a environmentálních parametrů jsou příslušné případy, ve kterých dochází k hluku, zřejmé. Díky této informaci mohou být jednotlivá měření odečtena. V použitém příkladu dochází k šumu spíše v nízkých rychlostech od 24 do 28 km/h, což je většinou ve městech nebo obytných oblastech.

Vzhledem k tomu, že se hluk projeví během zrychlení vozidla a jeho tón souvisí s rychlostí vozidla, přiměřené měření by byla rychlostní rampa s konstantním točivým momentem. Pro srovnání a pro první odhad při přenosu vzduchem se doporučuje měřit s otevřenými a zavřenými okny.

4.2 Měřicí pozice

V závislosti na povaze problému, haptickém či akustickém, lze měřit pomocí již zmíněných akcelerometrů a mikrofónů. Je doporučeno zachytit co nejvíce provozních a environmentálních parametrů během měření, aby se snížila závislost na subjektivních popisech. Pokud je hluk závislý na určitém parametru, jako je rychlost vozidla, je dobré měřit referenční hodnotu, v tomto případě otáčky motoru.

Pokud jde o akustické chování vozidla, vhodnými pozicemi by bylo sedadlo řidiče, sedadla pro cestující a pozice vy výšce ucha řidiče. Vzhledem k tomu, že se hluk vyskytuje při 24 km/h, by bylo dobré předpokládat, že by typická pozice byla na chodníku. Dalším místem byla místo řidiče ve výšce ucha. Hodnoty vzdáleností tedy jsou 1, 70 m ve výšce uší a 1 m od vozidla. Nastavení měření lze vidět na obr. 20.



Obr. 20 Sestava pro měření v bezdovukové komoře [47]

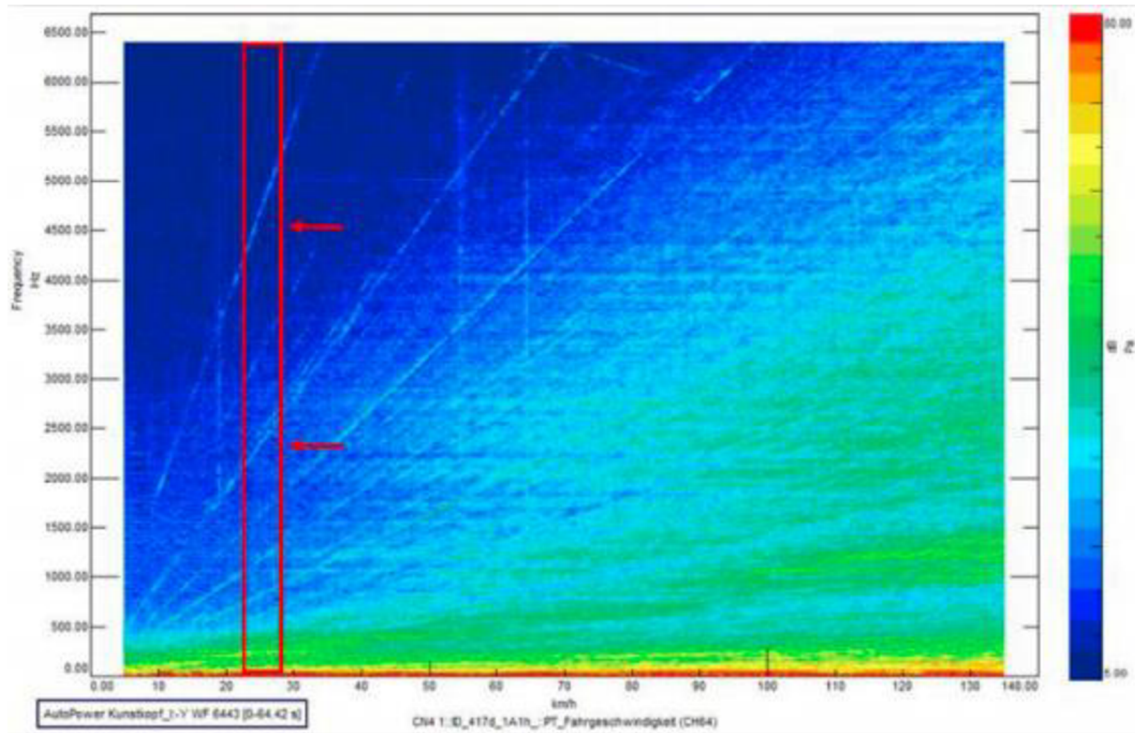
4.3 Měřicí prostředí

Jak už bylo zmíněno výše, je doporučeno provádět měření na zkušebním válci, který je umístěn v polo-bezdozvukové komoře. Pokud je měření hluku prováděno na zkušebním válci, není nutné věnovat pozornost silnici a provozu a lze se pouze soustředit na hluk.

Dalším důležitým faktorem je, že zkušební válce jsou schopny oddělit vztah mezi točivým momentem a rychlostí. To znamená, že lze použít vysoký točivý moment, ale rychlost vozidla je konstantní, nebo také že otáčky mohou sledovat specifický profil nezávislý na točivém momentu. Zejména pro jevy s vysokým zatížením může být obtížné najít zkušební dráhu, která umožňuje jet podle konkrétních manévřů. Měření bylo prováděno na zkušebním válci na IPEK v Karlsruhe.

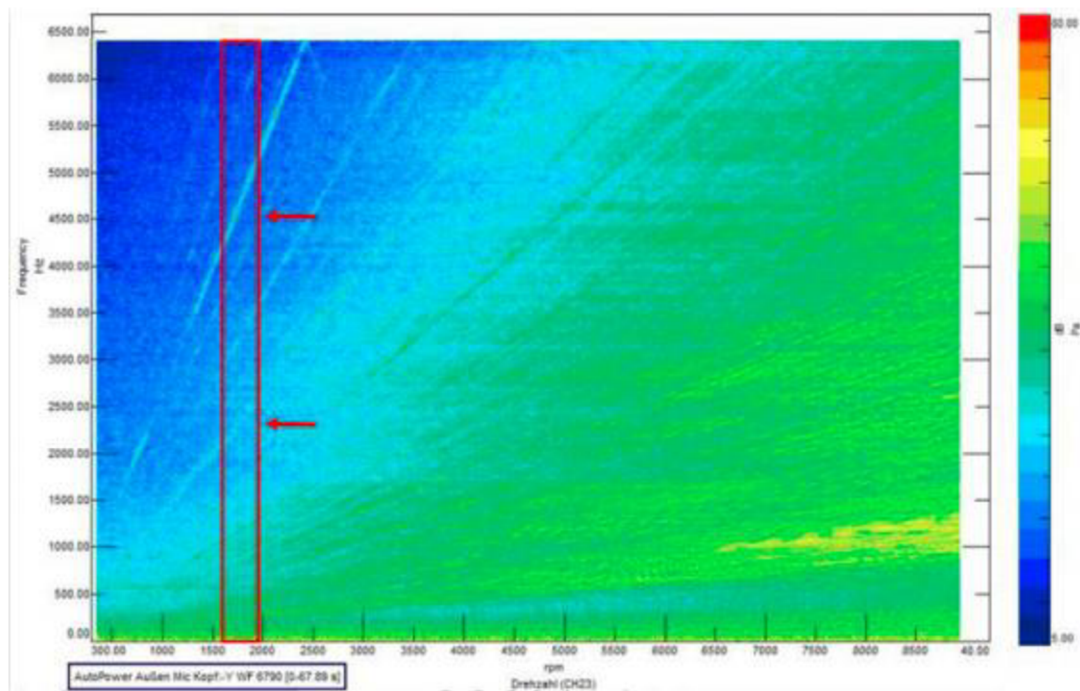
4.4 Měření a analýza

Když jsou definovány všechny parametry a polohy senzorů, může se přejít k měření hluku. Druh analýzy závisí na charakteru hluku. Pro první analýzu a identifikaci účinku při měření obvykle postačí Fourierova transformace závislá na čase a rychlosti. Je-li k dispozici Fourierova transformace v reálném čase, vzájemný vztah vnímaného hluku a špiček hluku ve Fourierově transformaci lze snadno dokázat během zkušebního provozu.



Obr. 21 Měřeno ze strany jezdce [47]

Pokud to není možné, je dobré, aby měl řidič nějaký druh spouštěče k záznamu jednotlivých momentů, kdy si povšimne hluku. Na obr. 21 a obr. 22 je vyznačen rozsah rychlosti, ve kterém se hluk projevuje.



Obr. 22 Měřeno ve vzdálenosti 1 m od vozu [47]

4.5 Ověření výsledků

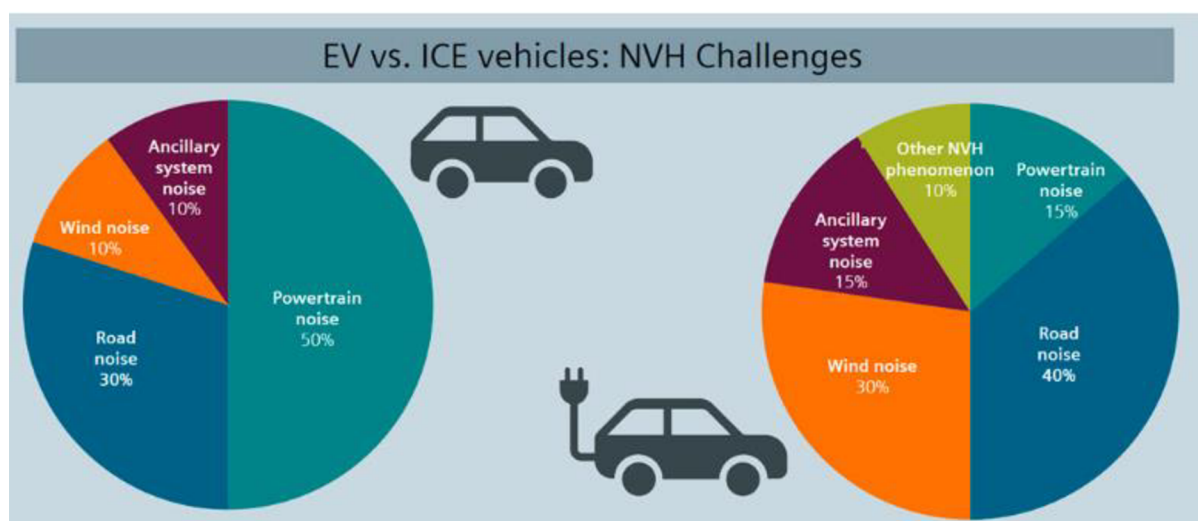
Existuje mnoho metod, jak ověřit, zda je zjištěný jev ve skutečnosti rušivým hlukem. Nejjednodušším způsobem je přehrání záznamového média a použití filtru k potlačení částí, které jsou považovány za rušivý hluk. Je také důležité omezit filtr na ty části, aby se předešlo filtrování dalších částí. V závislosti na charakteru a průběhu existují různé druhy filtrů. Ve většině případů se používá dynamický filtr, který v průběhu měření mění svou frekvenci. Tímto způsobem je možné odfiltrovat řády, které mají stoupající frekvenci úměrnou rychlosti otáčení. V případě jednotlivých událostí lze využít cyklický filtr, který je aktivní v přítomnosti šumu.

5. ZDROJE HLUKU A VIBRACÍ U VOZIDLA TYPU BEV

V dalších letech nás pravděpodobně čeká nárůst prodeje elektromobilů a s tímto souvisí i řešení problémů se zdroji vibrací a hluků u elektromobilů. U automobilů se spalovacím motorem (Internal Combustion Engine) je přibližně 90 % pohyblivých součástí, kde hlavním zdrojem hluku je spalovací motor. Elektromobil typu BEV naopak nevyžaduje spalovací motor či složitou několikastupňovou převodovku.

Velmi důležitou charakteristikou při měření je tzv. NVH (Noise, Vibration, Harshness), kde noise je to co slyšíme, vibration to co cítíme a výraz harshness označuje subjektivní pocit uživatele vozidla. Příčinami NVH u elektromobilů jsou mechanické a elektrické části, stejně tak interakce s vozovkou či hluk způsobený větrem. Jak zredukovat NVH můžeme rozdělit na tři základní principy – redukce u zdroje hluku resp. vibrace, izolací od hlavní struktury automobilu a absorbcí hluku resp. vibrací, než vstoupí do kabiny vozidla. [13]

Na obr. 23 lze vidět zdroje hluku u automobilu se spalovacím motorem a elektromobilem.



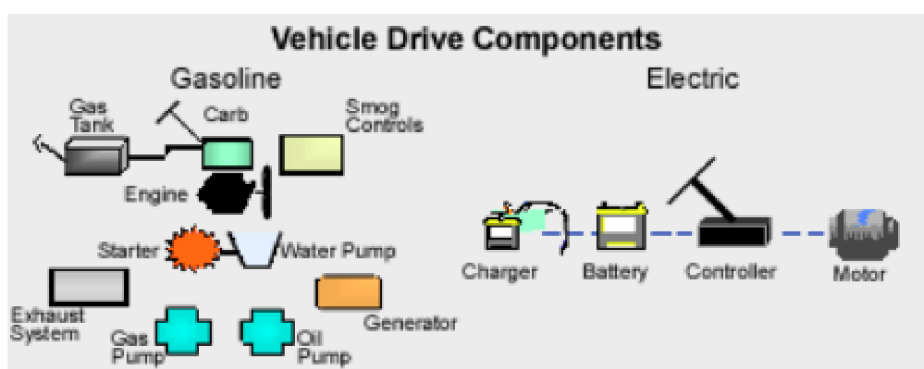
Obr. 23 Porovnáání zdrojů hluku u vozidla typu BEV a vozidla se spalovacím motorem [13]

Podle obrázku lze vidět, že u klasického automobilu se spalovacím motorem, je hlavním zdrojem hluku resp. vibrací pohonný systém (Powertrain noise), který doznal největších změn u BEV, na dalších místech následovaný hlukem vzniklý interakcí s vozovkou (Road noise), vlivem aerodynamického proudění větru kolem vozidla (Wind noise) a v neposlední řadě hluk resp. vibrace způsobené vedlejšími součástmi (Ancillary system noise) jako například stěrače či klimatizace. [13]

U elektromobilu typu BEV je to výrazně naopak. Výraznými zdroji hluku u elektromobilu jsou zdroje způsobené interakcí s vozovkou a také vliv proudícího větru. Co vyplývá z grafu je, že výrazně hlučnějšími se stávají vedlejší prvky automobilu, které byly v předchozím případě skryty za hluk způsobený spalovacím motorem jako je například systém HVAC. U automobilu BEV se dále vyskytl hluk z nabíjení automobilu, což lze vidět na grafu jako speciální hluk s hodnotou 10 %. Tyto změny si vyžadují jiný inženýrský přístup než ten, který byl využit u spalovacích motorů. Na dalších stranách budou postupně rozebrány jednotlivé zdroje hluku resp. vibrací u BEV. [13]

5.1 Pohonný systém u BEV

Jak už z názvu vyplývá, pohonný systém (Powertrain) dodává vozidlu výkon. Pohonný systém je sada komponentů, které vytvářejí energii a následně ji dodávají na kola.



Obr. 24 Porovnání pohonného traktu u BEV a automobilu se spalovacím motorem [22]

V porovnání s pohonným systémem u konvenčního vozidla se spalovacím motorem, kde je mnoho pohyblivých částí způsobující hluk a vibrace, došlo u pohonného systému u BEV k nejvýraznějším změnám vzhledem ke koncepci pohonného traktu, což dokazuje obr. 24. [22] Pohonný systém u vozidla typu BEV se skládá z elektrické řídicí jednotky (power electronic controller), elektromotoru (stator + rotor) a převodovky. Celé složení lze vidět na obr. 25. [12]



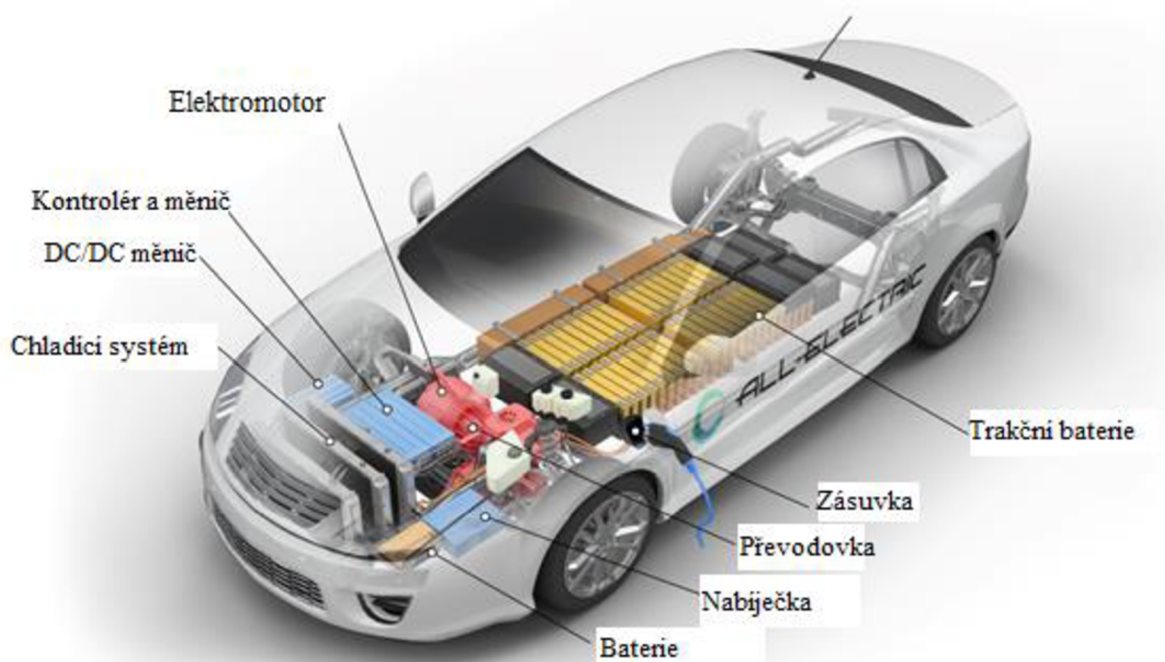
Obr. 25 Pohonný systém u BEV [12]

U vozidla se spalovacím motorem jsou stovky pohyblivých částí. Hlavními částmi pohonného systému viz. obr. 26 jsou spalovací motor, spojka, převodovka, hnací hřídel a diferenciál. Výkon je tvořen termodynamickými ději v motoru a přenesen na hnací hřídel. K dalším pohyblivým částem nezbytných pro funkci pohonného systému jsou výfukový systém, nádrž na palivo a olej, čerpadla a chladicí systém. Při porovnání obr. 27 a obr. 28 lze vidět výrazné rozdíly v koncepčním řešení při konstrukci vozidel mezi BEV a konvenčním automobilem. [22]



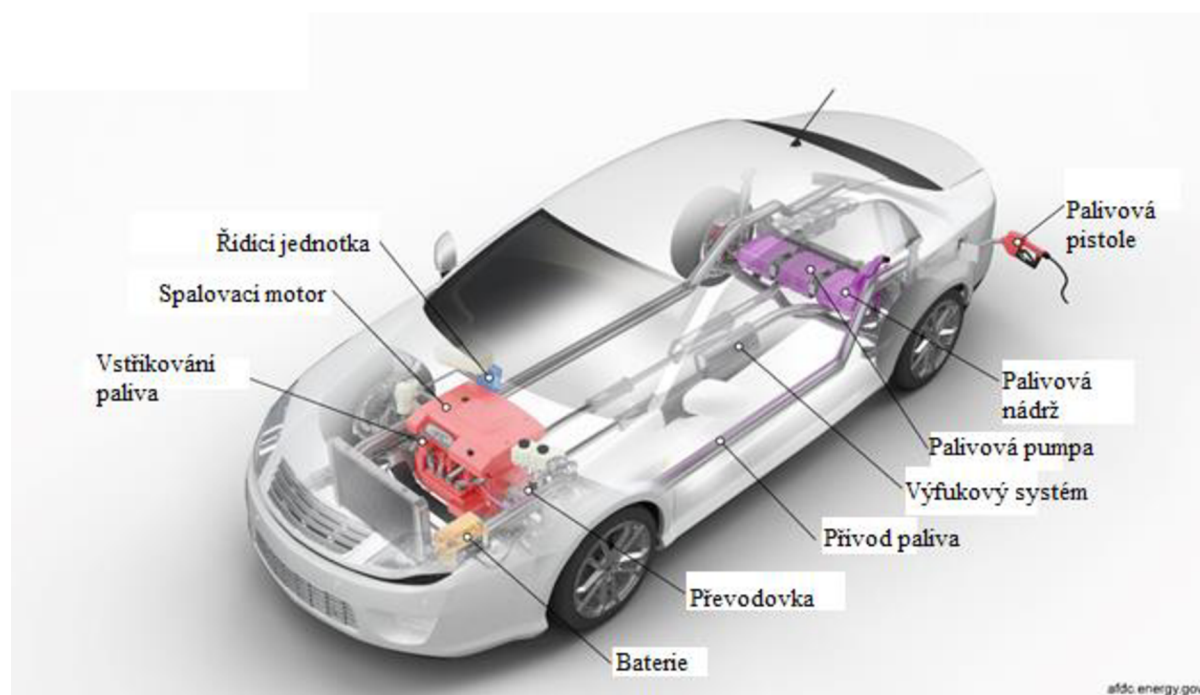
Obr. 26 Pohonný systém u spalovacího vozidla [22]

BEV



Obr. 27 Důležité části u BEV [10]

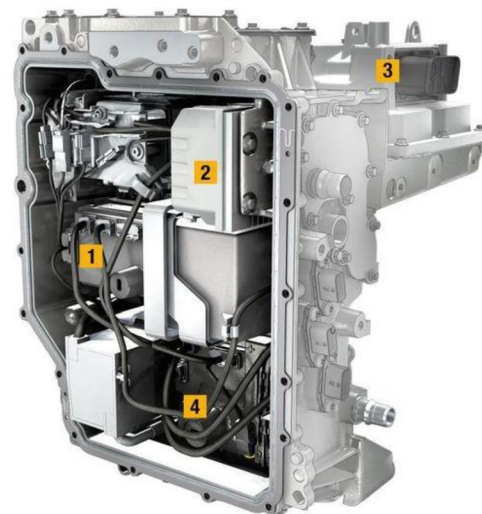
Automobil se spalovacím motorem



Obr. 28 Důležité části u automobilu se spalovacím motorem [23]

5.1.1 Elektronická řídicí jednotka

Elektronická řídicí jednotka viz. obr. 29 je modul, který je tvořen řadou subsystémů a každý jednotlivý subsystém je zodpovědný za svou řídicí funkci. Jednou částí systému je usměrňovač, který přeměňuje střídavý proud na stejnosměrný, jež je následně posílán do baterie. Dále zde můžeme nalézt DC-DC konvertor zodpovědný za z vysokého napětí (400 V) na nižší napětí (12 V). Nepostradatelným subsystémem je invertor, který řídí rychlost a otáčky elektromotoru přeměnou stejnosměrného proudu na střídavý 3-fázový proud pro elektromotor. Vlivem použití řídicí



- 1 USMĚRŇOVAČ
- 2 DC-DC KONVERTOR
- 3 VSTUPNÍ FILTR
- 4 INVERTOR

Obr. 29 Elektronická řídicí jednotka [12]

elektroniky je vnitřní komfort jezdce poznamenán vysokofrekvenčním tonálním hlukem, kde nejvýraznější je vliv pulsně šířkové moduly neboli PWM způsobený v invertoru. [12]

5.1.2 Elektromotor

Ačkoliv by se mohlo zdát, že elektromotor viz obr. 30 je tiché zařízení, není tomu tak. V závislosti na typu elektromotoru, elektromagnetické a odpovídající pulsy jdoucí z motoru mohou být velmi silné. [25] Tyto pulsy mohou být produkovány přímo z motoru nebo mohou být přenášeny pomocí vibrací přes skříň elektromotoru. Elektromagnetický hluk a vibrace, který vzniká v motoru, je ve slyšitelném pásmu od 20 Hz do 20 kHz. Hluk, který vzniká při startu elektromotoru je složen ze 3 složek a to: [25]

- Mechanické zdroje
- Aerodynamické zdroje
- Elektromagnetické zdroje

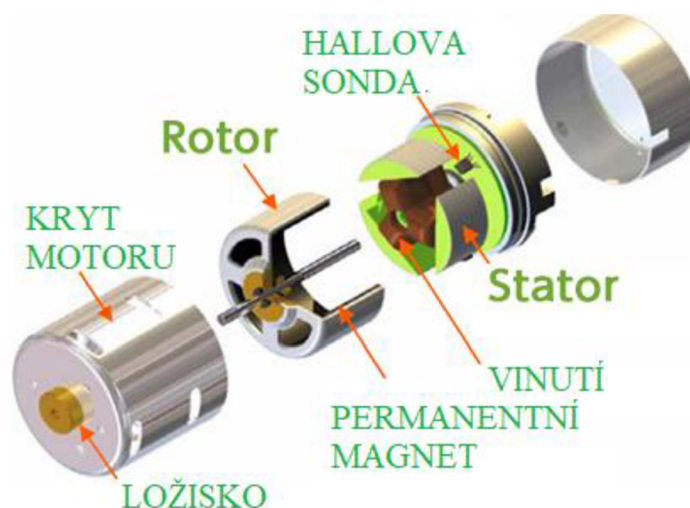
K mechanickým zdrojům patří ložiska a hřídel. U hřídele může mechanický hluk způsobit její nevyváženost, excentricita a skluz mezi rotorem a ložisky. Vibrace a hluk u ložisek může být způsoben mazivem, výrobními nepřesnostmi, hrubostí povrchu, rezonancí vnějšího kroužku, chybou při montáži mezi ložiskem a hřídelí, atd. [25]

Mechanický hluk můžeme snížit chemickými aditivy, změnou rychlosti rotace, vybalancováním rotoru, přidáním elastických materiálů pro tlumení, atd. [25]

Aerodynamické vibrace a hluk jsou způsobeny proudem vzduchu a chladícím systémem. Tento hluk můžeme snížit geometrií lopatek, nerovnoměrným rozložením lopatek větráku, využití porovitého materiálu na listy lopatek a nebo využitím osových než radiálních lopatek. [25]

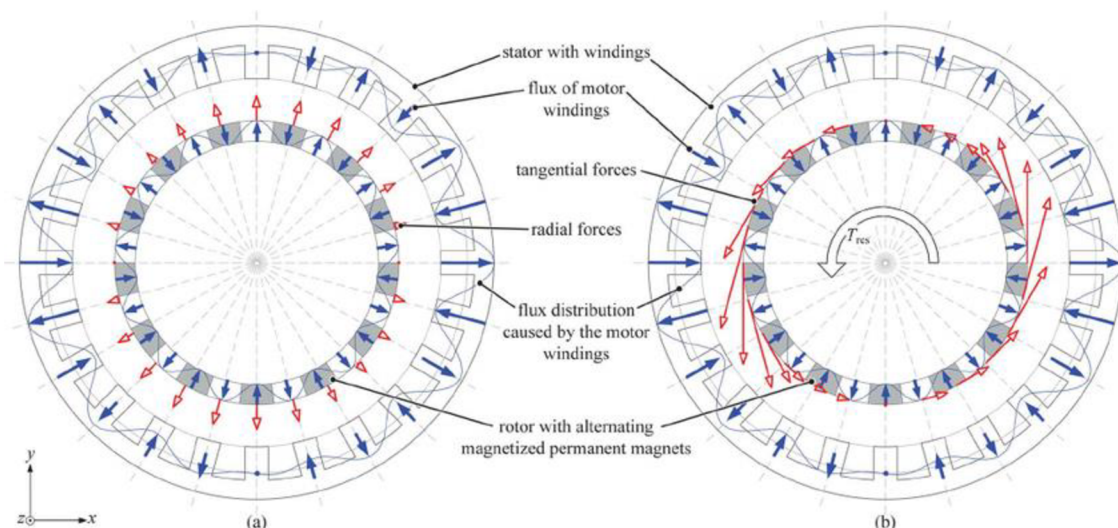
Elektromagnetický hluk a vibrace vznikají působením dynamických magnetických sil na aktivní materiály (lamináty, magnety, ...) nebo Maxwellovy síly působí na stator, aby se přiblížil k rotoru. [28]

Velmi důležitý vliv má z hlediska elektromagnetického hluku rezonance. Rezonance nastane, když elektrická frekvence vlny se shoduje s přirozenou frekvencí. [28] Elektromagnetický hluk lze eliminovat např. tvarem polů, modifikací mezery mezi statorem a rotorem, atd.



Obr. 30 Konstrukční řešení elektromotoru [26]

Výše zmíněná excentricita, která je ve většině případů způsobena výrobní nepřesností, vytváří vzduchovou mezeru. Tato mezeru vytváří nerovnoměrnou vzduchovou mezeru a je příčinou vzniku elektromagnetického hluku a vibrací elektromotoru, kdy elektromagnetické síly působí na konstrukci. [25] Primární je radiální excitace, která nemá vliv na chod motoru. Velmi podstatné jsou tangenciální složky elektromagnetických sil, které vytvářejí kroučící moment viz obr. 31. [18]

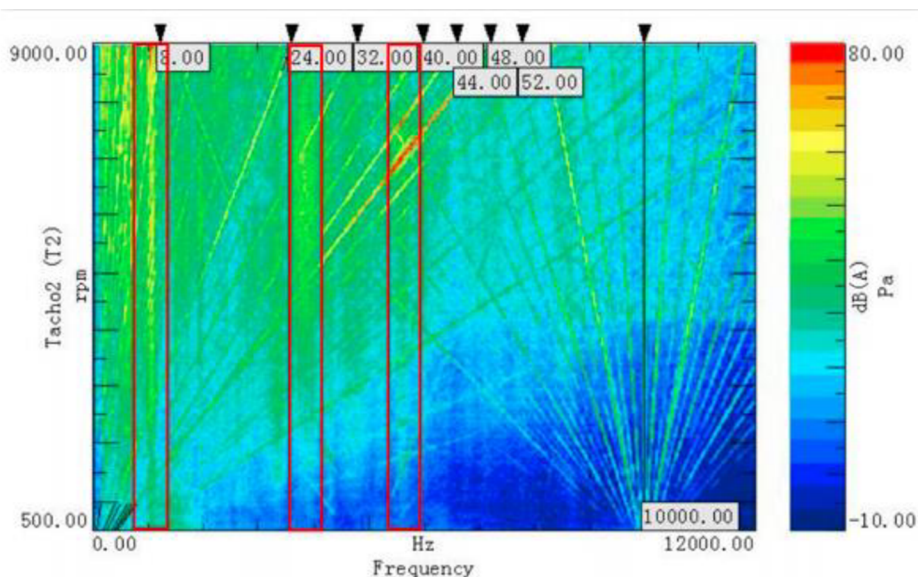


Obr. 31 Rozložení tangenciálních a radiálních složek elektromagnetických sil [27]

Vibraci a hluk u elektromotoru lze znázornit u třífázového střídavého motoru s permanentním magnetem. Test byl proveden v bezdozvukové komoře. Při běhu elektromotoru je stejnosměrný proud nejprve převeden na třífázový střídavý proud v invertoru. [28]

Následně je střídavý proud přiveden do kontroléru a až poté do motoru. Vibrace a hluk vznikají od elektromotoru v součinnosti s reduktorem. [28]

Hluk je přenášen přímo do kabiny vozidla vlivem vzduchu nebo pomocí tlumičů nebo konstrukcí vozidla. [28] Na obr. 32 níže lze vidět závislost otáček na frekvenci. Lze konstatovat, že čím vyšší otáčky, tím hlasitější bude odezva elektromotoru. [28]



Obr. 32 Závislost frekvence na otáčkách u elektromotoru [28]

5.1.3 Převodové ústrojí

Hluk u převodového ústrojí viz. obr. 33 se projevuje zejména vibracemi převodové skříně. Vibrace vznikající ze záběru jednotlivých ozubených kol jsou dominantním zdrojem hluku. [24] Nejvýraznější podíl na vzniku vibrací má chyba převodu (TE – Transmission Error). K dalším zdrojům patří proměnná tuhost ozubení během záběru kol, rázy při vstupu do záběru, tření mezi jednotlivými zuby, osový výkyv v záběru, komprese maziva a vzduchu. [24]



Obr. 33 Jednostupňová převodovka u BEV [9]

5.1.3.1 Vibrace vzniklé ozubeným soukolím

Vibrace, které vzniknou vlivem záběru jsou přenášeny přes hřídel na ložiska a poté z ložisek na samotnou skříň převodovky. [24] Skříň převodovky může být velmi citlivá na tyto vibrace, které dále způsobují hluk. K tomuto velkou měrou přispívají velké plochy, které jsou vysoce citlivé na vibrace. Příčinou vzniku vibrací je vliv působení dynamických sil. [35] Síla může libovolně měnit svoje působíště, směr a amplitudu.

Z těchto parametrů je nejpodstatnější amplituda, která u evolventního ozubení způsobuje proměnlivost tuhosti a s tímto související vznik rázů při vstupu samotných zubů do záběru. [24] Rázy následně deformují úchytky roztečí a profilů zubů od teoretických hodnot.

Druhotný vliv je přikládán skluzovým rychlostem, které vznikají při záběru evolventních ozubených kol. Tento proces je podrobně popsán smýkáním či valením, kde při vniknutí zubu do záběru vzniká nejprve smykové tření, které přechází na valení, kde změni svůj směr a opět zde dochází k rychlému nárůstu smykového tření. [24]

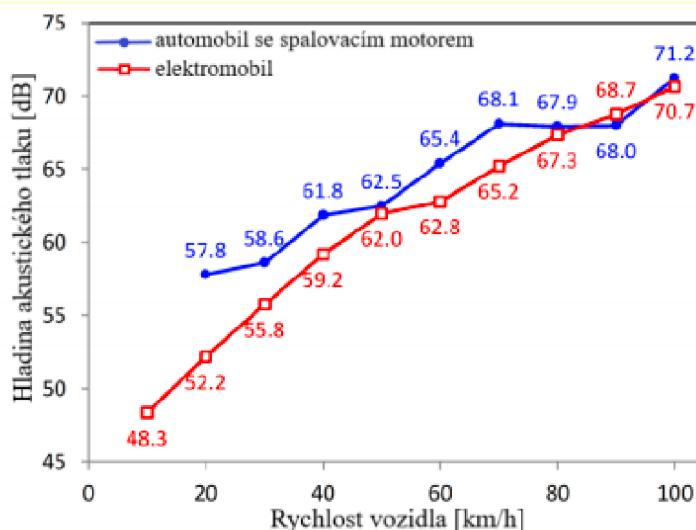
Vlivem těchto rychlých změn dochází ke vzniku vibrací na ozubeném soukolí. Hluk lze také přenášet přes strukturu skříně převodovky skrze uložení až po karoserii automobilu. [24] Samotná karoserie automobilu obsahuje velké plochy, které jsou velmi citlivé na vibrace.

Za účelem snížení těchto vibrací se využívají tlumiče vibrací, které jsou připevněny na držáky převodovky mezi karoserií a skříň. [24] Se záběrem samotného ozubení je spojeno mnoho hluků přičemž k nejvýznamnějším druhům řadíme „hvízdání“ a „kvílení“. Toto je způsobeno zubovou frekvencí a jejími násobky. Tento hluk vnímáme jako tonální, a to vlivem periodického záběru ozubených kol. [24] Jako další můžeme zmínit „řinčení“, které je způsobeno záběrem kol bez zatížení, kdy ozubená kola nepřenáší žádný výkon, a tak v rozsahu nevymezené vůle vibrují. [28]

Řinčení způsobuje problémy u převodovek s více stupni, kde po přeřazení dochází k rozdílu rychlostí na výstupu. [28] Nízkofrekvenční kolísání točivého momentu, které vyvolává elektromotor, má tentýž vliv na řinčení při záběru nezatížených ozubených kol. [28]

Jednostupňové převodovky, které se v současnosti vyskytují nejčastěji v elektromobilech, řinčení není tak podstatné. Mezi další zdroje hluku patří také hluk způsobený nevyvážeností jednotlivých hřídelů. [24] Dochází k nízkofrekvenčním vibracím, které po rozběhu zařízení zmizí. Příčina tohoto hluku je vyvolána poruchami valivých elementů ložisek.

Po několika studiích bylo zjištěno, že hladina akustického tlaku se liší pouze při nízkých rychlostech v porovnání vozidla s elektromotorem a spalovacím motorem. Podle obr. 34 dochází při nižších rychlostech k tvorbě výrazného hluku od převodového ústrojí, který u elektromobilů dosahuje nižší hladiny. Bylo také prokázáno, že u elektromobilů se vyskytuje nejvyšší hladina hluku ve středních až vysokých frekvencích. Jedná se o rozmezí 500 – 2000 Hz pro střední a 2000 Hz pro vyšší. [28]



Obr. 34 Porování hluku mezi BEV a automobilem se spalovacím motorem [28]

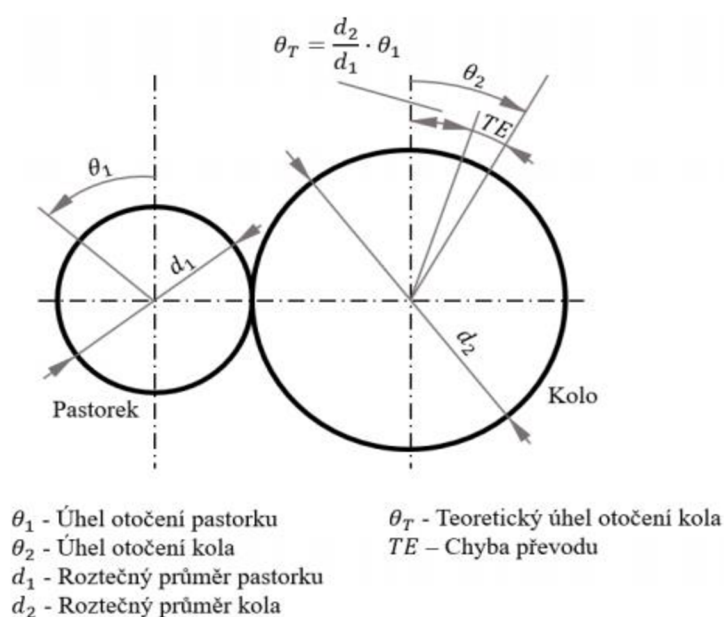
Dle nejnovějších studií je chyba převodu považována za hlavní zdroj hluku a je nutné ji snížit na co nejmenší možnou úroveň. Existuje mnoho způsobů jak snížit chybu převodu jako modifikace boku zubu, zvětšení úhlu sklonu zubu a zvětšení šířky ozubeného kola. [24]

5.1.3.2 Chyba převodu

Chyba převodu vyjadřuje diferenci mezi teoretickou a skutečnou pozicí hnaného ozubeného kola. Chybu převodu lze rozdělit na statickou a dynamickou. [29] Statická chyba vzniká vlivem působení statických sil, které jsou vyvolány především měnícím se počtem zubů v záběru a také nepřesnou výrobou. Dynamická chyba převodu je vyvolána působením zatížení za rotace, kde je nutné brát v úvahu hmotnost ozubených kol a jejich setrvačnost. U ozubeného soukolí vznikají odchylky od správné výstupní polohy způsobené změnou tuhosti ozubení. [29] Tuhost ozubení je dána tuhostí zubů, které jsou v kontaktu a změna je závislá na poloze otáčení ozubeného kola. Tuhost záběru ozubení způsobí vychýlení ozubených kol a tím se zvětší rozteč mezi nimi.

Do záběru následně vstoupí nezatížený zub dřívě a způsobí náraz na spoluzabírající zub, což vyvolá okamžitý ráz na hlavě zubu, který se následně šíří strukturou. [24] Tímto vzniká chyba převodu znázorněná na obr. 35.

V závislosti na počtu zubů v záběru bude síla mezi nimi více rozložena a výchylka bude menší, pokud bude více zubů v kontaktu, a naopak pokud bude méně, dojde ke zvětšení výchylky. [30] Ke vzniku vzniku velkých vibrací přispívá kolísání tuhosti ozubení. Způsob, kterým lze hluk snížit, je zvýšit počet zubů v záběru. Dosáhneme tak nižší hlučnosti a kolísání tuhosti ozubení. [30]



Obr. 35 Chyba převodu [30]

5.1.4 Další zdroje hluku

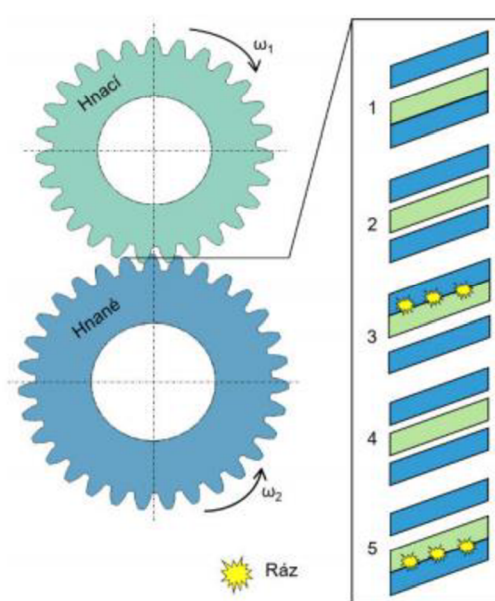
Převodové ústrojí je složeno z mnoha komponent. Některé části se na vzniku hluku nepodílí, ale spíše dopomáhají k jeho přenosu. Těmito komponenty jsou ložiska a hřídel. Hřídele přenáší vibrace z ozubeného soukolí na ložiska, ze kterých jsou dále přenášeny na převodovou skříň a až na samotnou konstrukci automobilu. [32] Hřídele jsou v ústrojí nejvíce namáhány na průhyb vlivem záběru ozubených kol. Důležité je pozorně sledovat rovnoběžnost, která je velmi důležitým aspektem.

Ložiska přenáší vibrace a hluk do struktury vozidla, ale navíc jsou také jejich zdrojem. [31] Toto se týká zejména ložisek s valivými elementy, které vlivem odvalování jednotlivých elementů po vnitřní ploše ložiska produkují vibrace a zvuk.

Vibrace se projevívá jak v nízkofrekvenčním pásmu, tak ve vysokých frekvencích od 5 kHz a výše. [24] Ložiska jsou také z velké části zdrojem poruch (40% – 60%), což je způsobeno nedostatečným promazáním (znalost tribologie). Za jedny z nejrizikovějších jsou považovány ložiska u rotoru.

Dalším prvkem, který způsobuje vibrace a hluk je řadící mechanismus. Tento mechanismus je složen z řadící vidlice synchronizačních kroužků, apod. Mezi jednotlivými komponenty mohou vzniknout vůle v uložení, které mají za následek produkci vibrací a hluku. [31] Například u ozubení se šikmými zuby vznikají vůle jak v osové, tak v bočním směru a mají za následek tvorbu rázů viz. obr. 36. [32]

Na hluk a vibrace v převodovém ústrojí má také podíl mazivo. Hluk je způsoben vzniklými vzduchovými kapsami s mazivem, které nelze vytlačit vlivem malé mezery mezi ozubením. [24] Mazivo se několikrát za sebou zmáčkne, čímž dojde k nepravidelnému chodu záběru, a tak vzniknou dynamické síly, které působí na ozubení během záběru. [32]



Obr. 36 Vznik rázu vlivem boční vůle [32]

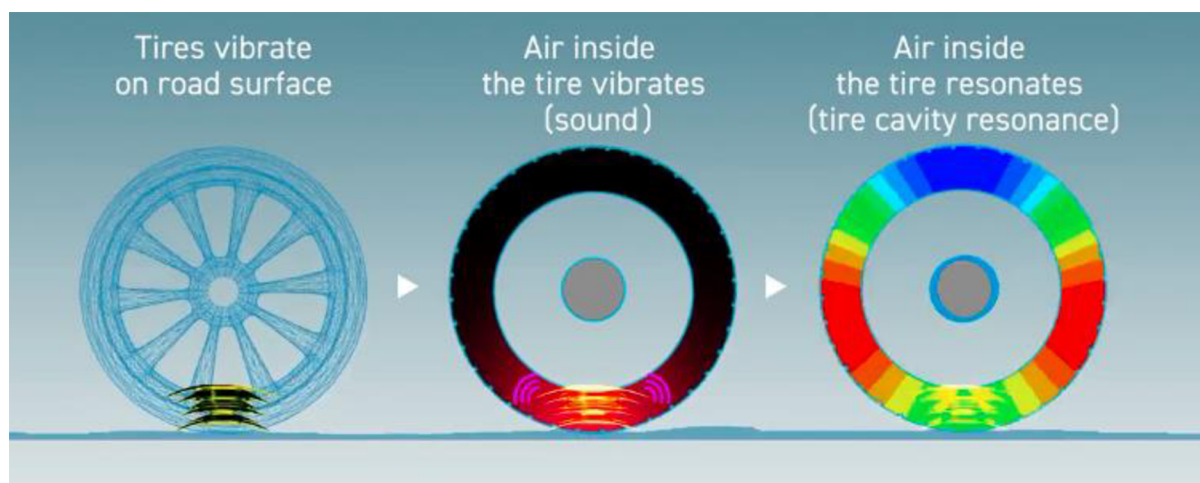
5.2 Hluk a vibrace způsobené interakcí se silnicí

Jeden z hlavních zdrojů hluku a vibrací u elektromobilu, který způsobuje nepříjemný hluk v interiéru vozidla, vzniká při interakci s vozovkou. [13] Na tento zdroj hluku je nejvíce upředena pozornost než na jiné zdroje hluku či vibrací. Pro porovnání s automobilem se spalovacím motorem, kde hlavním zdrojem hluku, je pohonný systém, který představuje 40 %. Obvykle vůz setrvává svůj životní cyklus mezi 40 – 80 km/h a v tomto rozsahu právě vznikají i určité vibrace a hluk v interiéru vozidla. [13] Hluk a vibrace jsou způsobeny kontaktem pneumatik s vozovkou a brzdami.

5.2.1 Pneumatiky

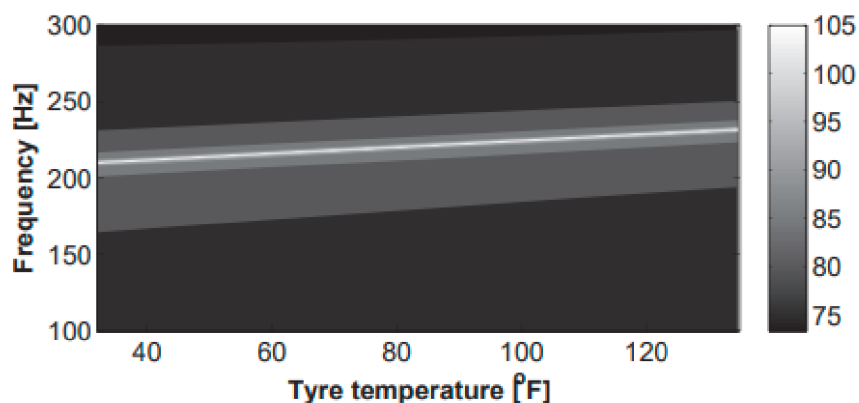
Abychom se mohli podívat podrobněji na zdroj hluku, musíme si nejdříve rozdělit hluk na vnější a vnitřní. Vnější hluk vzniká od kontaktu pneumatiky s vozovkou a je přenášen vzduchem. Tomuto jevu se v anglické terminologii říká *Airborne*. Hluk v interiéru vzniká vibracemi pneumatik, které jsou přenášeny do interiéru přes konstrukci automobilu. Jedná se o tzv. *Structure-borne*. Přenosem rezonance vzniká fenomén, který způsobuje hluk v interiéru vozidla, nazvaný *Tire cavity noise*. [33]

Při pohybu vozidla kola vibrují v důsledku kontaktu s vozovkou. Vzduch, který je použit jako médium v pneumatikách, se začne chvět a tím vzniká zvuk. Dochází k tomu, že vzduch v pneumatikách rezonuje. [33] Jedná se o velmi nepříjemný hluk o frekvenci v rozsahu 200 až 250 Hz v závislosti na velikosti pneumatiky. Tento proces je znázorněn na obr. 37.



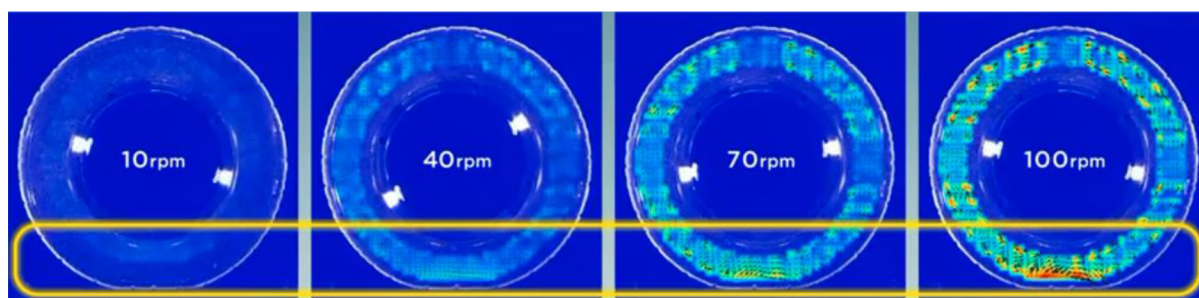
Obr. 37 Proces vzniku vibrací a hluku u kol [33]

Co může dále ovlivnit hluk a vibrace u pneumatik je teplota a médium, které je využito v pneumatice místo vzduchu. [35] Výkoná vozidla mohou využívat jako médium dusík, oxid uhličitý nebo hélium. Kvůli tření mezi vzorkem pneumatiky a silnicí, rychlost zvuku v pneumatice se může lišit absolutní teplotou, která taktéž ovlivňuje rezonování. [35] Čím menší teplota, tím menší rezonanční frekvence, jak je vidět na obr. 38.



Obr. 38 Závislost frekvence na teplotě pneumatiky [35]

K vizualizaci rozložení vzduchu v pneumatice je využívána metoda Particle Imaging Velocimetry (PIV). Tímto způsobem bylo prokázáno, že v závislosti na deformaci pneumatiky, dochází k fluktuaci vzduchu viz. obr. 39. [35]



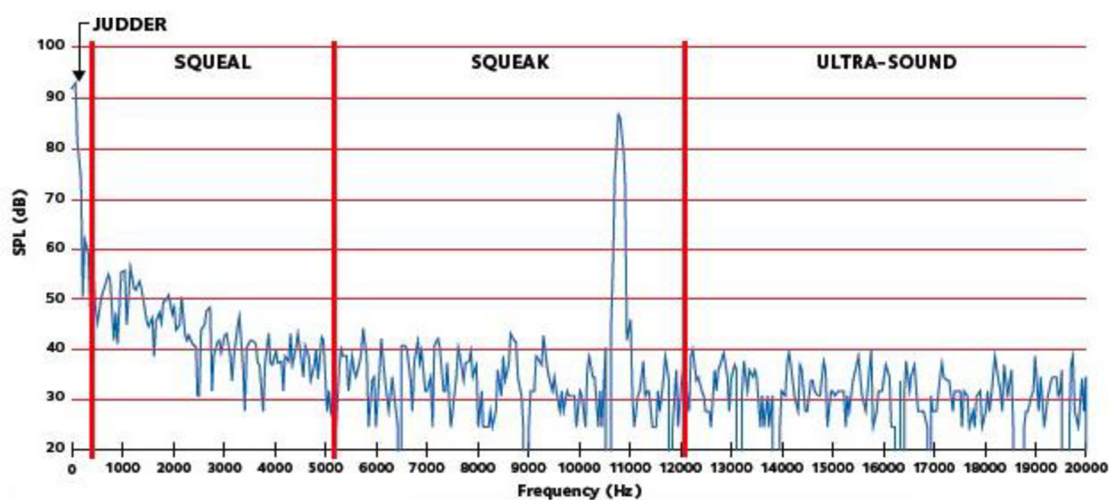
Obr. 39 Vizualizace rozložení vzduchu v pneumatice [35]

5.2.2 Brzdy

Hluk a vibrace způsobené třením brzdových destiček o disk je jedním z nejdůležitějších hluků související s jízdou vozidla. [34] Hluk může vzniknout i od působení ložiska na kulový kloub (ball joint). V závislosti hluku na frekvenci viz. obr. 40 rozlišujeme tyto druhy vibrací: [34]

- Nízkofrekvenční vibrace (Low frequency vibrations - judder)
- Střední vibrace (Medium frequency vibrations - squeal)
- Vysokofrekvenční vibrace (High frequency vibrations - squeak)
- Velmi vysokofrekvenční vibrace (Very high frequency vibrations – ultra-sound)

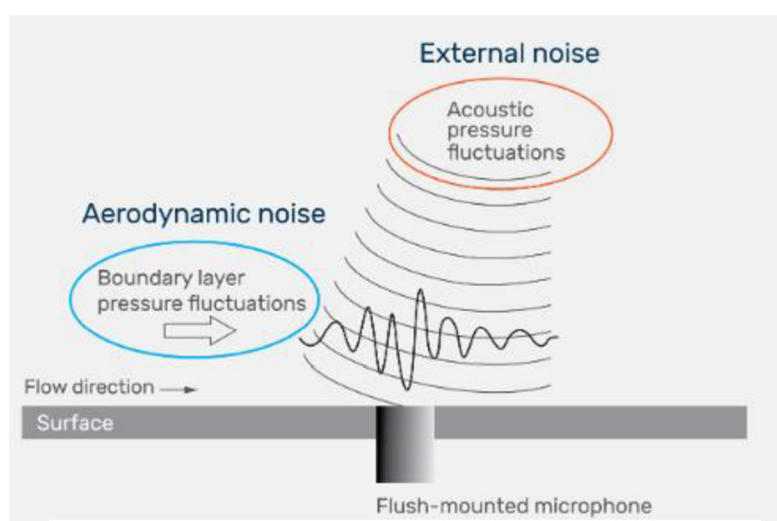
U nízkofrekvenčních vibrací vzniká hluboký zvuk s frekvencí do 300 Hz. K běžným problémům vzniklých u tohoto typu je poškození disku. Od 300 – 5000 Hz mluvíme o středních vibracích, které mohou způsobit zpomalení pohybu pístu na třmenu, nepasující disk, příliš malá tloušťka disku vlivem opotřebení. Nad 5000 Hz můžeme mluvit o vysokofrekvenčních vibracích. [34]



Obr. 40 Typy zvuků u brzd v závislosti na frekvenci [34]

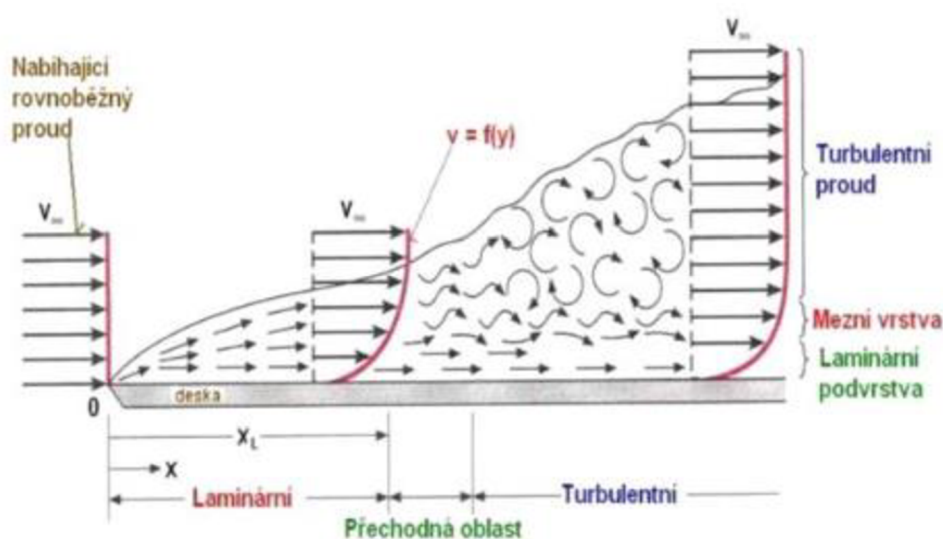
5.3 Hluk vzniklý při jízdě vozidla vlivem větru

Obor, který se zabývá vznikem hluku, je aeroakustika. Je zejména důležitá při designu a tvorbě vozidel, letadel, větrných turbín, budov nebo i mostů za účelem snížení vibrace a hluku. Aeroakustika rozeznává dva zdroje hluku a to externí a aerodynamický hluk viz. obr. 41. [36]



Obr. 41 Aerodynamický a externí hluk [36]

Jedním z hlavních parametrů při měření *Wind Noise* v automobilovém průmyslu je měření mezní vrstvy (boundary layer). [36] Vzduch či kapalina ulpívá při obtékání tělesa. Během experimentů bylo zjištěno, že v blízkosti povrchu tělesa jsou třecí síly stejně velké jako dynamické. Protože částice kapaliny na povrchu ulpívají, je zde rychlost nulová, tj. část kinetické energie se nevratně přeměnila na teplo. Dochází zde k přeměně kinetické energie na energii tlakovou. [36] Mezní vrstva se odděluje od povrchu tělesa a vzniká úplav viz obr. 42. V každém úplavu je neuspořádané proudění, které způsobuje energetické ztráty, hluk apod. [38] Snahou inženýrů je tomuto úplavu zabránit nebo ho zredukovat. Jako hlavní nástroj při modelování je využito CFD (Computational Fluid Dynamics). [36]



Obr. 42 Přechod z laminárního na turbulentní proudění [38]

Aerodynamický hluk souvisí s designem vozidla a také s turbulencí vznikající kolem různých komponent. V souvislosti s designem vozidla, existují 3 základní druhy, které ovlivňují aerodynamický hluk a to: [36]

- Vehicle Form
- Open Cavities
- Body Sealing

Vehicle Form

Jedná se o komponenty, které přímo ovlivňují vznik hluku. Jsou to A-sloupek, boční zrcátka, stěrače, anténa, podvozek a zadní spoiler. [36]

Open Cavities

Je to druhý nejdůležitější zdroj u aerodynamického hluku. Existují dva hlavní zdroje a to zdroje, které vznikají u velkých otvorů jako otevřené střešní okno nebo okno u řidiče viz. obr. 43.



Obr. 43 Akustický tlak u okénka řidiče za pomoci CFD [49]

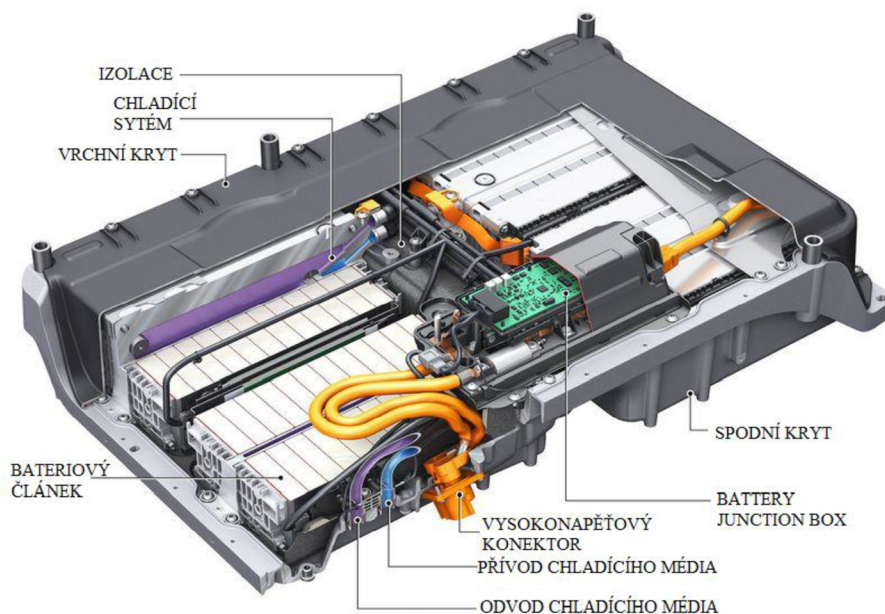
Druhý zdroj vzniká u malých otvorů jako např. u dveří, dveře u kufru nebo otvoru u kapoty. [36]

Body Sealing

Jde o protiklad k předešlým dvěma druhům. Hlavním smyslem je zabránit proniknutí hluku okolo dveří a skel. Hluk tohoto systému se snaží dosáhnout vyšších frekvencí uvnitř kabiny. Jedná se o hodnoty vyšší jak 500 kHz. [36]

5.4 Hluk způsobený vedlejšími systémy

U elektromobilu jsou vedlejší systémy (Ancillary System Noise) mnohem výraznější než u automobilu se spalovacím motorem, neboť hluk byl maskován právě spalovacím motorem. U vozidla považujeme za vedlejší systémy například klimatizaci, ABS systém, vodní čerpadla pro systém, který chladí baterii, nebo výměník tepla. [13]



Obr. 44 Chladící blok baterie u vozidla AUDI A3 e-tron [50]

Chladicí systém viz. obr. 44 je obzvláště důležitý pro udržování optimální teploty baterie v rozmezí od 20 °C do 45 °C za účelem zachování životnosti baterie. [50] Jako nejúčinnější se jeví chlazení ethylenglykolem neboť má vysokou teplotní vodivost a tepelnou kapacitu. [51]

Každý elektromobil obsahuje více či méně systémů, záleží pouze na samotném designu vozidla. Hluk způsobený těmito systémy je nezávislý, oproti předchozím zdrojům, na rychlosti jedoucího vozidla. Jako další zdroj hluku lze uvést dobíjení baterie, kdy uvnitř samotné baterie dochází k elektrochemickým procesům. [13]

6. TECHNICKÉ EXPERIMENTY NA VOZIDLECH BEV

6.1 Aerodynamika

Optimalizace designu vozidla typu BEV bude vysvětlena na vozidle VW ID.3 podle článku [52]. Jako nejdůležitější faktor při návrhu designu vozidla je činitel odporu c_D (drag coefficient). Získáme ho ze vzorce:

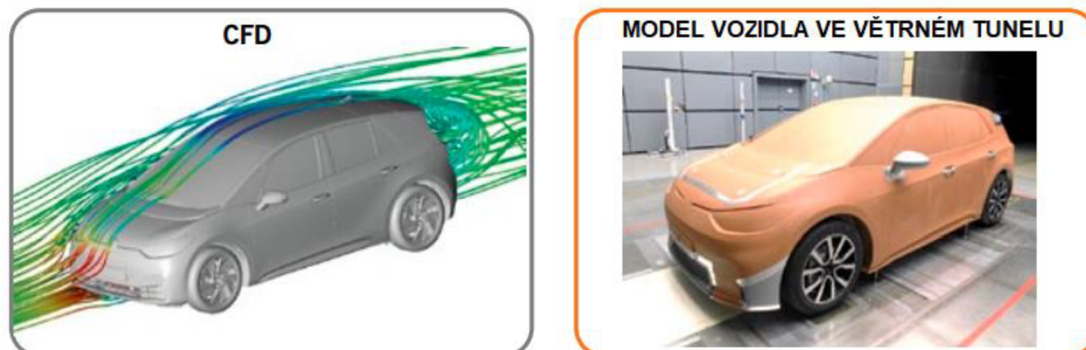
$$c_D = \frac{2F_D}{\rho u^2 S} \quad [9]$$

kde: S – referenční plocha, ρ – hustota prostředí, u – relativní rychlost, F_D – odpor prostředí

Během experimentu bylo cíleno na tyto oblasti :

- MEB platforma a chlazení vzduchem
- Stylizace tvaru vozidla
- Vedlejší části vozidla – zrcátka, disky kol

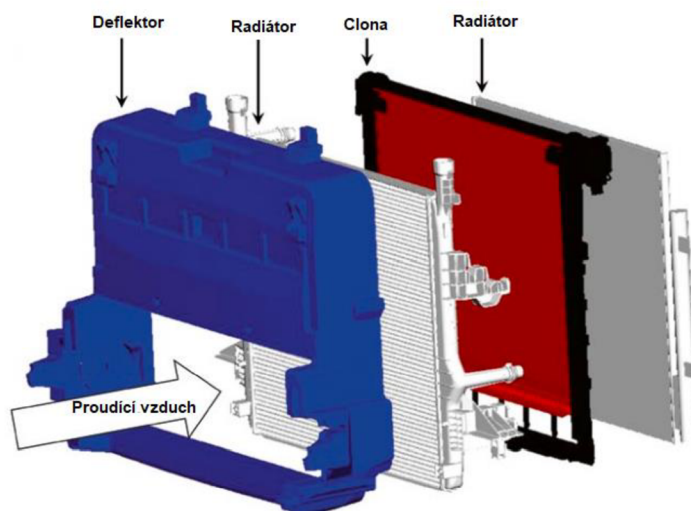
Tento experiment zahrnoval dva různé přístupy viz. obr. 45, a to numerické řešení pomocí CFD a model vozidla ve větrném tunelu.



Obr. 45 Experimentální přístupy při návrhu designu vozidla VW ID. 3 [52]

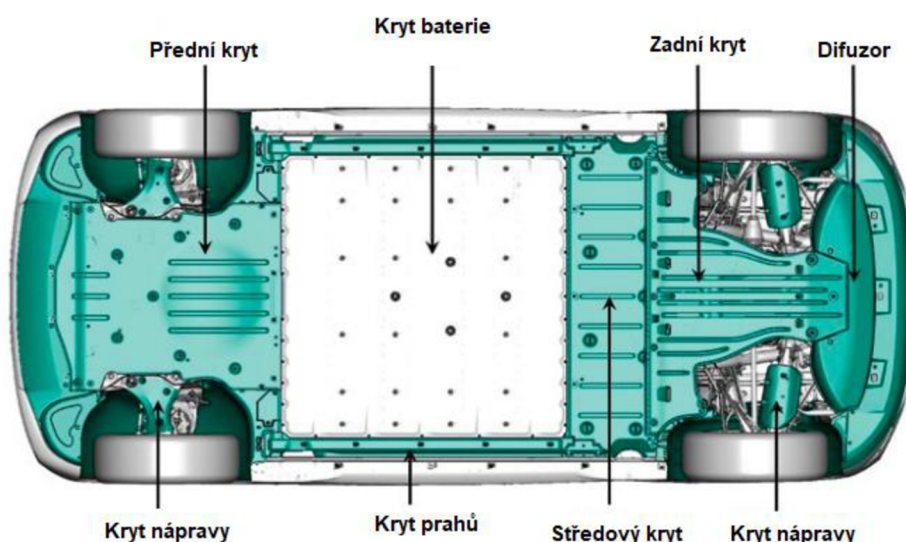
Vývoj platformy MEB

Jedná se o platformu, která je primárně využívána u vozidel s elektrickým pohonem. Aerodynamické ztráty u podvozku jsou zapříčiněny podběhem kol vozidel a také v motorové oblasti. Tyto ztráty představují 20 až 50 % celkových ztrát při proudění vzduchem. Hlavním cílem bylo zaměřit se na design podvozku a vyřešení chlazení vzduchem. Technické řešení chlazení vzduchem lze vidět na obr. 46. Tento koncept je využíván ve většině případů u BEV, kde snižuje odpor o hodnotu 0,010, čímž zvyšuje dojezd o 6 km.



Obr. 46 Chlazení baterie [52]

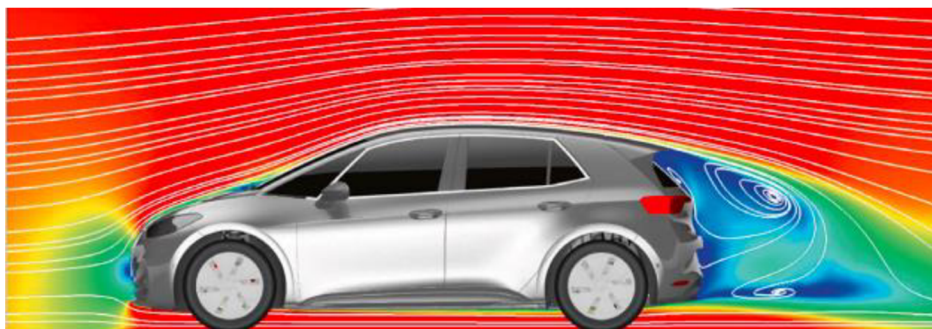
Vzhledem k velikosti a tvaru baterie byl vytvořen celistvý podvozek viz. obr. 47, který v porovnání s konvenčním vozidlem zlepšil odpor z dříve zmíněné hodnoty 0,010 na 0,025, což zlepšuje dojezd až o 15 km.



Obr. 47 Celistvý podvozek vozidla VW ID.3 [52]

Stylizace tvaru vozidla

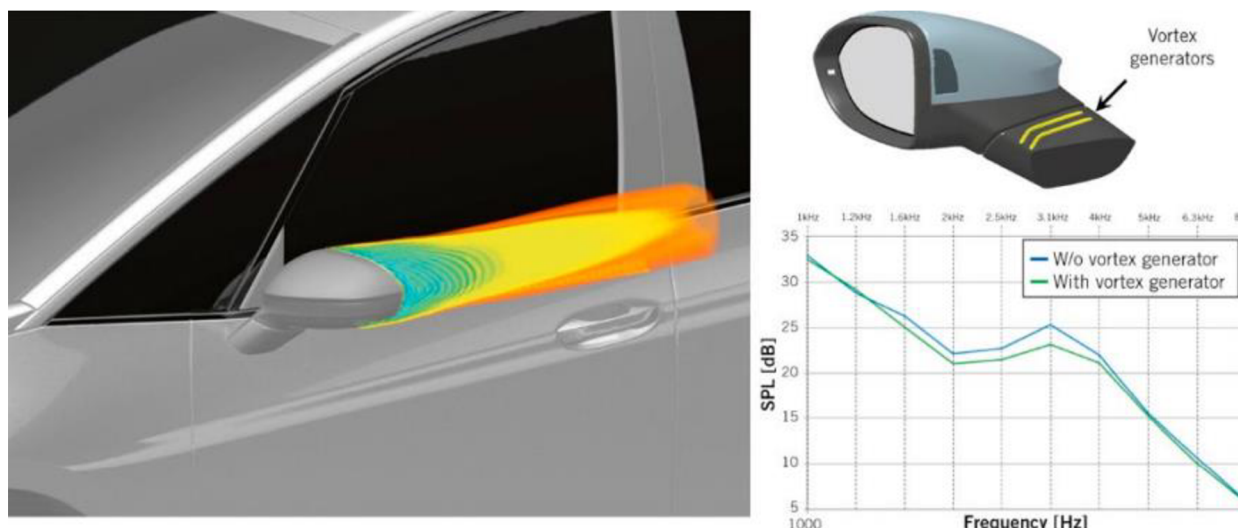
Hlavním cílem bylo zredukovat separaci při proudění a zajistit co nejhladší průběh proudění. Proudění je vedeno po zaoblených tvarech předku vozidla přes přední sklo až po nejvyšší bod na střeše. Na závěr je proud veden dále až k zadnímu nárazníku. Místo, kde dochází k separaci za vozidlem, je relativně malé a s využitím předešlé optimalizace podvozku došlo také ke snížení koeficientu odporu. Vizualizaci proudění lze vidět na obr. 48.



Obr. 48 Vizualizace proudění kolem vozidla [52]

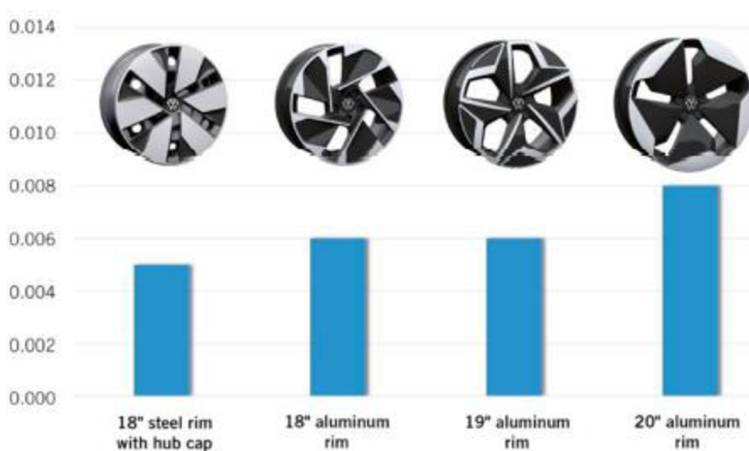
Tvar zrcátek a disků kol

Tvar zrcátek dosáhl významných změn, neboť byl snížen odpor a hlukové emise v interiéru vozidla byly sníženy o 2 dB v porovnání s předešlým vývojem neboť byly na zrcátka přidělaný generátory vírů tzv. vortex generators viz. obr. 49.



Obr. 49 Řešení zrcátek u vozidla BEV a následné snížení hluku [52]

Pneumatiky vysoce přispívají k velkým ztrátám při proudění, a to až ve výši 33 %. Hlavním cílem byla konfigurace disků za pomoci metody CFD. Průměrná hodnota součinitele odporu u konvenčních disků je 0,020. Cílem bylo snížit tuto hodnotu pod 0,010. Jak ukazuje obr. 50, pro všechny navržené disky, byl cíl splněn.



Obr. 50 Design disků kol [52]

6.2 Analýza, měření a optimalizace pohonného systému

Optimalizace jednostupňové převodovky

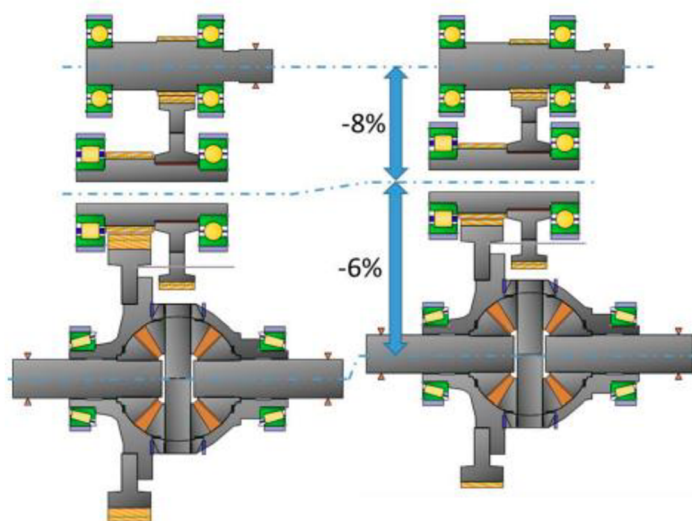
Optimalizace převodového ústrojí bude ukázána na jednostupňové převodovce poháněné 100 kW elektromotorem o točivém momentu 220 Nm. Hlavním cílem výzkumu bylo snížit hmotnost převodového ústrojí za účelem zvýšení výkonu a dojezdu vozidla. Poznatky byly získávány ze zdroje [53]. Výzkum zároveň poukazuje také na provázanost výkonu, odolnosti a také snížení vibrací a hluku. Řešené převodové ústrojí lze vidět na obr. 51 ve 3D modelu.



Obr. 51 3D model převodového ústrojí [53]

Největší procentuální podíl z celého převodového soustrojí zaujímají převodová kola a hřídele následovány krytem převodovky. Celková hmotnost ústrojí činí 19,7 kg.

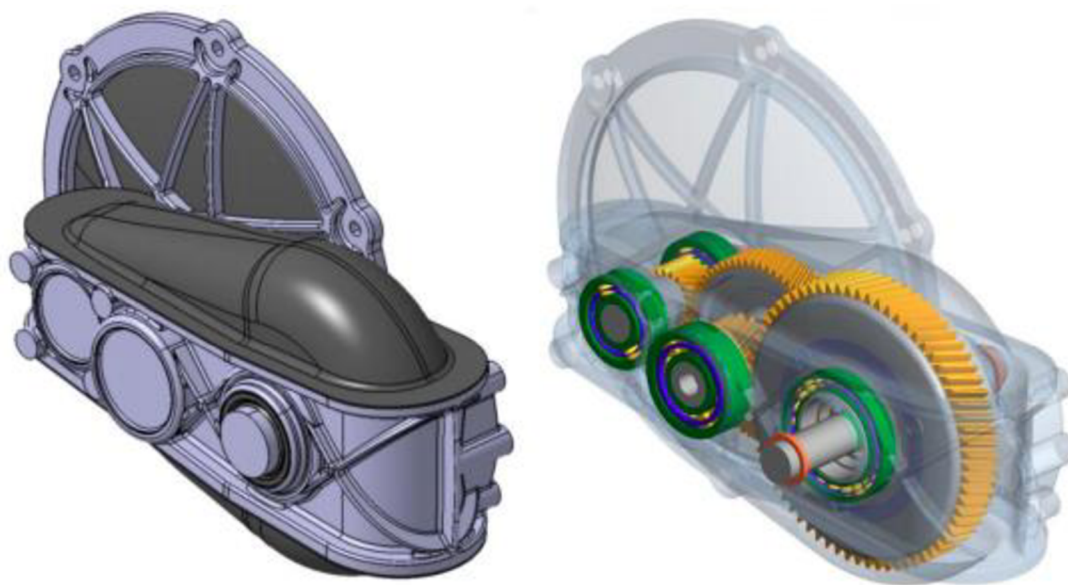
Převodovky v dnešní době jsou vyrobeny ze slitin manganu a chromu. Aplikace vysoce silných a odolných materiálů má vysoký vliv na celkový design převodovky. Snížení hmotnosti u ozubených kol zapříčiní snížení vzdálenosti středů jednotlivých ozubených kol viz. obr. 52. Kromě toho má změna mezilehlé polohy hřídele vliv na výslednici zatížení ložisek nesoucích tento hřídel v důsledku změny relativního úhlu. Vlivem využití těchto materiálů a dobrého mazání mezi ložisky byla hmotnost snížena na 18,1 kg.



Obr. 52 Snížení rozdílu mezi středy ozubených kol [53]

Dále zde bylo využito diferenciálu od firmy Schaeffler. Dosazením diferenciálu se nejen snížila hmotnost samotného diferenciálu od této firmy, ale také bylo dosaženo snížení celkové hmotnosti ústrojí. Hmotnost opět klesla a to na hodnotu 16,9 kg.

V neposlední řadě byla pozornost upřena na kryt převodového ústrojí viz. obr. 53, neboť vibrace se šíří přednostně přes tento kryt. Bylo využito hliníkového kompozitu s dobrou tuhostí a tlumícími účinky. Výsledná hmotnost se nakonec ustanovila na hodnotě 14,3 kg.



Obr. 53 Skříň převodového ústrojí [53]

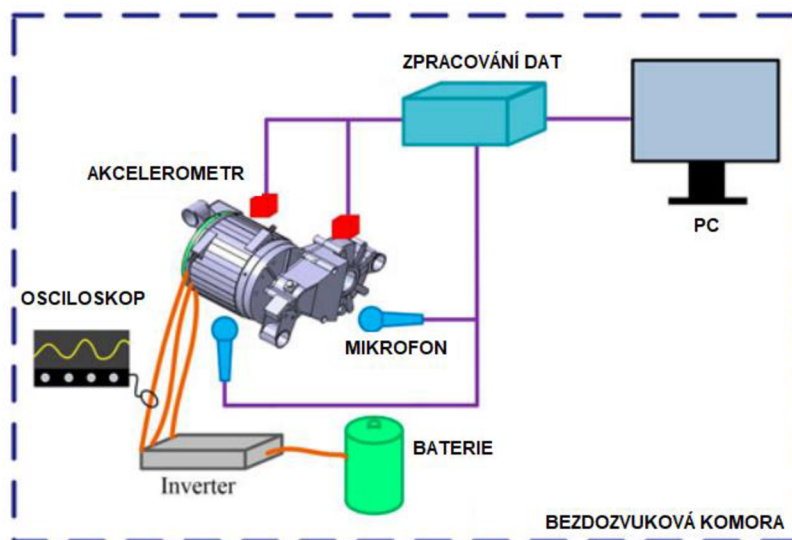
V našem případě nás nejvíce zajímá vliv modifikace na NVH. Bylo prokázáno, že došlo ke snížení hluku a vibrační vlivem snížení excentricity mezi hřídelemi a byla využito materiálů s vyšší tuhostí a tlumícími účinky.

Vyšetření kvality hluku pomocí experimentu a subjektivního hodnocení

U tohoto technického experimentu byl zjišťován původ akustického hluku včetně elektromagnetického či mechanického zdroje u elektrifikovaného převodového systému. Nejdříve byl proveden technický experiment a následně se kvalita zvuku a predikce hluku zkoumala pomocí subjektivního hodnocení, kde na závěr byl elektromobil porovnán s konvenčním automobilem. Další části textu byly získávány ze zdroje [54].

Vyšetřovaná soustava se skládá ze synchronního motoru a převodového ústrojí. Díky této struktuře na sebe vibroakustický charakter převodovky a elektrického stroje vzájemně působí, což vede ke složitější dynamické charakterizaci než u samotného elektromotoru. K určení původu akustického hluku a zvukového charakteru převodového ústrojí byly měřeny vibrace a akustický hluk za stálých a přechodných provozních podmínek.

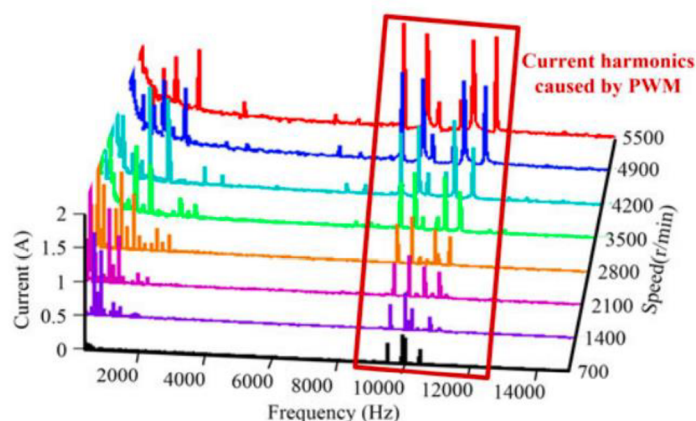
Experiment byl proveden v bezdozvukové komoře podle obr. 54. Mikrofony byly použity k získání vyzařovaného hluku z hnacího ústrojí, zatímco tříosé akcelerometry byly přilepeny na povrchy ložiskového bloku převodovky, resp. krytu motoru. S těmito senzory lze dosáhnout zrychlení a hladiny akustického tlaku v časových a frekvenčních oblastech v celém rozsahu otáček.



Obr. 54 Měřicí soustava u experimentu [54]

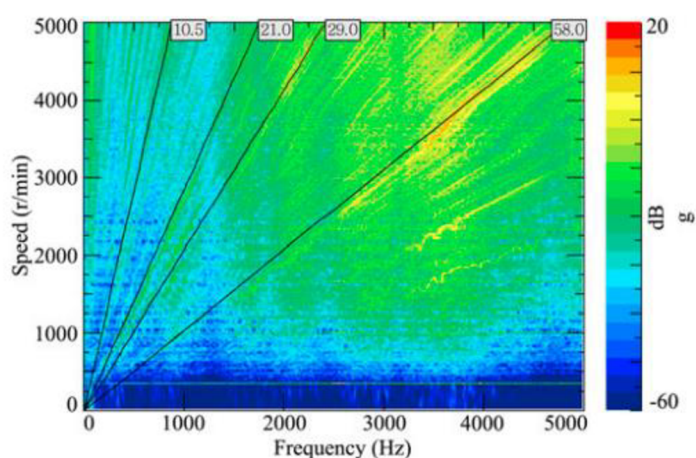
Během tohoto experimentu byl elektromotor napájen z invertoru s frekvencí 10 kHz. K monitorování aktuálního stavu byl využit osciloskop. Kmitočet mikrofону byl nastaven na 24 kHz, takže byl zachycen celý kmitočet a „kvílení“ převodovky.

Fázové proudy ve statorových cívkách generují časově proměnlivé elektromagnetické síly ve vzduchové mezeře mezi statorovými a rotorovými póly. Tyto síly působí na povrch statorových zubů a jsou zodpovědné za většinu akustického hluku v ústrojí. U systémů elektrického pohonu musí být k řízení rychlosti otáčení stejnosměrné napětí převedeno na střídavé napětí pomocí invertoru využívajícího pulsně šířkové modulace (PWM). V důsledku této činnosti se však ve fázovém proudu vytváří harmonické přepínání frekvenčních pásem, což způsobuje dodatečný elektromagnetický hluk. Spínací frekvence zkoumaná v tomto experimentu je 10 kHz, kdy lidské ucho může detekovat elektromagnetický hluk snadno. Bylo dokázáno, že harmonické frekvence přepínání se zvyšují s rychlostí. Vzhledem k tomu, že v rozsahu 4000 – 8000 Hz neexistují téměř žádné harmonické efekty, budou tedy harmonické efekty kolem 10 000 Hz produkovat vysokofrekvenční tonální šum viz. obr. 55.



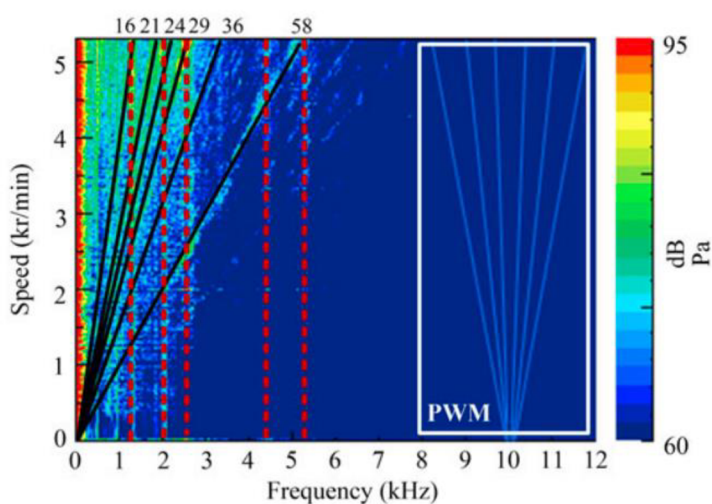
Obr. 55 Vliv PWM [54]

Hluk z převodového ústrojí je považován za hlavní příspěvek hluku elektrického vozidla díky absenci spalovacího motoru. Vibrace v důsledku dynamického síťování ozubených kol jsou přenášeny ozubenými koly, hřídelem a ložisky do krytu, který vyzařuje hluk do okolí. Hluk z převodového ústrojí získaný z vibroakustických zkoušek lze vidět na obr. 56.



Obr. 56 Vibrační spektrogram [54]

Na dalším obr. 57 lze vidět akustické spektrum. Zatěžovací případ odpovídá mechanickým otáčkám o hodnotě 5300 ot/min, což odpovídá mechanické základní frekvenci přibližně 88,3. Kromě toho byly pozorovány i harmonické signály kolem 10 kHz způsobené regulací PWM. I když je velikost PWM šumu nízká, může být tento hluk pro řidiče nepříjemný, neboť lidské ucho je citlivé na vysokofrekvenční hluk. Proto bylo nezbytné zkoumat subjektivní hodnocení.

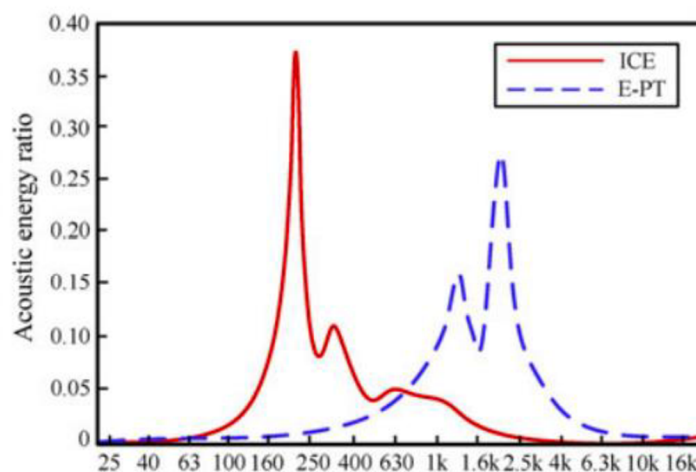


Obr. 57 Akustický spektrogram [54]

Elektromobil byl umístěn na vozidlový dynamometr v bezdozvukové komoře. Vzorky hluku s ustálenými otáčkami v rozmezí od 0 – 5300 ot/min byly získány umělou hlavou umístěnou ve vozidle. Tato umělá hlava poskytla mnohem lepší představu a výsledky z měřených hodnot, než mikrofony, protože bere v úvahu charakteristiku lidského ucha. Aby byly měřené hodnoty řádné kvality, bylo pozváno 21 osob. Všechny osoby byly poučeny ve znalostech subjektivního hodnocení, aby byla zaručena účinnost experimentu. Zvuky byly reprodukovány náhodně prostřednictvím hlasového akustického zesilovače a sluchátek. Každý vzorek hluku či šumu trval v intervalu 5 s. Osoby byly následně požádány o hodnocení jednotlivých vzorků od 1 do 10 stupně, kde 0 znamená pohodlné a 10 znamená nepříjemné. Subjektivní pocity se následně převedly na odpovídající číselnou hodnotu za účelem statistické analýzy. Subjektivní výsledky byly ověřeny pomocí tzv. Kendallova koeficientu, aby byla zaručena správnost další analýzy.

Na závěr se porovnávalo subjektivní hodnocení hluku vydávaného konvenčním vozidlem. Bylo pozorováno, že ve srovnání s elektrifikovaným převodovým systémem, jsou výsledky hodnocení u konvenčního automobilu konzistentnější. Hluk totiž u elektromobilu není subjektům tak známý jako hluk u automobilu se spalovacím motorem. Na druhé straně, ačkoliv celková kvalita zvuku u konvenčního vozidla je horší než u elektromobilu, ve vysokých rychlostech s vyšším zatížením, subjektivní hodnocení elektromobilu není výrazně lepší než u konvenčního automobilu. Toto lze vysvětlit rozložením akustického šumu.

Na obr. 58 lze vidět porovnání akustického výkonu mezi oběma vozidly. Lze vidět, že akustická energie u konvenčního vozidla se koncentruje v oblasti mezi 160 – 400 Hz, zatímco v elektromobilu to je od 1 – 3 kHz. Můžeme tedy konstatovat, že subjektivní hodnocení u elektromobilu v důsledku vysokofrekvenčního šumu není lepší než u hodnocení konvenčního vozidla.



Obr. 58 Porovnání akustického výkonu mezi konvenčním vozidlem a elektromobilem [54]

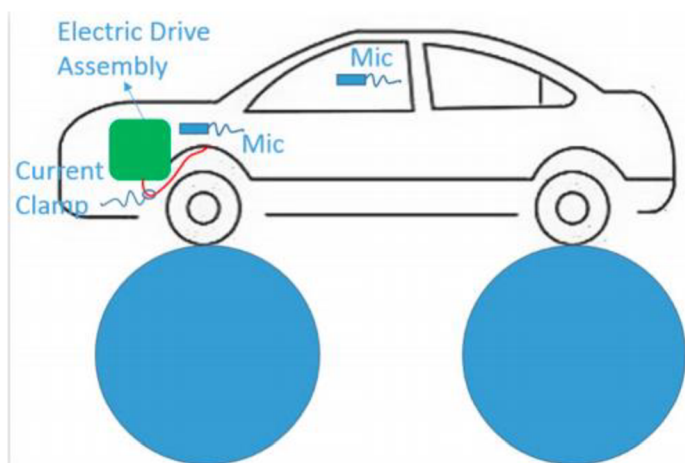
Měření elektromagnetického hluku od elektromotoru u BEV

Jak už bylo zmíněno v kap. 5.1.2, elektromagnetický hluk a vibrace elektromotoru jsou způsobeny elektromagnetickými silami ve vzduchové mezeře mezi statorem a rotorem. Excitace pro generování hluku je radiální excitace, která nemá vliv na provoz motoru, zatímco tangenciální složky slouží k vytvoření točivého momentu. Mnoho parametrů ovlivňuje excitační složky, jako například topologie motoru (počet pólů), tvar pólů, tvar drážek, tvar proudu (sin/cos), excentricita či saturace. Další části textu byly využity ze zdroje [55].

Motor použitý v této měřicí soustavě je třífázový synchronní motor s permanentním magnetem (PMSM). Parametry motoru jsou následující:

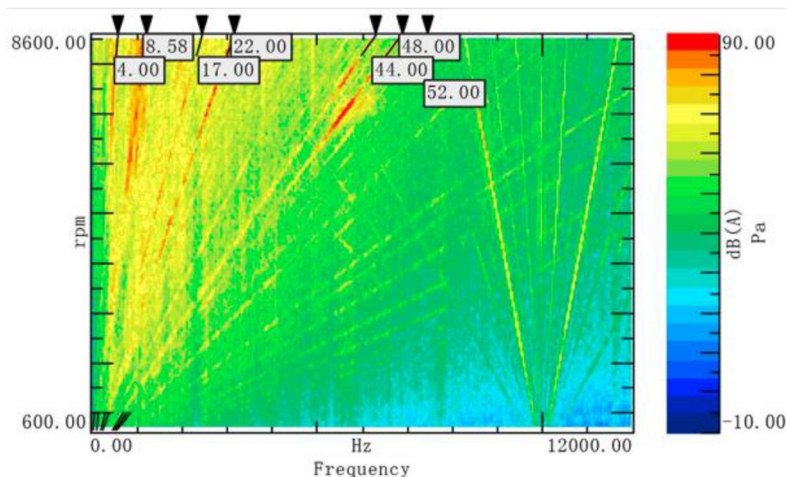
- Výkon: 125 kW
- Točivý moment: 250 Nm
- Maximální otáčky: 12 000 ot/m
- Počet pólů: 8

Při provozu elektromobilu, stejnosměrný proud je neprve konvertován na 3-fázový střídavý proud pomocí invertoru. Vzhledem k vlastnostem invertoru se nejedná o ideální sinusovou vlnu. Na jedné straně, skříň celého systému produkuje hluk, který je přenášen do kabiny vozidla pomocí vzdušné cesty. Na druhé straně, jsou vibrace přenášeny do kabiny pomocí konstrukce vozidla. Předchozí výsledky výzkumu ukázaly, že hluk nad 2000 – 2500 Hz je přenášen vzduchem a pod tuto hodnotu pomocí konstrukce vozidla. Zkušební diagram lze vidět na obr. 59. Zkouška vozidla byla provedena na zkušebním válci v dozvukové místnosti.



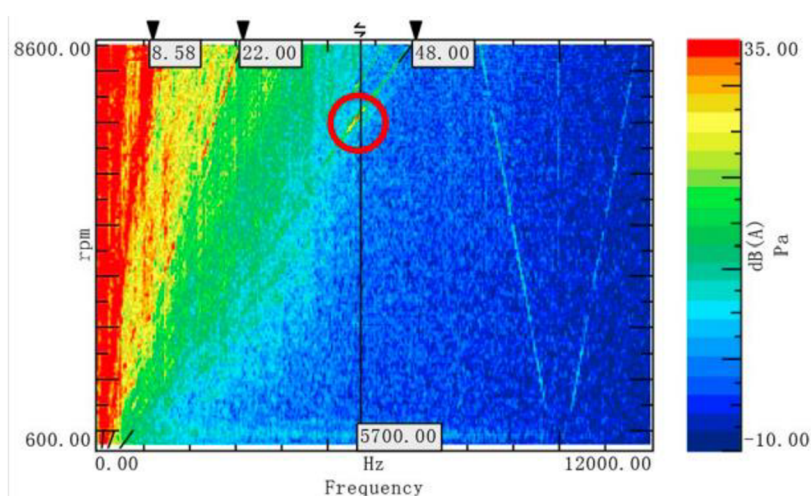
Obr. 59 Měřicí sestava [55]

Vzhledem k tomu, že elektromotor, reduktor a další komponenty neustále pracují, naměřený hluk zahrnuje také rušivé vlivy ostatních komponent převodového ústrojí. Toto lze vidět na obr. 60, kde jsou označeny jednotlivé rušivé elementy.



Obr. 60 Hluk naměřený v blízkosti řídicího systému [55]

Pro porovnání na obr. 61 lze vidět hluk naměřený v interiéru vozidla, kde si lze všimnout méně rušivých elementů.



Obr. 61 Hluk naměřený v interiéru vozidla [55]

6.3 Měření hluku u pneumatik určených pro elektromobil

Jedná se o experiment, který byl proveden na technické univerzitě v Gdaňsku (Technical University of Gdańsk) [56]. Elektromobily určené pro městské využití kladou na pneumatiky jiné nároky než u konvenčních vozidel. Městská vozidla nejsou určena pro vysokorychlostní jízdu a nejsou tak často vystavovány obtížným podmínkám jako je hluboký sníh. Jako další lze zmínit nižší přilnavost pneumatik u elektrovozidel, nižší boční tuhost či odolnost proti opotřebení. Kritický je nízký valivý odpor, což u elektromobilů se projeví jako nevýhody v dojezdu a častějšímu nabíjení elektromobilu. Pro elektromobily platí určité zvláštnosti, které mohou ovlivnit hluk pneumatika – silnice. Bylo provedeno testování několika typů pneumatik a porovnán hluk pneumatika – silnice ve vztahu k ostatním konvenčním pneumatikám na trhu.

Neexistuje jednoznačné řešení, které by vedlo k pneumatice s velmi nízkým valivým odporem, neboť je nutné brát v potaz několik konstrukčních parametrů jako například:

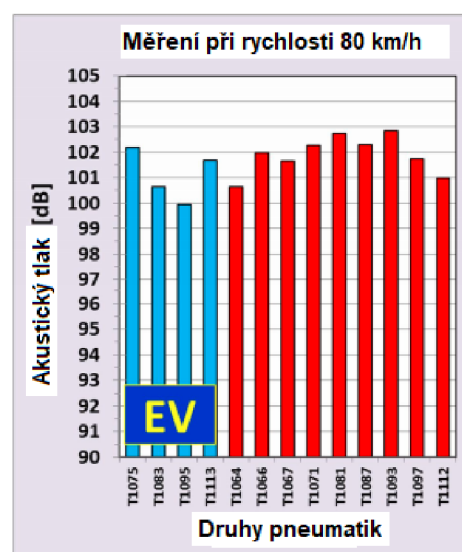
- Velký vnější průměr
- Velká šířka
- Nízký poměr stran
- Sloučeniny tvrdé pryže
- Tenké bočnice pneumatik
- Nízká hloubka dezénu

Měření byla provedena na zařízeních pro silniční kola s bubny o průměru 1,5 m, 1,7 m a 2,0 m. Bubny byly pokryty replikami silničních povrchů reprodukcími strukturu různých silničních povrchů. Během měření byly pneumatiky zatíženy na 3 140 N, nahuštěny na 200 kPa a testy byly prováděny při rychlostech 50, 80 a 100 km/h. K testu byly použity 4 vzory pneumatik pro elektromobily viz. obr. 62 a 9 vzorů tržních pneumatik.



Obr. 62 Pneumatiky vytvořené pro BEV [56]

Výsledky měření se korigovaly k jmenovité teplotě 20 °C a výsledky vztaheny k 80 km/h. Z výsledků vyplynulo, že pneumatiky pro elektromobily způsobují podobný hluk pneumatika – silnice jako pneumatiky využitě u konvenčních vozidel viz. obr. 63. Nejsou ani velmi tiché, ani hlučné, i když se konstrukce a rozměry liší.



Obr. 63 Porovnání pneumatik při rychlosti 80 km/h [56]

7. EXPERIMENT MĚŘENÍ HLUKU A VIBRACÍ

7.1 Příprava měření

Experiment měření hluku a vibrací byl proveden na vozidle zapůjčeném z Ústavu automobilního a dopravního inženýrství. Jedná se o elektromobil Hyundai Kona Electric viz. obr. 64. Vůz je čistě elektrický, kde pohon obstarává synchronní motor s permanentním magnetem. Hyundai Kona Electric disponuje lithium polymerovou baterií a lze dosáhnout maximálního točivého momentu až 395 Nm.

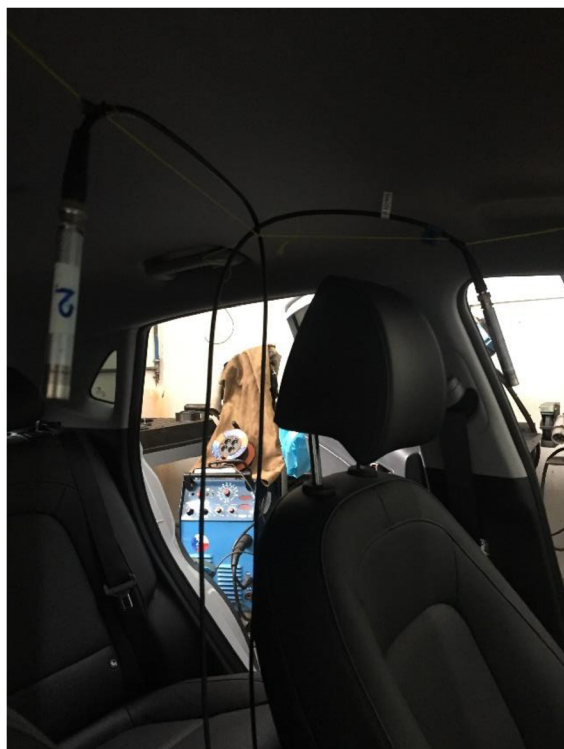


Obr. 64 Hyundai Kona Electric

K měření byly využity tyto snímače:

- 3 mikrofony (MIC1, MIC2, MIC3)
- 1 otáčková sonda (TACHO)
- 6 akcelerometrů (T1, T2, T3, T4, T5, T6)

Umístění 3 mikrofonů lze vidět na obr. 65a, b. Jedná se o pozice na místě jezdce, spolujezdce a u pravého okénka u spolujezdce. Pro měření hluku byly využity tři stejné mikrofony typu s označením 4966. Dynamický rozsah těchto mikrofonů je 14,6 – 20 kHz. Dále bylo využito 6 akcelerometrů umístěných kolem pohonné jednotky. Příklady umístění lze vidět na obr. 66a-f. Akcelerometry byly umístěny tak, aby směr osy x byl ve směru jízdy.



Obr. 65a Umístění mikrofonů na místě jezdce a spolujezdce



Obr. 65b Umístění mikrofonu v úrovni okna



Obr. 66a Umístění akcelerometru T3



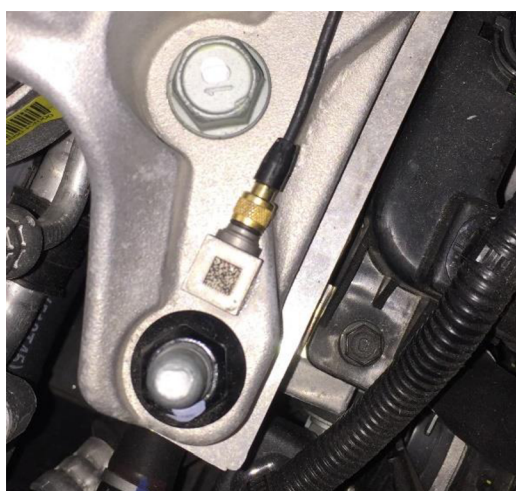
Obr. 66b Umístění akcelerometru T6



Obr. 66c Umístění akcelerometru T2



Obr. 66c Umístění akcelerometru T5



Obr. 66c Umístění akcelerometru T1



Obr. 66c Umístění akcelerometru T4

U jednotlivých akcelerometrů bylo nutné podle kalibračního protokolu nastavit citlivost (směry x , y a z), frekvenční rozsah a dynamický rozsah. Byly využity 2 druhy tříosých akcelerometrů s označením 4528-B a 4528-B-001. Jednotlivé hodnoty snímačů jsou uvedeny níže. Akcelerometry T1, T3 a T5 byly typu 4528-B s vyšším dynamickým rozsahem. Jedná se o maximální rozsah špičkových vibrací (peak), které může akcelerometr měřit s malým zkreslením.

Typ 4528-B

Dynamický rozsah: 714 g

Frekvenční rozsah [kHz]: $x = 0,3 - 10$, $y = 0,3 - 10$, $z = 0,3 - 12,8$

Citlivost [mV/ms^{-2}]: $x = 0,9745$, $y = 0,9929$, $z = 0,9757$

Typ 4528-B-001

Dynamický rozsah: 71 g

Frekvenční rozsah [kHz]: $x = 0,20 - 5,5$, $y = 0,25 - 3$, $z = 0,25 - 3$

Citlivost [mV/ms^{-2}]: $x = 9,466$, $y = 10,04$, $z = 9,586$

Otáčková sonda a její umístění lze vidět na obrázcích. 67 a 68. Jedná se o sondu s označením 2981 s laserovým měřením. Všechna zařízení použitá k měření jsou od dánské firmy Brüel and Kjaer.



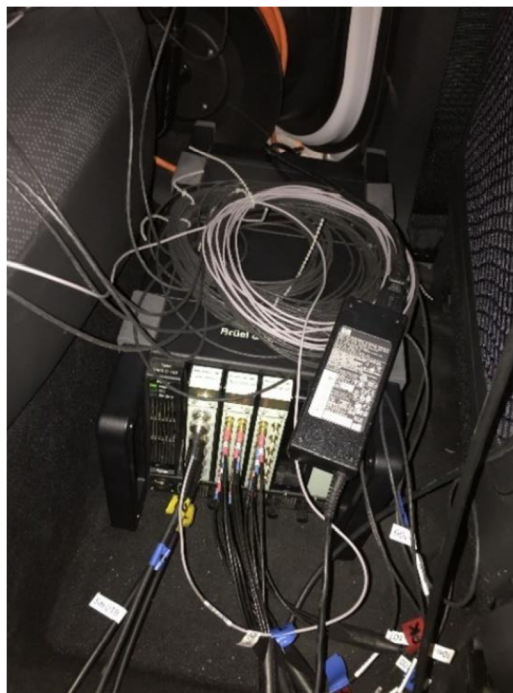
Obr. 67 Otáčková sonda



Obr. 68 Umístění otáčkové sondy

Následovalo propojení snímačů koaxiálními kabely s hlavním analyzátozem viz. obr. 69. Dále bylo nutné v softwaru *BK Connect*, který byl následně využíván k měření, nastavit jednotlivé vstupy a správně propojit s jednotlivými snímači.

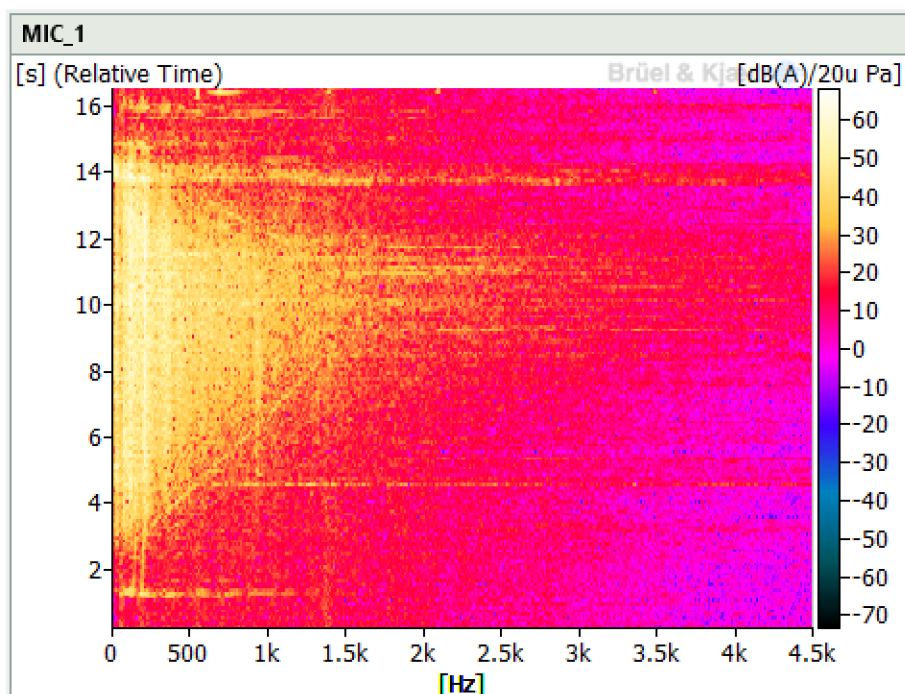
Po celkovém nastavení systému a přípravách se přešlo k měření hluku a vibrací. Měření bylo provedeno pro tři jízdní módy: Eco, Comfort a Sport. Pro každý jízdní mód se měřily dvě rychlostní rovinky a jeden okruh v areálu školy. Pro frekvenční analýzu byl vybrán mód Comfort.



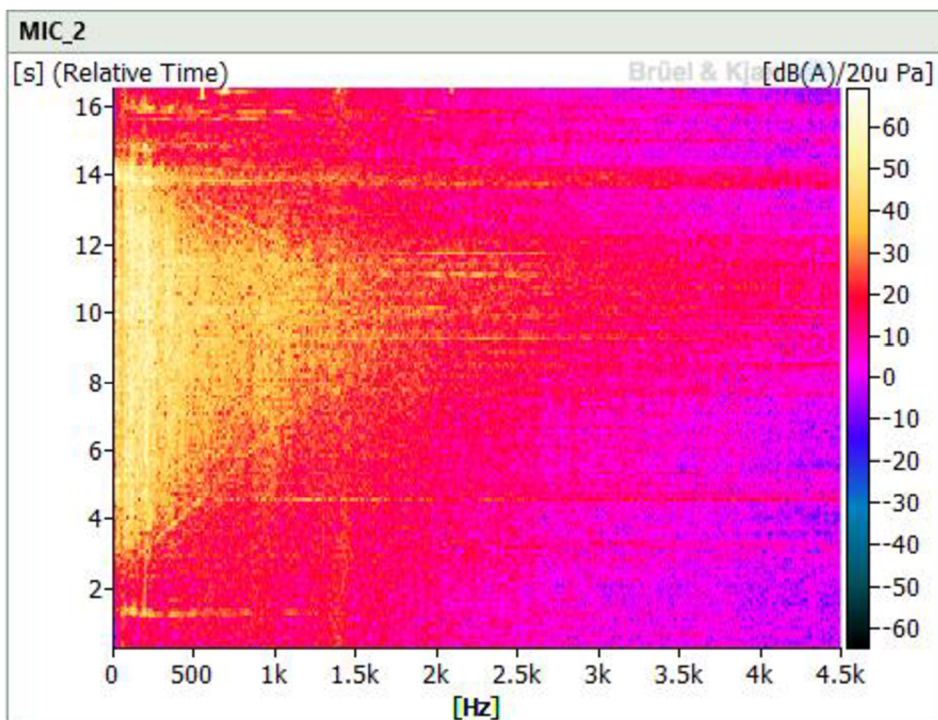
Obr. 69 Propojení analyzátoru se snímači

7.2 Analýza mikrofónů

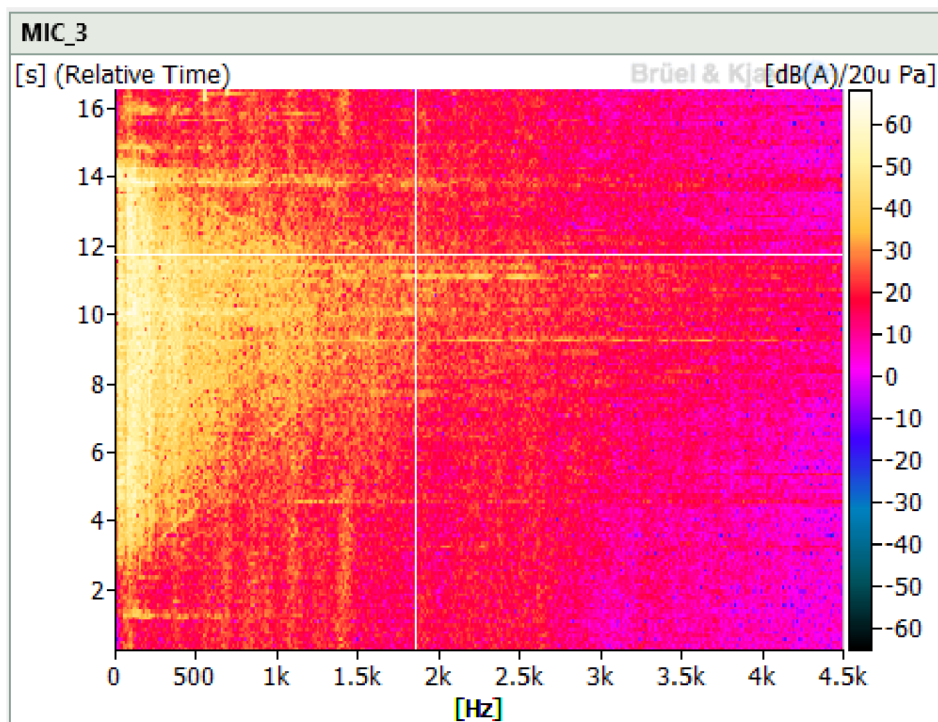
- Naměřené hodnoty mikrofónů při jízdě na rovince



Obr. 70a MIC1

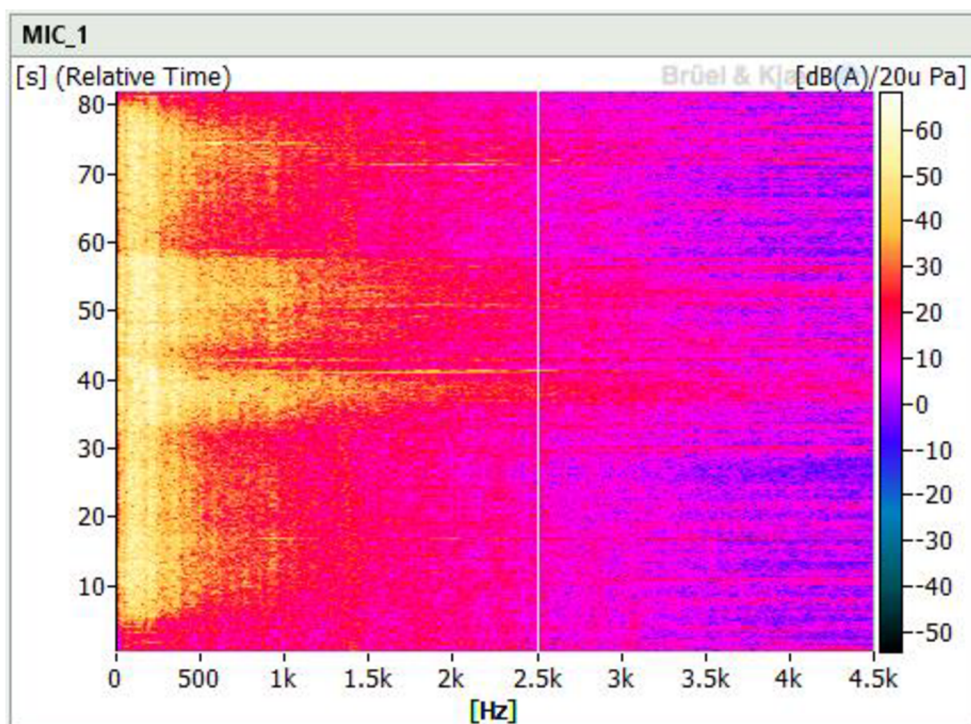


Obr. 70b MIC2

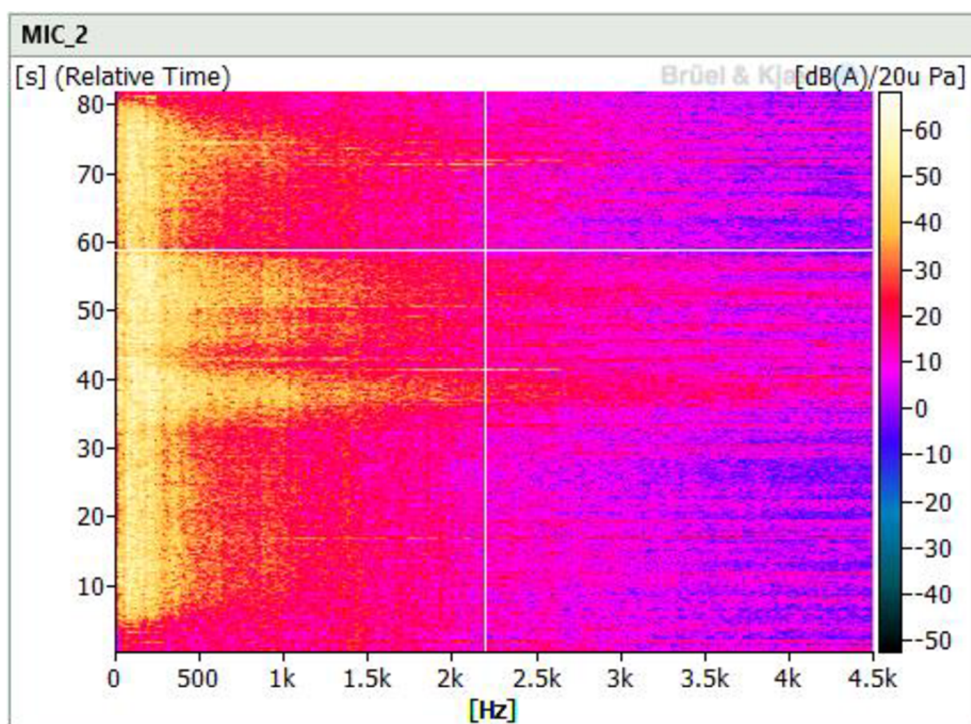


Obr. 70c MIC3

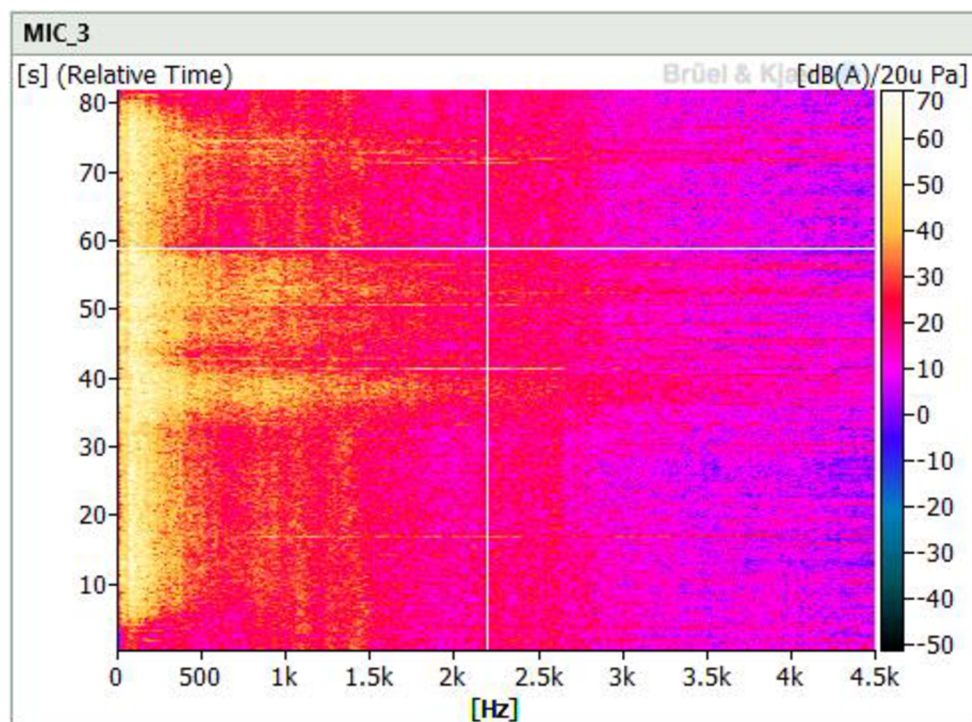
- Naměřené hodnoty mikrofónů při jízdě po areálu



Obr. 71a MIC1



Obr. 71b MIC2



Obr. 71c MIC3

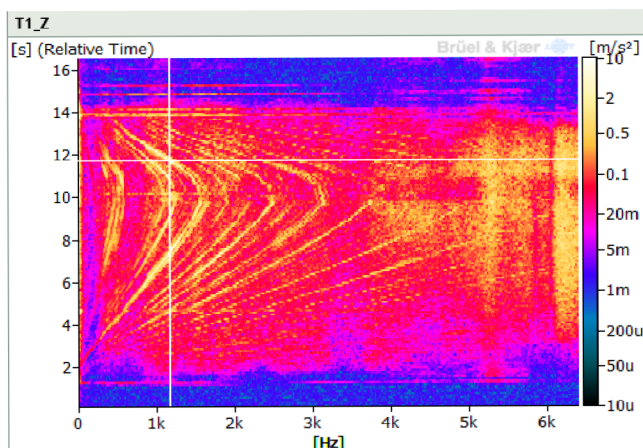
- **Zhodnocení měření mikrofonů**

Při jízdě po rovince, kdy se jednalo o zrychlení automobilu, i po areálu se analýza provedla nejprve pro 20 kHz a poté pro 4,5 kHz pro zpřesnění výsledků. Měření na rovince trvalo 16 vteřin a ukázalo se, že silné hodnoty hluku se projevují do 2 kHz pro mikrofony s označením MIC1 a MIC2, přičemž pro mikrofon MIC3 se tato hodnota pohybuje až do 2,5 kHz. Nejintenzivněji se hluk projeví v rozmezí od 10 – 450 Hz s hodnotami až do 65 dB viz. obr. 70a-c. Dále si lze povšimnout, že v rozsahu 100 – 450 ot/min, je slyšet tonální hluk od elektromotoru.

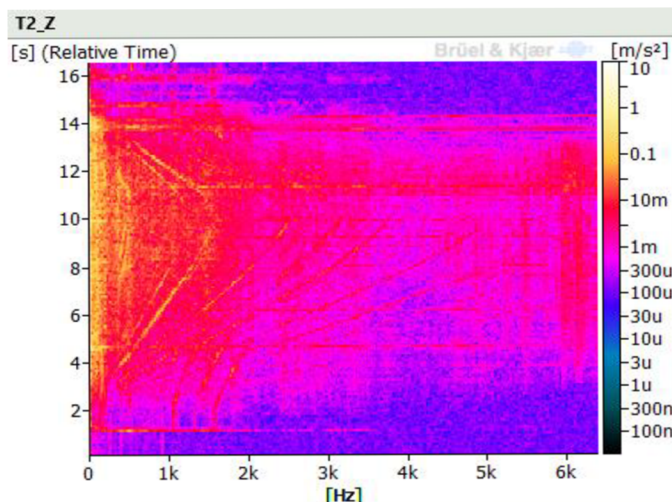
Z analýzy jízdy po areálu si lze všimnout jednotlivých hlukových extrémů, které se pohybují v některých případech až do hodnot 2,5 kHz. Toto může být způsobeno například zrychlením automobilu či nárazy při měření do ucha jezdce popřípadě spolujezdce. Pro mikrofony MIC1 a MIC2 se hodnoty hluku pohybují do 65 dB, ale u MIC3 si lze povšimnout zvýšených hodnot až k 70 dB pravděpodobně vlivem aerodynamického hluku způsobeným změnou tlaku. Musíme také v obou případech vzít v úvahu vliv nerovnosti vozovky, což se projeví následným zesílením v interiéru vozidla. Hodnoty všech mikrofonů bylo nutné vážit filtrem A.

7.3 Analýza akcelerometrů

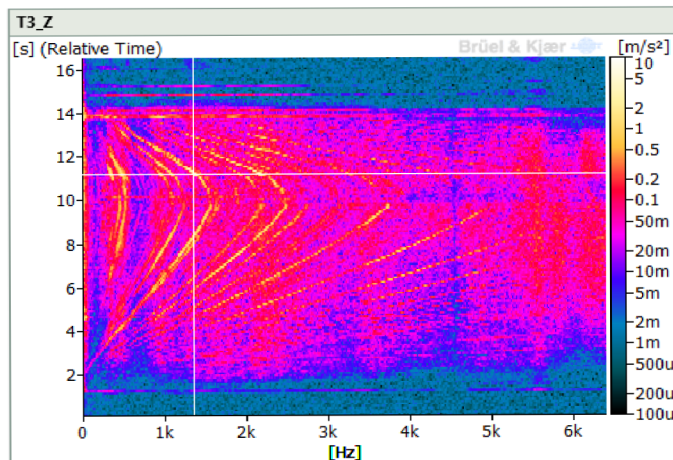
- Naměřené hodnoty akcelerometrů pro rovinku



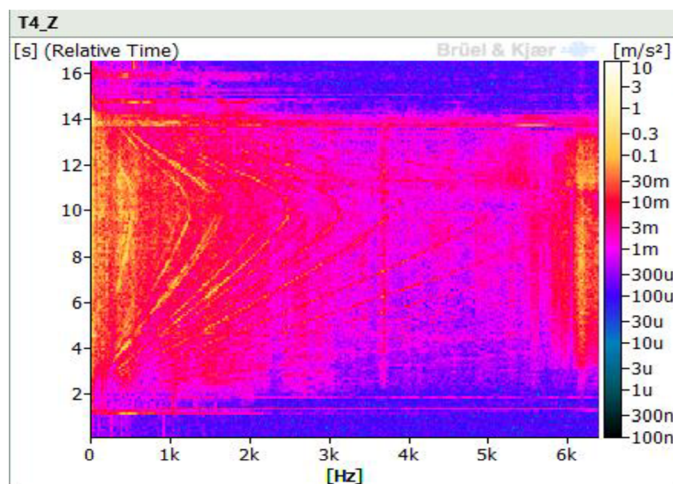
Obr.72a T1z



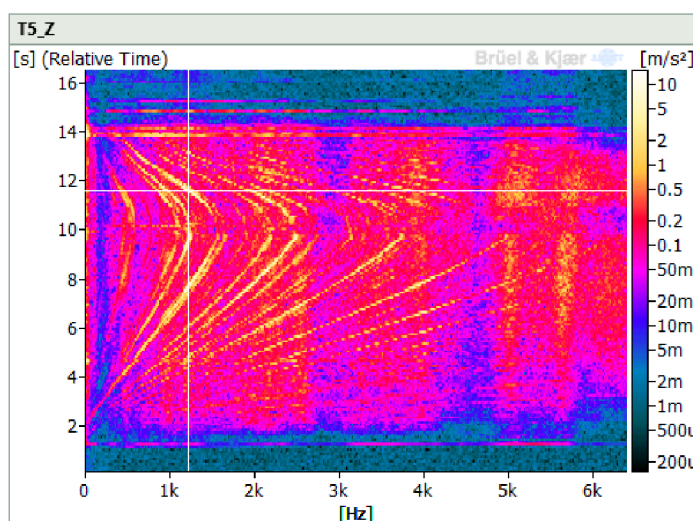
Obr. 72b T2z



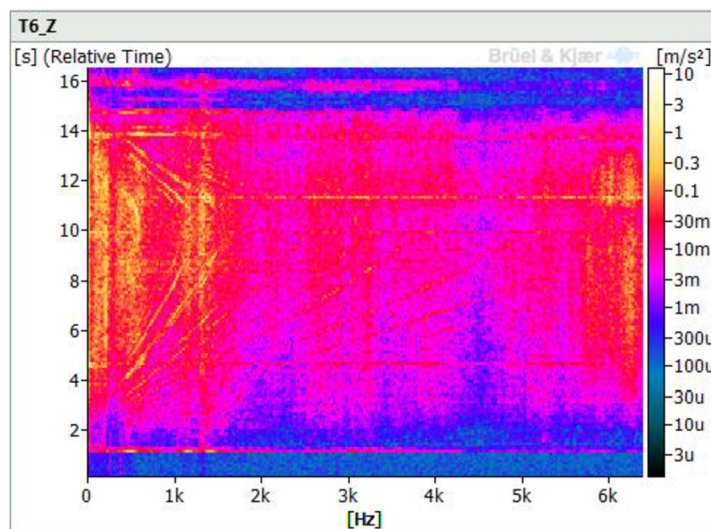
Obr. 72c T3z



Obr. 72d T4z

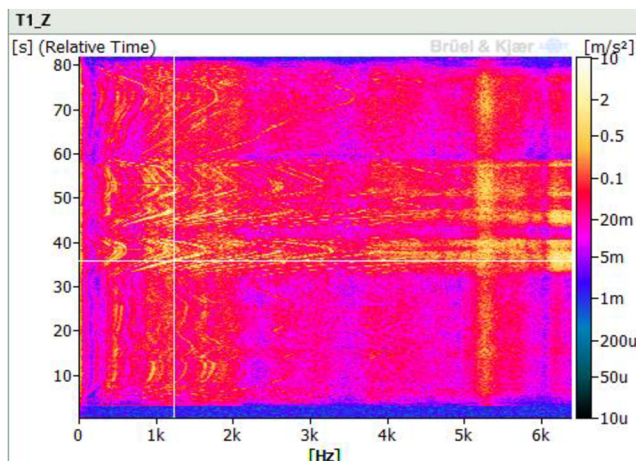


Obr. 72e T5z

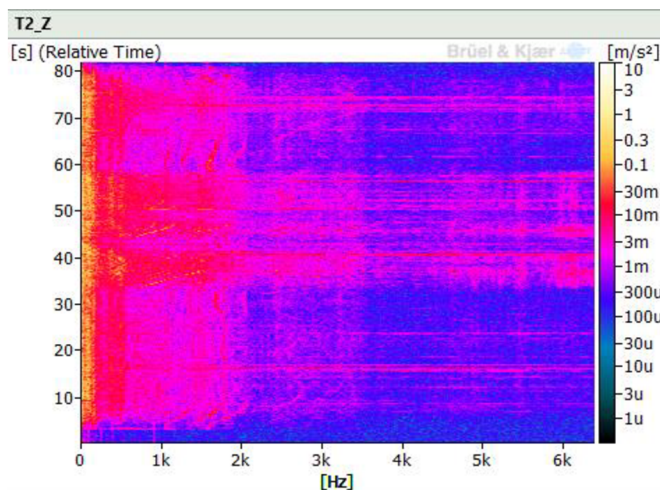


Obr. 72f T6z

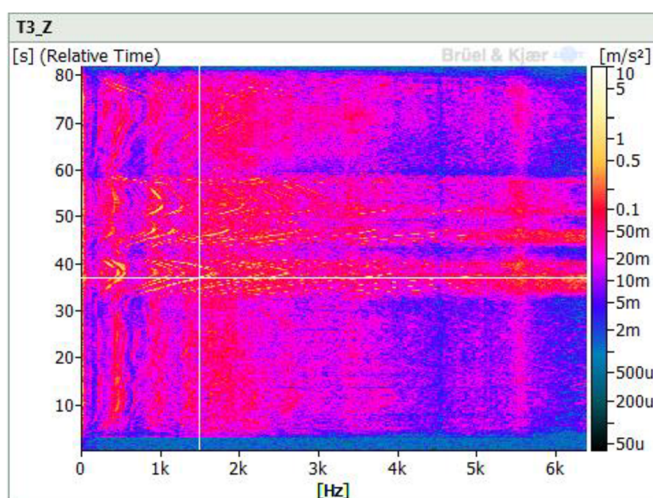
- Naměřené hodnoty akcelerometrů pro areál



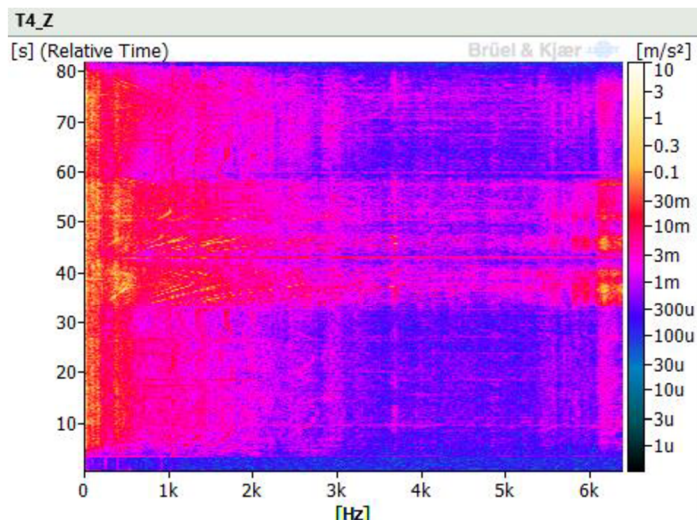
Obr. 73a T1z



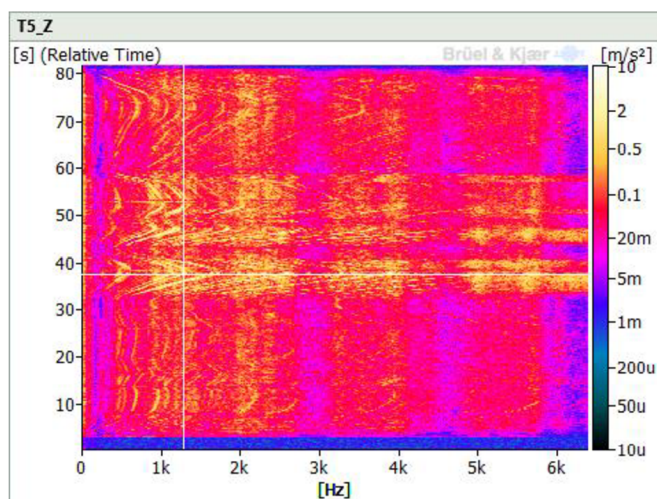
Obr. 73b T2z



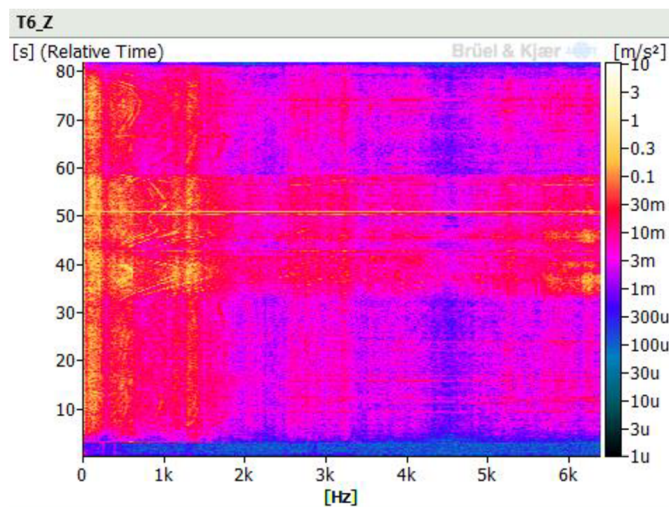
Obr. 73c T3z



Obr. 73d T4z



Obr. 73e T5z



Obr. 73f T6z

- **Zhodnocení měření akcelerometrů**

Měření akcelerometrů probíhalo v rozmezí do 6,4 kHz jak při měření na rovince, tak při jízdě v areálu. Jednotlivé výsledky byly hodnoceny ve směru jízdy, tedy v ose x . Pro analýzu a porovnání byly vybrány akcelerometry s vyšším dynamickým rozsahem, tedy T1, T3 a T5. Na obr. 72a lze vidět maximální hodnotu vibrací o velikosti $7,99 \text{ m/s}^2$. U akcelerometru T3 se maximální hodnota pohybuje okolo hodnoty 4 m/s^2 a akcelerometru T5 je to dokonce $14,7 \text{ m/s}^2$ viz. příložené obrázky. Při jízdě po areálu bylo pro T1 naměřeno $4,5 \text{ m/s}^2$, pro T3 $2,9 \text{ m/s}^2$ a nakonec pro T5 opět $2,9 \text{ m/s}^2$ viz. příložené obrázky.

Když porovnáme hodnoty akcelerometrů při jízdě po rovince a v areálu, všimneme si, že se hodnoty liší z důvodu stylu jízdy, neboť při první jízdě se jednalo o rychlou akceleraci vozidla. Na druhé straně jízda v areálu byla klidná s postupným zrychlením na rovinkách. Vibrace byly způsobeny silničními nerovnostmi a také vibracemi od elektromotoru vlivem ekcentricity a záběrem ozubených kol.

ZÁVĚR

Vzhledem k významnému vývoji v oblasti elektromobility ve světě za účelem snížení globálních emisí je stále více kladen důraz na pohodlí řidiče při jízdě v elektromobilu. Na rozdíl od automobilů se spalovacím motorem došlo totiž u elektromobilů k zásadní transformaci pohonného systému, tudíž z pohledu NVH nastaly nové výzvy k řešení souvisejících problémů týkajících se vibrací a hluku.

Automobil se spalovacím motorem obsahuje více než 90 % pohyblivých částí, což u elektromobilu je to mnohem menší procento. Hlasitý spalovací motor a složitá několika stupňová převodovka byly nahrazeny elektronickou řídicí jednotkou, elektromotorem a konstrukčně výrazně jednodušší převodovkou.

Vlivem použití řídicí elektroniky je komfort jezdce poznamenán vysokofrekvenčním tonálním hlukem použité elektroniky, kde významným přispěvovatelem je invertor, který využívá pulsně šířkovou modulaci neboli PWM. Hluk vyvolaný u elektromotoru je z velké části způsoben elektromagnetickými silami, které jsou vyvolány nerovnoměrnou vzduchovou mezerou mezi státorem a rotorem vlivem výrobní nepřesnosti. Hluk od převodového ústrojí se projeví vibracemi převodové skříně. Nejvýraznější podíl má na tomto hluku vliv chyba převodu, kdy se následné vibrace přenáší přes ložiska, hřídel až do samotné konstrukce vozidla. Do popředí, díky absenci spalovacího motoru, se tak dostaly zvukové vjemy spojené s vlivem proudění vzduchu kolem vozidla a také vliv styku s vozovkou pomocí pneumatik.

U elektromobilu BEV se také podstatně projeví vliv systému HVAC například u chlazení baterie či u topení a chlazení v interiéru vozidla. Na rozdíl od automobilu se spalovacím motorem se u elektromobilu setkáme také s hlukem spojeným s nabíjením vozidla vlivem elektrochemických procesů.

Dalším cílem práce bylo ukázat některé experimenty, které se používají při vývoji elektrovozidla. Byly vybrány experimenty z oblasti návrhu aerodynamiky vozidla, měření a analýza pohonného systému a porovnání pneumatik určených pro elektromobil a klasický spalovací vůz.

Experimenty s aerodynamikou ukazují, jak je důležité snižovat koeficient odporu. Díky ploché baterii na podvozku vozidla, již nedochází k časté separaci proudění a změně tlaku. Výraznou změnou si prošli zrcátka či disky kol, které přispívají ke ztrátám při proudění.

Na experimentech s převodovým ústrojím bylo ukázáno, jak je důležité snižovat hmotnost celého systému s využitím materiálů s vyšší tuhostí a tlumícími účinky. Dále byl pohonný systém pozusovanám experimentálně s následným subjektivním hodnocením. Ukázalo se, že akustická energie u elektromobilu se koncentruje v rozsahu jednotek kHz, což se projevívá v subjektivním hodnocení.

Změnou si musely projít též pneumatiky, kde došlo ke zvětšení průměru pneumatiky či použití tvrdé pryže. Testy byly prováděny s několika sadami pneumatiky pro konvenční vozidla na testovacím bubnu. Bylo zjištěno, že pneumatiky pro elektromobil nejsou v porovnání s klasickými ani velmi tiché či hlučné, i když došlo ke změně konstrukce a rozměrů.

V závěru byl proveden experiment na elektromobilu Hyundai Kona Electric. Testy byly prováděny pro tři jízdní režimy a to při zrychlení na rovince a jízdě v areálu školy. Pro analýzu výsledků byl vybrán mód Comfort.

V závěru byl proveden experiment na elektromobilu Hyundai Kona Electric. Testy byly prováděny pro tři jízdní režimy a to při zrychlení na rovince a jízdě v areálu školy. Pro analýzu výsledků byl vybrán mód Comfort. Při jízdě po rovince i při okružní jízdě byl interní hluk v rozmezí od 60 – 70 dB. Při jízdě v obou případech se projevil aerodynamický hluk a hluk vlivem nerovnosti vozovky. Dále bylo zjištěno, že v rozmezí 100 – 450 ot/min je intenzivně slyšet tonální hluk od elektromotoru do doby, než je potlačen aerodynamickým hlukem. Vliv nerovnosti vozovky či vibrace od elektromotoru se následně projeví v analýze vybraných akcelerometrů. Hluk u elektromobilu je tedy nižší než u konvenčního vozidla, ale jak už bylo zmíněno, projeví se jiné hlukové elementy.

Pro lepší analýzu vibrací a hluku by bylo dobré v budoucnu například využít více snímačů vibrací v interiéru vozidla například na A-sloupky či palubní desku za účelem snímání vibrací přenášených přes konstrukci vozidla. Pro určení zdroje akustického signálu by nebylo špatné také využít akustickou kameru či intenzitní snímače. Zda-li je elektromobil tišší než konvenční vůz, k měření a analýze by měl být automobil se spalovacím motorem zahrnut k následné komparaci.

Použité informační zdroje

- [1] Vědecké okénko, 2011. <https://elektrickevozy.cz/> [online]. Praha: ArteMan, 2011 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z: <https://elektrickevozy.cz/clanky/vedecke-okenko-na-ceste-do-historie-elektromobility-dil-1-aneb-jak-to-vsechno-zacalo>
- [2] *Stručná historie elektromobilů* [online], 2015. Sedlec-Prčice: Asociace pro elektromobilitu České republiky [cit. 2020-12-12]. Dostupné z: <http://www.elektromobily-os.cz/stru%C4%8Dn%C3%A1-historie-elektromobilu>
- [3] Vývoj prodeje elektromobilů, 2019. In: <https://www.vox.com/> [online]. USA: Vox [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://www.vox.com/energy-and-environment/2019/6/18/18681591/renewable-energy-china-solar-pv-jobs>
- [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] SANDÉN, Björn a Pontus WALLGREN. *SYSTEMS PERSPECTIVES ON ELECTROMOBILITY*. Göteborg: Chalmers University of Technology, 2014. ISBN 978- 91-980973-9-9
- [6] *The 10 most popular electric vehicles* [online]. [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: <https://www.businessinsider.com/10-best-most-popular-used-electric-cars-vehicles-tesla-2020-10>
- [7] MIŠKOVSKÝ, Ondřej, 2011. Typy elektromobilů a jak je rozeznat. <https://elektrickevozy.cz/> [online]. Praha: ArteMan [cit. 2020-12-12]. Dostupné z: <https://elektrickevozy.cz/clanky/typy-elektromobilu-a-jak-je-rozeznat>
- [8] ŠKODA AUTO [online]. Mladá Boleslav: ŠKODA AUTO, 1895 [cit. 2020-12-12]. Dostupné z: <https://www.skoda-auto.cz/>
- [9] BĚLOUŠEK, Ondřej. *Užití převodových ústrojí u elektromobilů*. Brno, 2020. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 60 s. Vedoucí práce Ing. Kamil Řehák, Ph.D.
- [10] *Electric Car Components and Functions*. Omazaki [online]. Banten, Indonesia: PT. Omazaki Envirokal Prakarsa [cit. 2020-11-01]. Dostupné z: <https://www.omazaki.co.id/en/electric-vehicle-components/>

- [11] Jak pracují elektromobily, 2020. <https://www.edfenergy.com/> [online]. USA: EDF [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://www.edfenergy.com/for-home/energywise/how-do-electric-cars-work>
- [12] *Výhody elektromobilu* [online], 2020. USA: x-engineer.org [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://x-engineer.org/>
- [13] Electric vehicle NVH challenges: The mindset and tools you will need, 2019. *SIEMENS blog* [online]. USA: Siemens blog [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://blogs.sw.siemens.com/simcenter/electric-vehicle-nvh-challenges-the-mindset-and-tools-you-will-need/>
- [14] SMETANA, Ctirad, 1998. *Hluk a vibrace: Měření a hodnocení*. 1. Praha: Sdělovací technika. ISBN 80-90 1936-2-5
- [15] WAGNEROVÁ, K. Určení hladin akustického výkonu tepelného zařízení stanovením akustické intenzity. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 111 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D..
- [16] *Jak funguje a k čemu slouží akcelerometr?* [online], 2020. ČR: Electronic Components [cit. 2021-01-01]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/news/library-articles/page/22568/jak-funguje-a-k-cemu-slouzi-akcelerometr/#Co-to-jest-akcelerometr>
- [17] *Principy akcelerometrů* [online], 2007. ČR: Automatizace.hw.cz [cit. 2021-01-01]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2007011401>
- [18] *Použití sondy intenzity* [online], 2020. Liberec: Ekosoftware [cit. 2021-01-01]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/pouziti-sondy-intenzity>
- [19] *Zvukoměr* [online], 2020. Liberec: Ekosoftware [cit. 2021-01-01]. Dostupné z: <https://www.ekosoftware.cz/zvukomer>
- [20] *Zvukoměry - změnilo se jen všechno*, 2019. *SVM tech* [online]. Praha: SVM tech [cit. 2021-01-01]. Dostupné z: <https://www.svmtech.cz/cz/zvukomery-zmenilo-se-jen-vsechno>
- [21] *An introduction to Transfer Path Analysis* [online], 2019. 5800 Granite Parkway, Suite 600, Plano, TX 75024 USA: Siemens [cit. 2021-01-01]. Dostupné z: <https://community.sw.siemens.com/s/article/an-introduction-to-transfer-path-analysis>
- [22] *EV Powertrain Components* [online], 2019. USA: EVreporter [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://evreporter.com/ev-powertrain-components/>
- [23] Hybrid and Plug-In Electric Vehicles, 1991. <https://afdc.energy.gov/> [online]. USA: U.S. Department of Energy [cit. 2020-12-28]. Dostupné z: <https://afdc.energy.gov/vehicles/electric.html>

- [24] DAVID, Jan. *NVH převodového ústrojí pro elektromobily*. Brno, 2020. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 71 s. Vedoucí práce Kamil Řehák.
- [25] *Noise and vibration of electric machines* [online], 2019. USA: Technology [cit. 2021-01-01]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/sustenergy/noise-and-vibration-of-electric-motors>
- [26] *External rotor motor basics* [online], [cit. 2021-01-01]. Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/external-rotor-motor-basics-design-applications/>
- [27] *Winding* [online], 2012. ETH Zurich: Research Gate [cit. 2021-01-01]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/229033859_Motor_Torque_and_Magnetic_Levitati_on_Force_Generation_in_Bearingless_Brushless_Multipole_Motors
- [28] BEKKER, Anriëtte. Influences of Electric Propulsion on Vehicle Vibro-acoustics. R & D Journal of the South African Institution of Mechanical Engineering [online]. 2014, (30), 47-54 [cit. 2019-10-16]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Influencesof-Electric-Propulsion-on-VehicleBekker/3990a25604f6c1c18578d244e48e0638a2079aa8>
- [29] BRAUER, Samuel. High Speed Electric Vehicle Transmission [online]. 2017 [cit. 2019-10-04]. Dostupné z: <http://www.divaportal.org/smash/get/diva2:1131147/FULLTEXT01.pdf>. Master thesis. Karlstad University, Faculty of Health, Science and Technology.
- [30] Chyba převodu evolventního ozubení, její měření a její vztah k hluku a vibracím převodovek, Katedra Částí a mechanismů strojů, Fakulta strojní, VŠB-TU Ostrava, 80 stran, 74 obrázků, 6 tabulek. Školitel: doc. Ing. Zdeněk Folta, Ph.D.
- [31] DOČKAL, Aleš. Konstrukční optimalizace ozubené převodovky s ohledem na snižování hlukové emise [online]. Brno, 2003 [cit. 2019-10-11]. Dostupné z: http://ustavkonstruovani.cz/FileDownload/getFile/214/16_teze.pdf/. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.
- [32] PROKOP, Aleš. Modelování vibrací pohonných jednotek aplikací virtuálních prototypů [online]. Brno, 2016 [cit. 2019-10-15]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=137723. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství.
- [33] Toyo Tires. *Tire Cavity Noise* [online]. [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: <https://www.toyotires-global.com/corporate/>
- [34] *WHAT IS BRAKE NOISE?* [online]. Ferodo [cit. 2020-09-15]. Dostupné z: <https://www.ferodo.com/support/light-vehicles/technical-tips/Brake-Noise.html>

- [35] Daniel J. O' Boy, Automotive wheel and tyre design for suppression of acoustic cavity noise through the incorporation of passive resonators, *Journal of Sound and Vibration* [online], cit. [2020-12-05]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.115037>
- [36] *Wind Noise Testing*. [online]. [cit. 2020-11-02]. Dostupné z: <https://www.grasacoustics.com/industries/automotive/wind-noise-aeroacoustics>
- [37] ŠOB, František, 2008. *Hydromechanika*. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 978-80-214-3578-0.
- [38] *Hydromechanické procesy*. [online]. [cit. 2020-10-25]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/1006304-Hydromechanicke-procesy-obtekani-teles.html>
- [39] LASOTA, M. Aplikace bezdozvukových komor. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 55 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Aleš Prokop
- [40] VESELÝ, Oldřich. Metodika měření hluku. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, 2009. 89 s. Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Jiřímu Stodolovi, DrSc.
- [41] GAJDOŠ, P. Akustické zkušební komory. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 50 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ivan Mazůrek, CSc.
- [42] *The Audio Chambers of DTU, Denmark*. Alastairphilipwiper [online]. 2021 [cit. 2021- 05-08]. Dostupné z: <http://alastairphilipwiper.com/blog/audio-chambers-dtu/>
- [43] *Anechoic Chamber* [online]. [cit. 2020-10-08]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Echo_chamber
- [44] *Akustická kamera* [online]. [cit. 2020-10-15]. Dostupné z: <https://www.svmtech.cz/cz/akusticka-kamera>
- [45] *Akustická kamera NL Acoustics* [online]. [cit. 2020-11-22]. Dostupné z: <https://www.tmvss.cz/vyrobci/tmv-ss/akusticka-kamera-nl-acoustics>
- [46] A. Diez-Ibarbia, M. Battarra, J. Palenzuela, G. Cervantes, S. Walsh, M. De-la-Cruz, S. Theodossiades, L. Gagliardini, Comparison between transfer path analysis methods on an electric vehicle, *Applied Acoustics* [online], [cit. 2020-10-25] doi: doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.11.015. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X1630514X>
- [47] Albers, A., Bopp, M., and Behrendt, M., “Efficient Cause and Effect Analysis for NVH Phenomena of Electric Vehicles on an Acoustic Roller Test Bench,” *SAE Technical Paper* 2018-01-1554, 2018, doi:10.4271/2018-01-1554
- [48] *Hybridní pohony aneb není hybrid jako hybrid* [online]. [cit. 2021-26-01]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/hybridni-pohony-aneb-neni-hybrid-jako-hybrid-cim-se-lisi-plug-in-hybrid-od-mild-hybridu-a-full-hybridu-123123>

- [49] Zhang, Zhong-hua & Xu, Yan-hai & Ju, Dao-jie & Qiao, Xu-qiang. (2017). Study on the Fluctuating Pressure and Aerodynamic Noise at Car Rearview Mirror Zone: Selected Papers from CSMA2016. 10.1515/9783110584998-051.
- [50] *What is the best cooling system for electric vehicle battery packs* [online]. [cit. 07.02. 2021]. Dostupné z: <https://avidtp.com/what-is-the-best-cooling-system-for-electric-vehicle-battery-packs/>
- [51] *Cooling electric vehicle* [online]. [cit. 06. 02. 2021]. Dostupné z: https://www.dober.com/electric-vehicle-cooling-systems#electric_vehicle_thermal_management_system
- [52] Barth, T., Fischer, A., Hähnel, M. *et al.* The Aerodynamics of the VW ID.3 Electric Car. *ATZ Worldw* **122**, 48–53 (2020). <https://doi.org/10.1007/s38311-020-0270-5>
- [53] Ultra-Lightweight Design of a Single Speed EV Transmission [online]. [cit. 19. 02. 2021]. Dostupné z: <https://www.drivesystemdesign.com/wp-content/uploads/2019/12/DSD-Ultra-Lightweight-Design-of-a-Single-Speed-Transmission-CTI-Berlin-Dec-2017.pdf>
- [54] Y. Fang and T. Zhang, "Sound Quality Investigation and Improvement of an Electric Powertrain for Electric Vehicles," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 2, pp. 1149-1157, Feb. 2018, doi: 10.1109/TIE.2017.2736481
- [55] Kang, Q., Gu, P., Gong, C., and Zuo, S., "Test and Analysis of Electromagnetic Noise of an Electric Motor in a Pure Electric Car," SAE Technical Paper 2019-01-1492, 2019, doi:10.4271/2019-01-1492
- [56] Ejsmont, Jerzy, Świeczko-Żurek, Beata, Taryma, Stanisław, Mioduszewski, Piotr. (2015). Noise Generated by Tyres Designet for Electric Vehicles - Results of Laboratory Experiments. *Euronoise 2015 Maastricht, Proceedings Of Euronoise 2015*, 1327-1331
- [57] Šíření zvuku ve volném prostoru [online]. [cit. 16.3.2021]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/akustika-staveb/222-sireni-zvuku-ve-volnem-prostoru-volne-zvukove-pole>
- [58] Albers, A., Fischer, J., Landes, D., and Behrendt, M., "Method for Measuring and Analyzing the Transfer Path of Acoustic Phenomena into the Driver Cabin of a Battery Electric Vehicle," *SAE Int. J. Engines* 7(3):2014, doi:10.4271/2014-01- 2071.
- [59] Albers, A., Fischer, J., Behrendt, M. *et al.* Measurement and Interpretation of the Transfer Path of an Acoustic Phenomenon in the Drivetrain of an Electric Vehicle. *ATZ Worldw* **116**, 48–55 (2014). <https://doi.org/10.1007/s38311-014-0154-7>

Seznam použitých zkratek, symbolů a veličin

<i>BEV</i>	[-]	Battery Electric Vehicle
<i>HEV</i>	[-]	Hybrid Electric Vehicle
<i>FCEV</i>	[-]	Fuel Cell Electric Vehicle
<i>NVH</i>	[-]	Noise Vibration Harshness
<i>ZEV</i>	[-]	Zero Emission Vehicle
<i>TPA</i>	[-]	Transfer Path Analysis
<i>p</i>	[Pa]	akustický tlak
<i>p₀</i>	[Pa]	hodnota referenčního tlaku
<i>p_b</i>	[Pa]	barometický tlak
<i>P</i>	[W]	akustický výkon
<i>v</i>	[m.s ⁻¹]	rychlost kmitajících částic
<i>S</i>	[m ²]	plocha
<i>I</i>	[W.m ⁻²]	akustická intenzita
<i>Z</i>	[Ns/m ³]	impedance
<i>c</i>	[m.s ⁻¹]	rychlost zvuku
<i>L_W</i>	[dB]	hladina akustického výkonu
<i>L_I</i>	[dB]	hladina akustické intenzity
<i>L_P</i>	[dB]	hladina akustického tlaku
<i>A</i>	[dB]	hodnota porovnávané veličiny
<i>A₀</i>	[dB]	hodnota referenční veličiny
<i>OF</i>	[-]	Operational Force
<i>TF</i>	[-]	Transfer Function
<i>ICE</i>	[-]	Internal Combustion Engine
<i>f</i>	[Hz]	frekvence

<i>TE</i>	[-]	Transmission Error
<i>CFD</i>	[-]	Computational Fluid Dynamics
<i>ÚADI</i>	[-]	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
<i>PIV</i>	[-]	Particle Imaging Velocimetry