VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

NVH PROBLEMATIKA ELEKTROVOZIDEL
NVH OF ELECTRIC VEHICLES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — **Martin Dufek**
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — **Ing. Kamil Řehák, Ph.D.**
SUPERVISOR

BRNO 2022

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	**Martin Dufek**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	**Ing. Kamil Řehák, Ph.D.**
Akademický rok:	2021/22

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:

NVH problematika elektrovozidel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Problematika NVH u elektrovozidel je značně odlišná oproti vozidlům se spalovacím motorem. Při jejich vývoji je nutné vzít v úvahu právě tyto odlišnosti a přizpůsobit i následné technické experimenty.

Cíle bakalářské práce:

Provedení rešerše.
Přehled zdrojů hluku u elektromobilu.
Přehled numerických simulací, jež se využívají při vývoji.
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 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

V elektromobilech se nenachází spalovací motor, a ačkoliv se jedná o pozitivní posun ve vývoji, jde o nové výzvy z hlediska NVH a jejich zdrojů. Jelikož se v dnešní době elektromobily jeví jako budoucnost automobilového průmyslu, je nutné těmto výzvám věnovat pozornost. V první části je proto práce zaměřena na rozdělení a popsání NVH zdrojů, porovnání jejich významu u elektromobilu oproti automobilu se spalovacím motorem a navrhnutí možného řešení pro jejich tlumení. Druhá část práce je pak zaměřena na význam a provádění numerických simulací a technických experimentů v současnosti pro jednotlivé části EV při jeho vývoji.

KLÍČOVÁ SLOVA

NVH, elektromobil, numerické simulace, vibrace, hluk, technické experimenty

ABSTRACT

There is no internal combustion engine in electric cars and although this is a positive shift in development, it presents new challenges in terms of NVH sources. In these days electric cars seem to be the future of the automotive industry so it is necessary to pay attention to it. In the first part the work is focused on the distribution and description of NVH sources, comparison of their importance in the electric car compared to a car with an internal combustion engine and proposing a possible solution for their damping. The second part of the work is then focused on the importance and implementation of numerical simulations and technical experiments for individual parts of EV used in their development nowadays.

KEYWORDS

NVH, electric vehicle, numerical simulations, vibrations, noise, technical experiments

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DUFEK, M. NVH problematika elektrovozidel. Brno, 2022. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 60 s. Vedoucí diplomové 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 20. května 2022 ……..……..……..

Martin Dufek

PODĚKOVÁNÍ

Chtěl bych poděkovat zejména vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Kamilu Řehákovi, Ph.D. za jeho ochotu, odborné znalosti, vedení a trpělivost při zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat mé přítelkyni Kristýně Burešové, mým blízkým a rodině za velkou podporu při studiu.

OBSAH

Úvod **10**

1 Elektrovozidla a jejich hluk **11**
1.1 Elektrická pohonná jednotka 13
1.2 Interakce Kola / Silnice 15
1.3 Hluk elektromobilu při zrychlování 19
1.4 Vliv proudění vzduchu na hluk 24
1.5 Akustický výstražný systém vozidla 24
1.6 Hluk od HVAC systému 25
1.7 Shrnutí vyskytujícího se hluku u elektrovozidel 29

2 Vibrace u elektrovozidel **30**
2.1 Potlačení vibrací u elektrovozidel 30
2.2 Vibrace u baterií 32
2.3 Shrnutí vibrací u elektrovozidel 33

3 Numerické simulace při vývoji EV **34**
3.1 Dynamika pohybu EV 34
3.2 Modelování a simulace pohonného řetězce EV 36
3.3 Model prototypu EV 37
3.4 Model řidiče 39
3.5 Model brzdového systému 39
3.6 Model motoru 39
3.7 Model baterie 40
3.8 Teplotní simulace EV 41
3.9 Vícedoménová platforma pro modelování 41
3.10 Simulace hluku od elektromotoru 42
3.11 Shrnutí numerických simulací 46

4 Technické experimenty při vývoji EV **47**
4.1 Testování baterie 47
4.2 Testování elektromotoru 48
4.3 Testování měniče 48
4.4 Testování EV pomocí válcového dynamometru 49
4.5 Testování v aerodynamickém tunelu 49
4.6 X in the Loop testování 49
4.7 Testovací centrum Mercedes-Benz 50
4.8 Shrnutí technických experimentů 51

Závěr **52**

Použité informační zdroje **54**

Seznam použitých zkratek a symbolů **60**

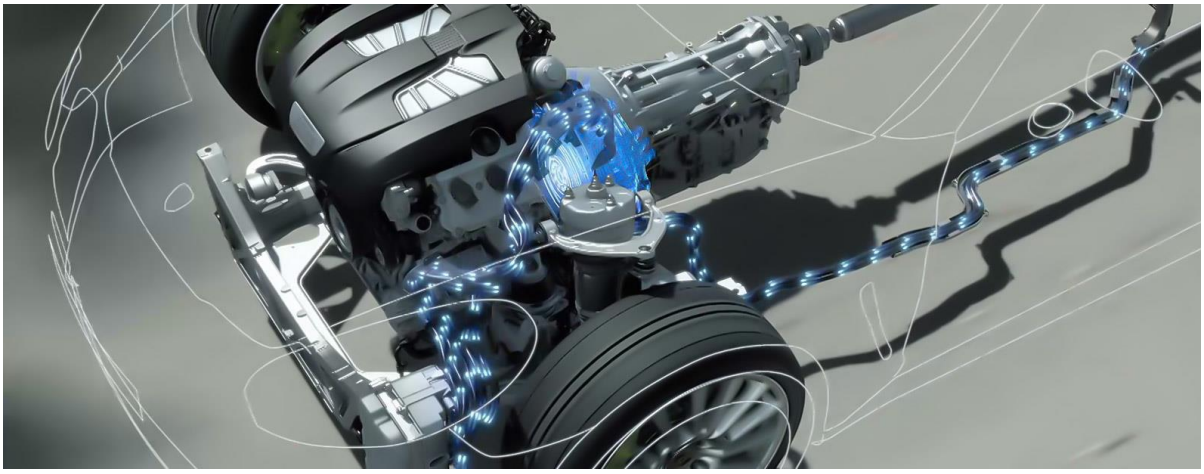
ÚVOD

Elektromobily (dále jen EV) se v posledních letech dostávají čím dál tím víc do popředí. Téměř každá velká automobilka již vyrábí vlastní elektromobil a mění svůj obchodní model tak, aby EV zahrnovaly ve výrobě vyšší podíl. Jak množství EV na trhu roste, rostou s tím i požadavky na řešení technologických problémů, které se při výrobě vyskytují. Mezi tyto problémy patří právě i řešení hluku, vibrací a jejich intenzity, tedy noise, vibration and harshness (dále jen NVH) problematika.

Do dnešní doby bylo dominantně využíváno spalovacích motorů, které vytváří značný hluk a vibrace. Tento hluk je většinou tak dominantní, že překrývá ostatní zvuky z jiných zdrojů. Logicky byl tedy výzkum u automobilu zaměřen hlavně na snížení hluku spalovacího motoru, zatímco hluku z jiných zdrojů nebyla věnována příliš velká pozornost.

U EV se ale spalovací motor nenachází, není zde například ani výfukový systém nebo jiný primární zdroj hluku a vibrací, a i když jsou obecně elektromobily tišší než automobily se spalovacími motory, právě díky absenci spalovacího motoru a dalších primárních zdrojů hluku vystoupí do popředí mnoho jiných ostatních komponentů vytvářejících hluk, které byly dříve z hlediska hluku ignorovány, ale nyní mohou být slyšitelné a nepříjemné. Je tedy žádoucí se na tyto zdroje zaměřit a eliminovat je, aby nezpůsobovaly cestujícím nepříjemné pocity.

Jelikož je NVH problematika u EV odlišná oproti automobilům se spalovacím motorem, musí být pak tyto odlišnosti brány v úvahu i při jejich vývoji, a proto je nutné přizpůsobit i technické experimenty.

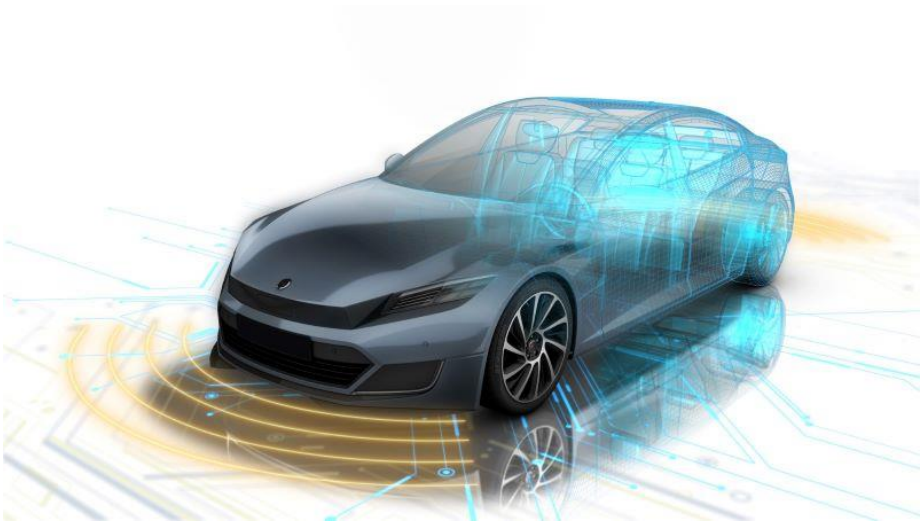


Obr. 1 Ilustrace pohonné jednotky u elektromobilu značky Porsche [1]

1 ELEKTROVOZIDLA A JEJICH HLUK

Postupem času se požadavky lidí na funkce vozidel neustále mění. Komfort, inteligence a elektrická a energetická úspora vozidel se postupně staly základním kamenem technologií moderního designu vozidel.

Hluku, jakožto základní složce pohodlí při jízdě autem, se věnuje pozornost jak automobilových výrobců, tak i uživatelů. Ovšem s příchodem EV se možnosti a zároveň i nároky uživatelů na hluk podstatně zvýšily.



Obr. 2 Schéma NVH u elektromobilu [2]

V současné době vlády povzbuzují výrobce automobilových vozidel k výrobě EV, protože mají takřka nulovou emisní stopu. Avšak tato informace může být poněkud zavádějící. To, že mají elektrická vozidla nulovou emisní stopu, platí hlavně ohledně výfukových plynů. Ale pro pohon EV je vyžadováno vytvářet více elektrické energie, která může pocházet z různých zdrojů s různými dopady na životní prostředí. Další věcí jsou pokročilé komponenty do elektrických pohonných jednotek, jejichž dopad na životní prostředí je ve srovnání s konvenčními vozidly také větší. Aby bylo zajištěno, že EV budou zatěžovat životní prostředí méně než klasické konvenční automobily, musí většina energie poháněj ící EV pocházet z obnovitelných a k přírodě šetrných zdrojů. Dále je také třeba se zaměřit na recyklaci a znovupoužití baterií [3].

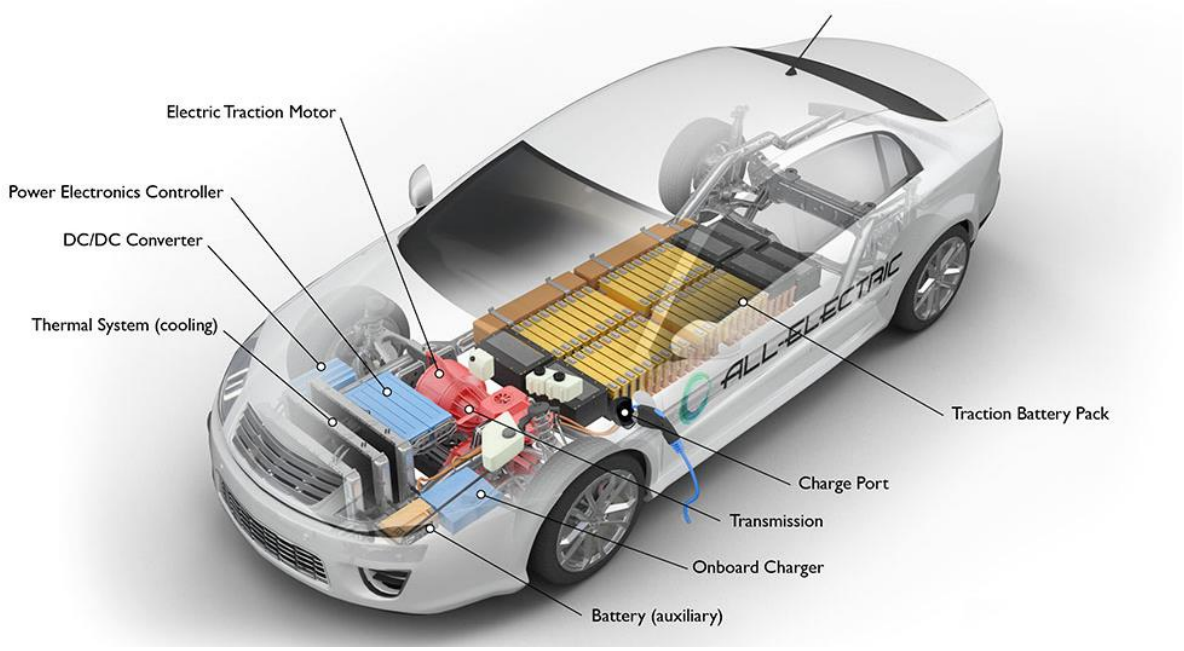
Obecně se od EV očekává, že budou ve srovnání se spalovacím motorem tišší. Absence hluku spalovacího motoru v EV však přináší nové problémy v této oblasti. Problémy, kterým dosud nebyla věnována taková pozornost, a to jsou ostatní zdroje hluku, které se dostávají do popředí. Navíc většina těchto zdrojů hluku jsou rušivé zvuky o dané tónině a působí tak cestujícím nepříjemné pocity.

Jak již bylo zmíněno, NVH zahrnuje zvuk, vibrace a intenzitu. Zatímco zvuk a vibrace jsou měřitelné, kvalita intenzity je subjektivní. I kvalita zvuku a vibrací může být hodnocena subjektivně názorem člověka, avšak většinou dochází k měření a hodnocení pomocí akustického nebo vibroakustického zařízení, reflektujícího lidské subjektivní dojmy, přenášejícího data do požadovaného přijímače. Optimalizací a měřením NVH se nejčastěji zabývají oddělení testovací a oddělení computer-aided engeneering (CAE), která se snaží o co

nejtišší vozidlo, a to bez rozdílu o jaké vozidlo jde, ať už o staré, kde je nutné zlepšení kvality NVH, nebo o nové, kde se teprve design a kvalita NVH vyvíjí. K tomu aby konstruktéři dokázali optimalizovat NVH, si potřebují stanovit cíle, kterých chtějí dosáhnout a na které se musí zaměřit na začátku procesu vývoje vozidla. To umožňuje NVH simulace, která dokáže řídit kterékoliv vozidlo ve vysoce realistických scénářích, takže konstruktéři mohou kvantifikovat a upřesnit své cíle, které zlepší příslušné oblasti NVH. Další využití simulace je při postupném vývoji vozidla, kdy se mohou vyskytnout změny na vozidle, a proto je užitečné vyhodnotit účinky změn a popřípadě vyzkoušet alternativní konstrukční řešení ve virtuálním prototypu. Nasimulovat se dá víceméně cokoliv – od hluku v interiéru vozidla až po chování NVH při jízdě vůči okolí [4].

Zdroje NVH se rozdělují do dvou hlavních skupin – vnější zdroje a vnitřní zdroje. Mezi vnější zdroje patří proudění vzduchu, interakce kol se silnicí nebo hluk od okolí, tedy utěsnění kabiny vozidla. Vnitřními zdroji NVH jsou pak části pohonného řetězce, kdy mezi dominantní zdroje hluku patří převodovka, elektromotor, HVAC systém nebo elektrická pohonná jednotka.

Na Obr. 3 jsou znázorněny všechny základní komponenty EV řetězce. Hlavní rozdíl mezi pohonným řetězcem konvenčního automobilu a EV je v počtu komponentů, kterých je u EV podstatně méně. Základními komponenty pohonného řetězce u EV jsou pomocná baterie, sada baterií pro pohon, elektromotor, port pro nabíjení, palubní nabíječka, systém pro správu baterie, DC - DC konvertor, chladicí systém a převodovka.



Obr. 3 Schéma elektromobilu a základních komponentů pohonného řetězce [5], Electric Traction Motor – Elektrický trakční motor, Power Electronics Controller – kontrolní modul BCM, DC/DC converter – DC – DC konvertor, Thermal Systém – chladicí systém, battery – pomocná baterie, Onboard charger – palubní nabíječka, Transmission – převodovka, Charge Port – nabíjecí port, Traction Battery Pack – sada baterií

Port pro nabíjení umožňuje připojení externího zdroje napájení k vozidlu za účelem nabití sady baterií. Palubní nabíječka odebírá dodávaný střídavý proud z portu pro nabíjení a převádí ji na proud stejnosměrný. Také během nabíjení sleduje napětí, proud a stav nabití sady baterií.

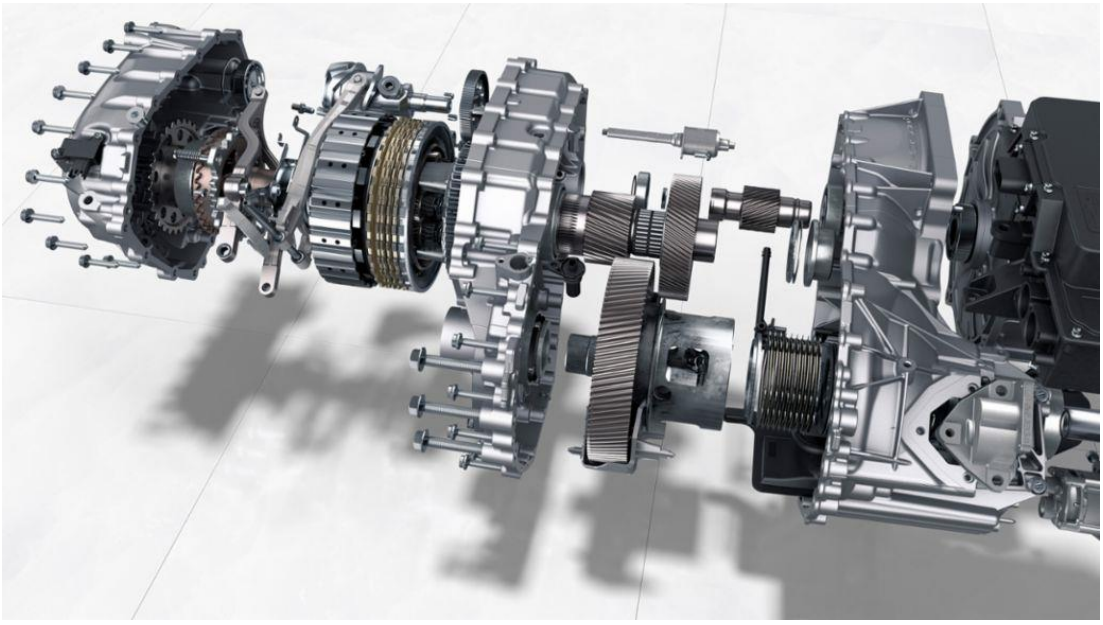
DC - DC konvertor mění stejnosměrný proud o vyšším napětí ze sady baterií na stejnosměrný proud o nižším napětí, který využívá pomocná baterie pro napájení příslušenství vozidla. Elektrický trakční motor, zkráceně elektromotor, pomocí energie uchované v sadě baterií pohání přes převodovku, která transformuje rotační pohyb elektromotoru na mechanický pohyb, kola vozidla. Některá vozidla využívají více elektromotorů, které mohou být umístěny jak vepředu, tak vzadu vozidla. Chladicí systém udržuje správný rozsah teplot celého pohonného řetězce a kontrolní modul (BCM) kontroluje tok elektrické energie, rychlost elektromotoru a správnou funkčnost pomocné baterie a ostatních elektrických komponent [5].

1.1 ELEKTRICKÁ POHONNÁ JEDNOTKA

Vysokofrekvenční elektromagnetický kvílivý hluk, jejž vydává elektrická pohonná jednotka, výrazně ovlivňuje jízdní komfort a stal se tak jedním z důležitých problémů hluku u EV. Dva hlavní zdroje hluku a vibrací u elektrické pohonné jednotky jsou samotný motor a převodovka. Elektromagnetické síly motoru a zabírající síly ozubených kol u převodovky mohou způsobit vibrace a kvílivý hluk s jistou charakteristikou.

Většina EV používá jednostupňovou převodovku k přenesení výkonu z motoru na kola auta. Mají tedy pouze jeden rychlostní stupeň a rychlost přizpůsobují pouze otáčkami motoru. Ovšem vývoj postupně směřuje k používání vícestupňového elektromotoru pomocí převodovky nebo plynule měnitelné převodovky. Již minulý rok (2020) Porsche představilo nový elektrický model – Porsche Taycan, ve kterém se poprvé objevil elektromotor s více rychlostními stupni.

Převodovka od Porsche má zatím jen dva rychlostní stupně, ale je otázkou, zda by šlo vůbec více stupňů využít. Dvourychlostní převodovka je na zadní nápravě Taycanu. První rychlostní stupeň zajišťuje akceleraci z klidu, zatímco dlouhý druhý rychlostní stupeň zajišťuje vysokou účinnost a výkon i při velmi vysokých rychlostech [6].



Obr. 4 Schéma dvourychlostní převodovky Porsche [6]

Celkový návrh elektrického pohonu se stal technologickým trendem, u kterého byl hlavní důraz kladen na snížení hluku a zlepšení jeho kvality způsobeného synchronním nebo asynchronním motorem, převodovkou a měničem.

Pokud bychom porovnali z hlediska hluku pohonné jednotky konvenčních automobilů a elektrické pohonné jednotky EV, je právě zde největší rozdíl výsledných emisí NVH. U dobře tlumené pohonné jednotky EV je i při plné akceleraci rozdíl hluku až 20 dB oproti pohonné jednotce u automobilu. Díky tomu je možné vytvářet mimořádně tichý a příjemný interiér s vysokým akustickým komfortem. Akustický profil EV se od automobilu značně liší. Namísto šumu a zvuku, jehož harmonické vlny mají frekvenci pod 1 kHz, se u EV hluk elektrických pohonných jednotek pohybuje ve frekvencích od 1 do 10 kHz, na které je lidský sluch více citlivý. Elektrické pohonné jednotky dále doprovází charakteristický switching zvuk od elektronických zařízení známý také jako PMW (Pulse Width Modulation). Tento zvuk má měnící se frekvenci v rozsahu od 250Hz do 20kHz, proto i tento switching zvuk může být vnímán jako nepříjemný. Psychoakustické výzkumy [7][8] dokonce ukazují, že výrazně tišší EV jsou z hlediska NVH méně přijatelná zákazníkem než konvenční automobily, právě z důvodu vyšších a více nepříjemných frekvencí zvuku. Je tedy nutné se na pohonnou jednotku zaměřit a nepříjemné zvuky potlačit [9].

V dalších odstavcích jsou uvedena výzkumná témata a jejich autoři, zabývající se hlukem elektrické pohonné jednotky, která jsou v posledních letech důležitými přínosy, díky kterým se vývoj v oblasti hluku neustále zlepšuje.

Wang a kolegové [10] vysvětlili základní chování hluku u elektrického motoru. Objevili, že hlavním jevem je kvílivý zvuk vytvářený elektromagnetickými silami a je zesílený strukturou hnacího ústrojí. Dále bylo určeno, že pomocí simulací jsme schopni předpovědět kvílivé zvuky až do 4500 Hz.

He [11] vyvinul vícestupňový model ke studii vlivu klíčových konstrukčních parametrů, jako jsou působení elektromagnetické síly, uložení motoru nebo žebrování motoru na hluk. He následně charakterizoval důležité konstrukční parametry, které mají vliv na hluk, a optimalizoval návrh elektromotoru pro snížení hluku.

Deshmukh a Rane [12] se zaměřili na různé typy upevnění elektrických pohonných jednotek a o jejich vlivu na hluk, jež zjišťovali pomocí ADAMS simulace. Zjistili, že klasické konvenční upevnění nesplňuje požadavky na hluk a optimalizovali montáž elektrického motoru.

He a jeho kolegové [13] vyvinuli novou integrační analýzu pro elektromagnetický motor, přičemž tuto analýzu úspěšně ověřili na nejpoužívanějších typech motorů. Analýza dokáže předvídat výkonnost hluku indukčního motoru v rané fázi návrhu. Dále může analýza pomoct při volbě komponentů motoru, jako je průměr hřídele nebo počet pólů elektromotoru.

Dupont a Saucy [14] vytvořili simulační proces, pomocí kterého je možné optimalizovat hluk vydávaný elektromotorem. Optimalizace je možná v celém rozsahu otáček elektromotoru s ohledem na danou geometrii aktivních částí elektromotoru.

Lennström a jeho kolegové [15] vytvořili studii, ve které se zaměřili na to, jak moc hluku vyprodukuje elektrický pohon zadní nápravy a kolik je ho slyšet uvnitř auta. Studie byla provedena pomocí zkoušky akustické přenosové funkce (ATF). Rovněž bylo prokázáno,

že charakterizace pomocí ATF je klíčová a velice účinná pro správný odhad akustického tlaku uvnitř elektrovozidla.

Zeng a jeho kolegové [16] provedli efektivní analytický experiment, zahrnující analýzu zvuku a vibrací rotačních částí (Order analysis), analýzu změnu tvaru součásti vlivem hluku a vibrací (ODS) a analýzu cesty přenosu zvuku a vibrací (TPA). To vše pro zjištění zdroje rezonance a přenosu vibrací u čistě elektrického autobusu. Pomocí těchto analýz se zjistilo, že rezonance je vyvolána především vlnami druhého řádu spojenými s hnací jednotkou. Navíc se potvrdilo, že se přenáší z hnací jednotky vibrace do podlahy autobusu.

Další objev provedli Fang a Zhang [17], kteří zkoumali vliv harmonické frekvence zvuku a vysokofrekvenčního switching zvuku, který vzniká při střídání zapnutého a vypnutého stavu u polovodičů, na kvalitu zvuku. Výzkum provedli pomocí vibroakustických experimentů a ukázali, že hluk, který jde z hnací jednotky, se dá rozdělit na dva typy akustického hluku. První typ je hluk harmonického kmitání zahrnující i typické elektromagnetické kvílení. Druhý typ je právě tzv. vysokofrekvenční switching zvuk. Dále Fang a Zhang zjistili, že na harmonickém kmitání závisí kvalita hluku při nízkých rychlostech. Naopak vliv switching zvuku od měniče se více projevuje při rychlostech středních a vysokých s růstem spínacích operací.

Ohledně elektrické pohonné jednotky bylo vytvořeno mnoho studií za účelem snížení hluku. Hlavním nástrojem jsou návrhové analýzy a výpočty, díky kterým je možné optimalizovat konstrukci pohonné jednotky v oblasti hluku ještě vůbec před samotným sestavením. Optimalizace pohonné jednotky je jedna z částí, na které je třeba se zaměřit, jelikož se jedná o hlavní zdroj pasažérům nepříjemného kvílivého zvuku. Elektromotory se neustále vyvíjí, a tudíž předpoklad je takový, že se s nimi budou vyvíjet a zlepšovat i nástroje ke snížení hluku pohonné jednotky, aby byly elektromobily tak tiché, jak od nich společnost očekává.

1.2 INTERAKCE KOLA / SILNICE

V městských oblastech se rychlost elektromobilů pohybuje do 50 km/h. Při takových rychlostech je hluk proudění větru minimální. I hluk od motoru je malý a je maskován od hluku pneumatik v interakci se silnicí. Mezi hlavní problémy patří kvalita silnic. Na tomto problému však musí zapracovat město a vláda. Na vývoji pneumatik a snížení jejich hluku firmy neustále pracují, avšak pokud budou silnice ve špatném stavu, samotné pneumatiky nemůžou dosáhnout lepšího výsledku. Pokud budou města chtít snížit hlukové znečištění, budou muset upravit silnice a jejich povrchy tak, aby dokázaly absorbovat hluk od pneumatik [18]. Kdybychom počet těchto povrchů cíleně zvyšovali a využili bychom nehlučných pneumatik u elektromobilů, dle [19] by se do roku 2030 mohl snížit hluk v městských oblastech k 6 až 7 dB.

V červnu roku 2020 Cesbron a jeho tým vytvořili studii [20], ve které provedli 15 různých testů k porovnání hluku interakce pneumatik s vozovkou na vícero vozidlech. Testy byly provedeny na vozovkách se šesti různými povrchy, viz Obr. 5 - Obr. 10.

Obr. 5 Konvenční hustý asfaltový beton (DAC) 0/8 [20]

Obr. 6 Konvenční hustý asfaltový beton (DAC) 0/10 [20]

Obr. 7 Kamenný tmelový asfalt (SMA) 0/10 [20]

Obr. 8 Tenký asfaltový povrch (VTAC) 0/6 [20]

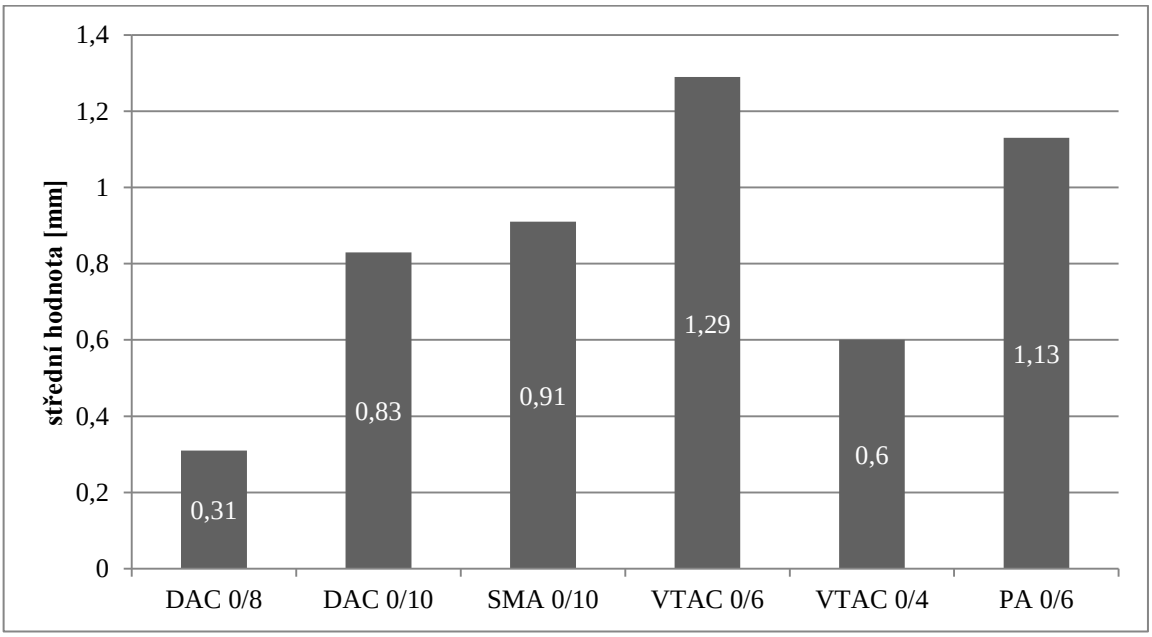
Obr. 9 Tenký asfaltový povrch (VTAC) 0/4 [20]

Obr. 10 Porézní asfalt (PA) 0/6 [20]

Konvenční hustý asfaltový beton 0/8 (Obr. 5) je povrch, jenž se používá pro schvalování nových pneumatik dle ISO 10844 [21]. Zbylých pět povrchů jsou často používané asfalty v městských částech.

V Tab. 1 jsou hodnoty střední hloubky profilu jednotlivých povrchů, které byly změřeny pomocí 3D profilometru s 2D laserovým senzorem pohybujícím se přes povrch vozovky. Nejmenší hloubku profilu měl konvenční hustý asfaltový beton s hodnotou 0,31 mm a největší hloubku profilu měl tenký asfaltový povrch s hodnotou 1,29 mm.

Tab. 1 Střední hloubka profilu jednotlivých povrchů [20]



V roce 2019 se nejvíce registrovala elektrická vozidla Tesla Model 3, Renault ZOE, Nissan LEAF a BMW i3 [22]. Proto byla právě tato vozidla zvolena na test a byla doplněna elektrickým vozidlem Peugeot e-208. Díky tomuto doplnění byla vozidla typově vhodně rozložena. Tesla Model 3 jako velké rodinné auto, BMW i3 a Nissan LEAF jako malá rodinná auta a Renault ZOE a Peugeot e-208 jako super mini auta.

Tab. 2 Rozměry pneumatik u jednotlivých aut [20]

Typ auta	Typ pneumatik	Rozměry
Peugeot e-208	Michelin Primacy 4	195/55 R16 87H
Tesla Model 3	Michelin Pilot Sport 4 S	235/35 ZR20 92Y
BMW i3 (přední)	Bridgestone Ecopia EP500	175/55 R20 89T
BMW i3 (zadní)	Bridgestone Ecopia EP500	195/50 R20 93T
Nissan LEAF	Michelin Energy Saver	205/55 R16 91V
Renault ZOE	Michelin Energy E-V	185/65 R15 88Q

V Tab. 2 jsou vypsány rozměry testovaných pneumatik u elektromobilů. Je také nutné podotknout, že pneumatiky od BMW i3 mají vyšší poměr výšky k šířce kvůli jejich vysokému a šípovitému tvaru a mají rozdílné rozměry pro zadní a pro přední pneumatiky.

Měření hluku bylo provedeno zkouškou CPB (Controlled Pass-By). Mikrofon byl umístěn na okraji silnice na levé straně od vozidla dle ISO 11819-1 [23]. Měření bylo provedeno při konstantních rychlostech od 20 km/h do 100km/h při kroku 5 km/h. V Tab. 3 jsou změřené a přepočítané hodnoty pomocí logaritmické regrese.

Tab. 3 Naměřené a vypočítané hodnoty hluku na jednotlivých površích [20]

Povrch vozovky	Teplota [°C]	Gradient regresní přímky [dB]	Celková úroveň hluku přepočítaná regresí při 50km/h [dB]
Peugeot e-208			
PA 0/6	21,1	30,2 ± 1,1	61,6 ± 0,8
DAC 0/10	27,6	34,6 ± 1,3	64,2 ± 1,0
SMA 0/10	27,6	34,9 ± 1,0	65,0 ± 0,7
VTAC 0/6	23,3	29,6 ± 1,5	62,3 ± 0,7
VTAC 0/4	23,3	32,4 ± 1,6	58,7 ± 1,1
DAC 0/8	23,0	32,6 ± 1,5	61,6 ± 1,1
Tesla Model 3			
PA 0/6	29,4	29,5 ± 1,6	63,1 ± 1,3
DAC 0/10	26,6	32,8 ± 0,6	66,2 ± 0,6
SMA 0/10	26,6	34,8 ± 0,9	67,0 ± 0,9
VTAC 0/6	26,6	30,3 ± 1,4	64,0 ± 1,3
VTAC 0/4	31,4	31,0 ± 1,7	60,1 ± 1,6
DAC 0/8	31,4	33,1 ± 1,0	63,0 ± 1,0
BMW i3			
PA 0/6	28,6	34,1 ± 1,6	61,4 ± 0,9
DAC 0/10	26,4	34,7 ± 1,1	64,0 ± 1,1
SMA 0/10	26,4	34,9 ± 1,0	65,0 ± 1,0
VTAC 0/6	31,4	33,9 ± 1,0	61,5 ± 1,0
VTAC 0/4	32,1	28,1 ± 1,8	59,3 ± 1,1
DAC 0/8	28,1	34,1 ± 1,4	62,0 ± 0,8
Nissan LEAF			
PA 0/6	28,1	31,5 ± 1,2	62,9 ± 1,0
DAC 0/10	27,6	35,2 ± 0,6	65,0 ± 0,5
SMA 0/10	27,6	36,4 ± 0,9	66,0 ± 0,8
VTAC 0/6	32,4	32,1 ± 0,9	62,7 ± 0,8
VTAC 0/4	32,1	28,6 ± 1,4	61,3 ± 1,3
DAC 0/8	28,1	37,0 ± 2,2	64,3 ± 2,0
Renault ZOE			
PA 0/6	23,7	28,9 ± 1,8	63,6 ± 1,7
DAC 0/10	28,7	33,2 ± 1,4	66,0 ± 1,3
SMA 0/10	28,7	34,8 ± 1,4	66,6 ± 1,4
VTAC 0/6	23,6	32,1 ± 1,1	63,9 ± 1,0
VTAC 0/4	26,8	28,9 ± 1,2	61,5 ± 1,1
DAC 0/8	33,4	32,7 ± 1,6	64,2 ± 1,4

Výsledky byly zaměřeny na rychlost 50 km/h, což přibližně odpovídá rychlosti v městských oblastech. Z výsledků je vidět, že rozdíl v hlučnosti mezi nejtišším a nejhlučnějším povrchem je 8,8 dB. Nezávisle na vozidlech, nejhlučnější povrch byl vždy SMA 0/10, tedy kamenný tmelový asfalt. Nejtišší byl ve všech zkouškách opět nezávisle na vozidlech povrch VTAC 0/4, tedy tenký asfaltový povrch. Ze zkoušek bylo také zjištěno, že z hlediska snížení hluku povrch vozovky převládá nad pneumatikami. Pokud bychom tedy chtěli snížit hluk od interakce kol se silnicí, je nutné přizpůsobit hlavně povrchy vozovek, které budou mít na snížení největší podíl. Přičemž optimalizace vlastností pneumatik může efekt snížení hluku ještě zlepšit [20].

1.3 HLUK ELEKTROMOBILU PŘI ZRYCHLOVÁNÍ

Dalším hlukem vytvářejícím hlukové znečištění ve městech je hluk EV při zrychlování. Ve městech se nachází hodně křižovatek a přechodů, kde je nutné každou chvíli vozidlo zastavit a znovu se rozjet, přičemž právě při rozjíždění a zrychlování je vytvářen značný hluk. Proto je nutné vnější hluk od zrychlení omezit.

Na tento problém se zaměřili W. Tianxiu a jeho kolegové [24] a vyvinuli metodu pro kontrolu hluku při zrychlování na modelu TPA. Metoda funguje tak, že bere vozidlo jako hlavní objekt a získává z něj parametry externího hluku při zrychlování pomocí modelu TPA a na základě zjištěných parametrů optimalizuje strukturu EV tak, aby se co nejvíce snížil hluk. Bohužel při aplikaci metody do praxe se zjistilo, že má metoda problém s vysokou chybovostí regulace hluku a skutečný účinek tak není ideální.

Další, kdo se na tento problém zaměřil, byl Zhang Yu s kolegy [25], kteří navrhli metodu regulace hluku založenou na optimalizaci topologie tlumicí vrstvy. V této metodě je využíváno softwaru pro metodu konečných prvků (MKP) k vytvoření modelu analýzy akustické vibrační vrstvy vozidla. Pomocí modelu se pak získají parametry hluku EV a analyzuje se maximální frekvence signálu. Na základě toho se získá vnější hluk EV při zrychlování a je určena frekvenční odezva vibrací vozidla. Topologie tlumicí vrstvy se optimalizuje tak, že se metoda iteruje až do minimálních rozměrů tlumicí vrstvy. Problém této metody je však v časové náročnosti a i tak je velký rozdíl mezi reálnými a ideálními výsledky.

Za účelem vyřešení problému s vysokou chybovostí, časovou náročností a nepřesných výsledků vyvinul Shulong Wu novou metodu založenou na metodě měření intenzity zvuku [26]. Ve srovnání s tradičním akustickým měřením má metoda měření intenzity zvuku výhody, jako jsou volné podmínky měření, hospodárnost a jednoduchost, které umožňují vysoce přesnou analýzu energie zvukového pole a sledování toku energie. Hlavním principem metody je využití energie zvukového pole k rychlému a přesnému posouzení parametrů hluku. Existuje mnoho druhů metod měření intenzity zvuku, Shulong Wu si vybral tu nejběžnější – metodu dvojitého přenosu.

Podle uvedené analýzy a výzkumu metody měření intenzity zvuku je vzorec pro výpočet okamžité intenzity zvuku následující:

$$I^{\omega} = p^{\omega}(t)v^{\omega}(t) \tag{1}$$

Kde $p^{\omega}(t)$ je okamžitý akustický tlak a $v^{\omega}(t)$ je okamžitá rychlost vibrací částice.

Podle uvedených výsledků analýzy lze spočítat průměrnou časovou intenzitu zvuku pomocí rovnice (2).

$$I = \frac{1}{T}\int_0^T p(t)v(t)dt \tag{2}$$

Kde T je čas měření.

Pro získání přesné hodnoty intenzity zvuku je nutné získat rychlost vibrací a akustický tlak média. V praxi se akustický tlak získává pomocí senzorů, ale je velmi obtížné měřit rychlost vibrací částic. Proto se tedy v analýze uvažuje, že gradient akustického tlaku konzistentní se směrem částic lze použít k popisu rychlosti vibrací částic a výsledek lze tedy popsat vzorcem:

$$v^{\omega}(t) = -\frac{1}{\rho_0}\int \frac{\partial p(t)}{\partial r^{\omega}}dt \tag{3}$$

Kde ρ_0 představuje hustotu média.

Substitucí vzorce (3) do vzorce (1) a použitím průměrného akustického tlaku dvou mikrofonů místo okamžitého akustického tlaku se získá okamžitá intenzita zvuku středního bodu. Dále se ještě odstraní statistické charakteristiky intenzity zvuku, které lze vyjádřit časově průměrnou intenzitou zvuku, a dostaneme vzorec:

$$I_t = \frac{p_1(t) + p_2(t)}{2\rho_0 \Delta r}\frac{1}{T}\int_0^T \big(p_2(t) - p_1(t)\big)dt \tag{4}$$

Ve kterém Δr představuje vzdálenost mezi dvěma mikrofony.

Podle analýzy relevantních výzkumných dat je průměrná časová intenzita zvuku také hodnotou funkce vzájemné korelace mezi rychlostí vibrací a akustickým tlakem, pokud $\tau = 0$. Poté můžeme napsat vzorec:

$$I_t = R_{pwr}(0)\int_0^{\infty} RG_{pwr}(f)df \tag{5}$$

Ve kterém je f frekvence vibrací EV a $G_{pwr}(f)$ funkce spektrální hustoty výkonu akustického tlaku a rychlosti vibrací.

Fourierovou transformací vzorce (5) se získá vzorec:

$$I(f) = \frac{I_m(G_{21})\Delta f}{2\pi f \Delta r \rho_0} \tag{6}$$

Kde G_{21} představuje funkci spektrální hustoty výkonu akustického tlaku pro dva signály a Δf je šířka úzkého pásma frekvence.

Pomocí vzorce (6) lze získat spektrum intenzity zvuku a celkovou intenzitu zvuku jako součet jednotlivých složek intenzity zvuku z každého pásma Δf.

Parametry vnějšího hluku při zrychlení EV zahrnují intenzitu zvuku I, akustický tlak p, akustický výkon W a hladinu akustického tlaku L. Pomocí těchto parametrů lze měřit hluk při zrychlení EV poměrně přesně. Ovšem v procesu analýzy hluku vozidla při zrychlení není pouze jeden zdroj hluku, ale je jich mnoho, a proto je nutné hluk syntetizovat a rozložit. Obecně je syntéza a klasifikace hluku popsána hladinou akustického tlaku. Pokud tedy existují zdroje hluku *a* a *b*, lze napsat vzorec:

$$\sum \mathrm{L_p} = \mathrm{L_{pa}} + 10\log\left(1 + 10^{\frac{\mathrm{L_{pb}} - \mathrm{L_{pa}}}{10}}\right) \tag{7}$$

Kde $\mathrm{L_{pa}}$ a $\mathrm{L_{pb}}$ jsou hladiny akustického tlaku zdrojů *a* a *b* a $\sum \mathrm{L_p}$ je celková hladina akustického hluku.

Dále Shulong Wu vytvořil třídutinový model podle Helmholtzova rezonátoru se sacím potrubím připojeným za vzduchovým filtrem tak, aby bylo dosaženo odpovídajícího hluku EV při zrychlování. V konstrukci je uzavřená dutina a v boční stěně dutiny je otvor o malém průměru. Za předpokladu že vzduch procházející modelem krátkého potrubí může být vyjádřen jako $\mathrm{M_m} = \rho_0 \mathrm{S_t}$ bude vzduch v potrubí vibrovat a bude se otírat o stěny potrubí, což spotřebuje část tepla. Za dalšího předpokladu, že koeficient tlumení stěny trubky je δ_m, lze vyjádřit stavovou rovnici pro uvedený proces jako:

$$(\mathrm{p_0} + \mathrm{p_1})(\mathrm{V} + \zeta \mathrm{S})^{\gamma} = \mathrm{pV}^{\gamma} \tag{8}$$

Pokud je vzorec (8) rozšířen o Taylorovu řadu a vyšší řád je ignorován, vyjde vzorec:

$$\mathrm{p_1} = \rho_0 \mathrm{C_0^2} \frac{\zeta \mathrm{S}}{\mathrm{V}} \tag{9}$$

Kde $\mathrm{C_0}$ představuje rychlost zvuku.

Vibrací vzduchu v potrubí se výrazně změní tlak a na vzduch začne působit síla, která se vypočítá jako:

$$\mathrm{F} = \mathrm{p_1 S} = \frac{-\rho_0 \mathrm{C_0^2 S^2} \zeta}{\mathrm{V}} \tag{10}$$

Dále lze vypočítat koeficient pružnosti v potrubí:

$$\mathrm{K_m} = \frac{\rho_0 \mathrm{C_0^2 S^2}}{\mathrm{V}} \tag{11}$$

Potom lze veličinu p akustický tlak v modelovém systému Helmholtzovy dutiny získat jako:

$$\mathrm{p} = \mathrm{M_a} \frac{du}{dt} + R_a u + \frac{1}{C_a} \int u dt \tag{12}$$

Kde $\mathrm{M_a}$ představuje kvalitu zvuku, R_a představuje odpor zvuku a C_a představuje kapacitu zvuku.

Vzorec pro výpočet akustické impedance v potrubí o průřezu S_0 připojenému k Helmholtzově dutině je výpočetní vzorec následující:

$$Z_1 = \frac{p}{u} = \frac{\rho_0 c_0 v}{S_0 v} = \frac{\rho_0 c_0}{S_0} \tag{13}$$

Rezonanční frekvenci rezonátoru lze vypočítat:

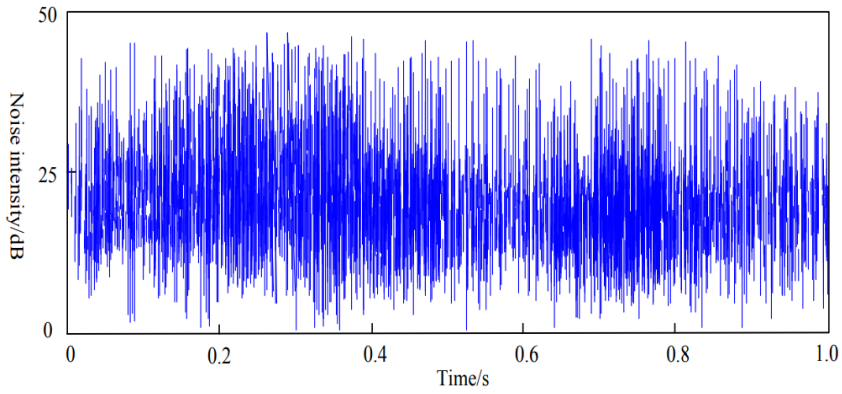
$$f_r = \frac{C_0^2}{2\pi}\sqrt{\frac{s}{I_0 V}} \tag{14}$$

Kde s představuje plochu otvoru a I_0 představuje plochu průřezu trubky rezonátoru.

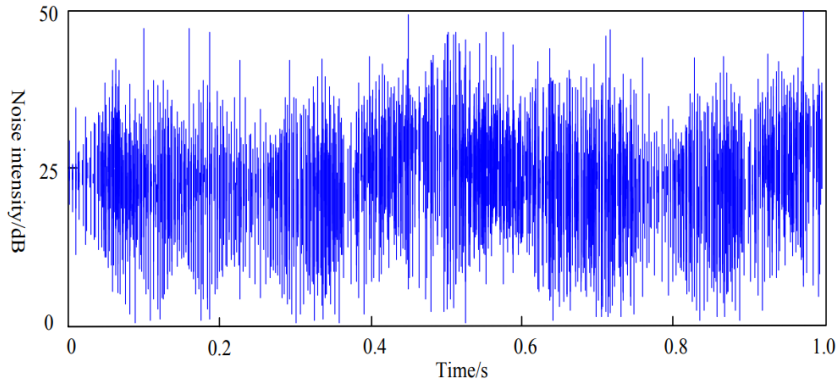
Pokud není v blízkosti otvoru Helmholtzovy rezonanční dutiny žádný materiál pohlcující zvuk, je zvukový odpor udržován na nízké úrovni a lze jej ignorovat. Potom lze snížení hluku tlumiče vypočítat následujícím vzorcem:

$$\Delta L_w = 10 \log\left[1 + \left(\frac{\frac{\sqrt{GV}}{2F_1}}{1 - \frac{f_r}{f}}\right)^2\right] \tag{15}$$

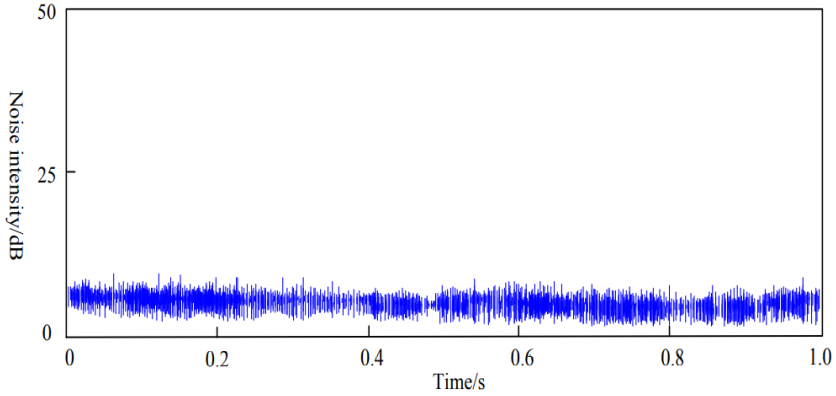
Shrnutím všech uvedených vzorců (1) až (15) Shulong Wu dokončil návrh metody regulace hluku při zrychlení EV. Dále ještě nasimuloval výsledky pomocí Matlabu. Důležitým ukazatelem pro testování účinku regulace hluku při zrychlení je intenzita hluku. Čím nižší intenzita je, tím lepší je metoda kontroly hluku. Porovnání metody pomocí TPA (a), metody pomocí optimalizace topologie tlumicí vrstvy (b) a metody založené na měření intenzity zvuku (c) je znázorněno na Obr. 11, Obr. 12 a Obr. 13.



Obr. 11 Simulace intenzity zvuku pomocí metody TPA (a) [26]



Obr. 12 Simulace intenzity zvuku pomocí metody optimalizace topologie tlumicí vrstvy (b) [26]



Obr. 13 Simulace intenzity zvuku pomocí metody založené na měření intenzity zvuku (c) [26]

Simulace intenzity zvuku ukazují, že metoda (a) dokáže hluk při zrychlení kontrolovat mezi 1 a 50 dB, metoda (b) dokáže hluk při zrychlení kontrolovat mezi 1 a 47 dB a metoda (c) dokáže hluk při zrychlení kontrolovat mezi pouhými 3 a 8 dB, což ukazuje, že použití metody (c) založené na měření intenzity zvuku má podstatně vyšší efektivitu než dvě předchozí metody.

Protože i chybovost řízení je jedna z důležitých parametrů metod, Shulong Wu porovnal pomocí Matlabu všechny 3 metody i v tomto ohledu. Z dat, která vyšla vyplývá, že metoda (a) měla chybovost až 18,4%, metoda (b) měla chybovost 15,2% a metoda (c) měla chybovost 2,7%, což je v porovnání s ostatními metodami velké zlepšení.

Posledním důležitým parametrem metod je její časová náročnost, kterou Shulong Wu opět ověřil simulací. Z výsledků vyšlo následující: metoda (a) měla při opakovaných experimentech nejkratší čas 3,69s, metoda (b) měla při opakovaných experimentech nejkratší čas 4,25s a metoda (c) měla při opakovaných experimentech nejkratší čas 1,25s. I v tomto ohledu byla teda metoda (c) nejlepší.

S rozvojem měst se lidé zaměřují na sociální rozvoj a ochranu životního prostředí, s čím souvisí i hlukové znečištění, které je vytvářeno dopravou. Snížení hlukového znečištění lze

tedy docílit snížením hluku od dopravních prostředků, a to je jedním z důvodů, proč se vlády zaměřily na vývoj EV. Ale i EV dokáže vytvářet hluk právě třeba u zrychlování, a proto bylo nutné tento problém vyřešit. Pro řešení problému byly vymyšleny metody, které však nesplňovaly požadavky kvality, a tak Shulong Wu přišel s novou spolehlivou metodou [26], kterou ověřil pomocí simulace a která je schopná tlumit hluk EV při zrychlování s nízkou chybovostí a časovou náročností.

1.4 VLIV PROUDĚNÍ VZDUCHU NA HLUK

Mezi další zdroje hluku od externích vlivů mimo interakce kol se silnicí patří i proudění vzduchu. U těchto externích vlivů záleží na rychlosti vozidla. Jede-li vozidlo relativně malou rychlostí, nebývá proudění vzduchu problém, ale projeví se hluk od styku kol s vozovkou, kdy pasažéři na zadních sedadlech mohou pociťovat tlak v uších. Naopak jede-li vozidlo rychlostí vyšší, dostává se do popředí aerodynamický hluk.

Aeroakustika vozidla má vliv nejen na pohodlí, ale i na bezpečnost vozidla. Proudění vzduchu a generování hluku jsou spojené jevy. Je tedy důležité se na proudění zaměřit. Hluk od proudění vzduchu souvisí jak s konstrukcí a aerodynamikou karoserie, tak i s turbulencí jednotlivých komponentů. Existují tři hlavní kategorie ovlivňující aerodynamický hluk vozidla, jsou to: tvar vozidla, utěsnění karoserie a otevřené dutiny. Tvar vozidla a otevřené dutiny se řadí mezi aktivní zdroje hluku, zatímco těsnění karoserie hluk od proudění vzduchu snižuje v závislosti na kvalitě těsnění [28].

Aeroakustický hluk dále závisí na hluku větru od součástí vozidla, kterými jsou A-sloupky, boční zrcátka, stěrače předního skla, podvozek, anténa a okna. Proto je velice důležité vytvořit raný koncepční návrh, který dopředu analyzuje jednotlivé součásti. Pokud by se na problém s hlukem větru přišlo pozdě, bylo by drahé tento problém řešit pomocí těsnění nebo jiného zvukového balíčku pro snížení hluku.

Úroveň hluku od proudění vzduchu slyšitelného uvnitř EV se při rychlostech liší. Obecně je ale stanoveno, že nad 55 km/h začíná aerodynamický hluk dominovat celkovému hluku. Na rozdíl od tvaru vozidla má těsnění karoserie snížit celkový zvuk slyšitelný uvnitř kabiny. Hlavním úkolem je tedy zabránit netěsnostem kolem oken a dveří. Těsnící systém pak způsobuje, že frekvence hluku uvnitř auta je obecně nad 10 kHz, což je frekvence slyšitelná pro člověka, která je ale mimo nejcitlivější oblast pro lidský sluch. [28]

Hlavním cílem je tedy minimalizovat aeroakustický hluk pomocí dobrého utěsnění a správného návrhu tvaru EV, dutin a jeho komponentů, které budou způsobovat minimální hluk od proudění vzduchu. Na takové návrhy se používají různé simulační programy nebo aerodynamické tunely.

1.5 AKUSTICKÝ VÝSTRAŽNÝ SYSTÉM VOZIDLA

Pokud bychom se vrátili zpět k nízkým rychlostem, nejsou u EV žádné externí vlivy hluku od interakce kol s vozovkou ani od proudění vzduchu. EV jsou tedy při pomalém provozu velice tichá, dokonce tak tichá, že to může být nebezpečné ostatním účastníkům provozu. Z tohoto důvodu jsou EV opatřena systémem AVAS (Acoustic Vehicle Alerting System), který

generuje umělý externí zvuk při pomalých rychlostech do 20 km/h, aby zlepšil bezpečnost zranitelných účastníků provozu, jako jsou chodci nebo cyklisté [29].

Ovšem generování umělého zvuku je využito i uvnitř samotného EV. Řidiči pohotově vnímají informace o jízdních podmínkách prostřednictvím sluchu, které mohou intuitivně interpretovat, např.: syčení pneumatik poskytuje informace o kvalitě povrchu vozovky nebo o tom, jak je vozovka mokrá, změna hluku větru zase udává rychlost vozidla a zvuk pohonné jednotky a převodovky charakterizuje zrychlení a sílu motoru.

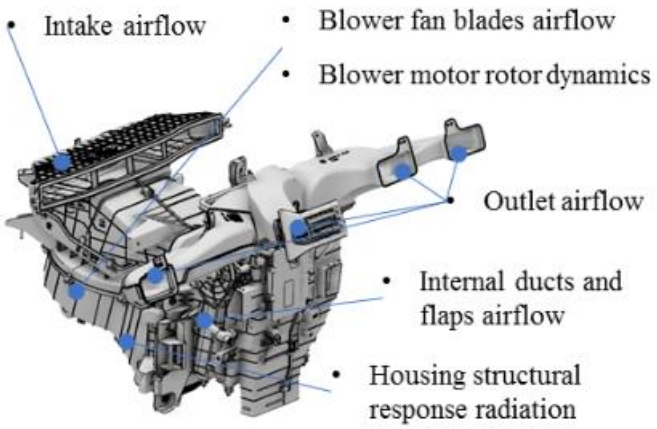
Umělé zvuky vozidla jsou generovány pomocí reproduktorů na základě rychlosti, polohy plynového pedálu a rychlostního stupně EV. Stejně jako automobily vydávají mírně odlišný zvuk při couvání, i u EV se při couvání umělý zvuk mění, nebo může být i zesílen z důvodu bezpečnosti ostatních účastníků provozu.

Instalace AVAS systému v EV je v Evropské unii od 1. července 2019 povinná dle [30]. Evropská unie předepisuje AVAS pro ochranu účastníků silničního provozu do rychlosti 20 km/h. Podobné nařízení platí i v Japonsku a Číně. Nařízení dost podrobně definuje, jak zvuk AVAS může a nesmí znít. V USA je nařízený AVAS dokonce i při stojícím vozidle a vyžaduje zvýšený zvuk až do 32 km/h.

1.6 HLUK OD HVAC SYSTÉMU

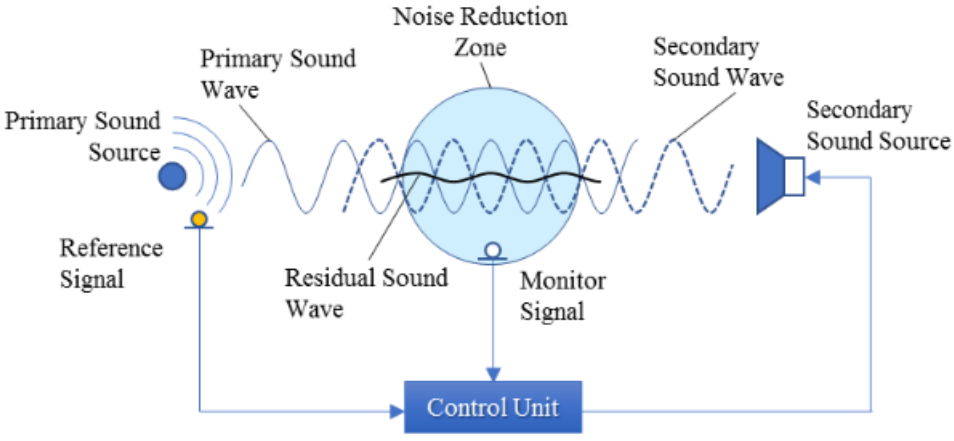
Při nízkých rychlostech EV patří HVAC systém mezi hlavní zdroje zodpovědné za hluk uvnitř kabiny. Kromě toho ale HVAC systém ovlivňuje i vnímatelný zvuk uvnitř kabiny, což má negativní dopad na vnímanou kvalitu vozidla. Postupně se ovšem objevil nový přístup pro potlačení takového hluku, nazývaný aktivní potlačení hluku (dále jen ANC). ANC využívá řídicí systém s více vstupy a výstupy s modifikovaným širokopásmovým filtrovaným algoritmem, takže nijak neohrozí funkčnost HVAC systému. Dále ANC v kombinaci s pasivním potlačením hluku (dále jen PNC) pro vyšší frekvenci zajišťuje velkou schopnost snížení celkové hladiny hluku uvnitř kabiny.

HVAC systémy v EV mohou být velmi složité kvůli řízení teplot v několika zónách kabiny najednou. Většinou je však kritický zdroj hluku modul distribuce (HVAC modul). Hluk v modulu je generován hlavně ventilátorem a jeho lopatkami a prouděním vzduchu v potrubí od sání k výstupu. Na Obr. 14 je znázorněno umístění zdrojů hluku u HVAC systému. Některé případy zdrojů jsou maskovány hlukem proudění vzduchu a nejsou tudíž tak slyšitelné a obtěžující. Ovšem způsobem, jakým HVAC systém vydává hluk, se jedná o širokopásmové spektrum šumu od 50 do 12500 Hz [31].



Obr. 14 Hlavní zdroje hluku u HVAC systému [31], Intake airflow – nasávaný vzduch, Blower fan blades airflow – lopatky ventilátoru, Blower motor rotor dynamics – rotor motoru, Outlet airflow – výfuk vzduchu, Internal ducts and flaps airflow – vnitřní kanály a klapky, Housing structural response radiation – místo odezvy záření

Hluk generován HVAC systémem souvisí s průtokem vzduchu trubkami, který se mění v závislosti na chtěné teplotě v kabině. Při klasickém provozu tedy dochází ke snižování hladiny hluku snížením velikosti změny chtěné po HVAC systému a tím snížení rychlosti proudění vzduchu. Tradičně je regulace hluku zaměřena hlavně na optimalizaci geometrie vnitřního potrubí, aby byl vzduch při proudění co nejméně turbulentní a na přidání materiálu pohlcujícího hluk. Tato tradiční metoda je účinná ve středním a vyšším frekvenčním rozsahu.



Obr. 15 Schéma základního ANC systému [31] Primary Sound Source – hlavní zdroj zvuku, Primary Sound Wave - hlavní zvuková vlna, Noise Reduction Zone – oblast redukce zvuku, Secondary Sound Wave – sekundární zvuková vlna, Secondary Sound Source – zdroj sekundárního zvuku, Reference Signal – referenční signál, Residual Sound Wave – zbytek zvukové vlny, Monitor Signal – monitorovací signál, Control Unit – kontrolní jednotka

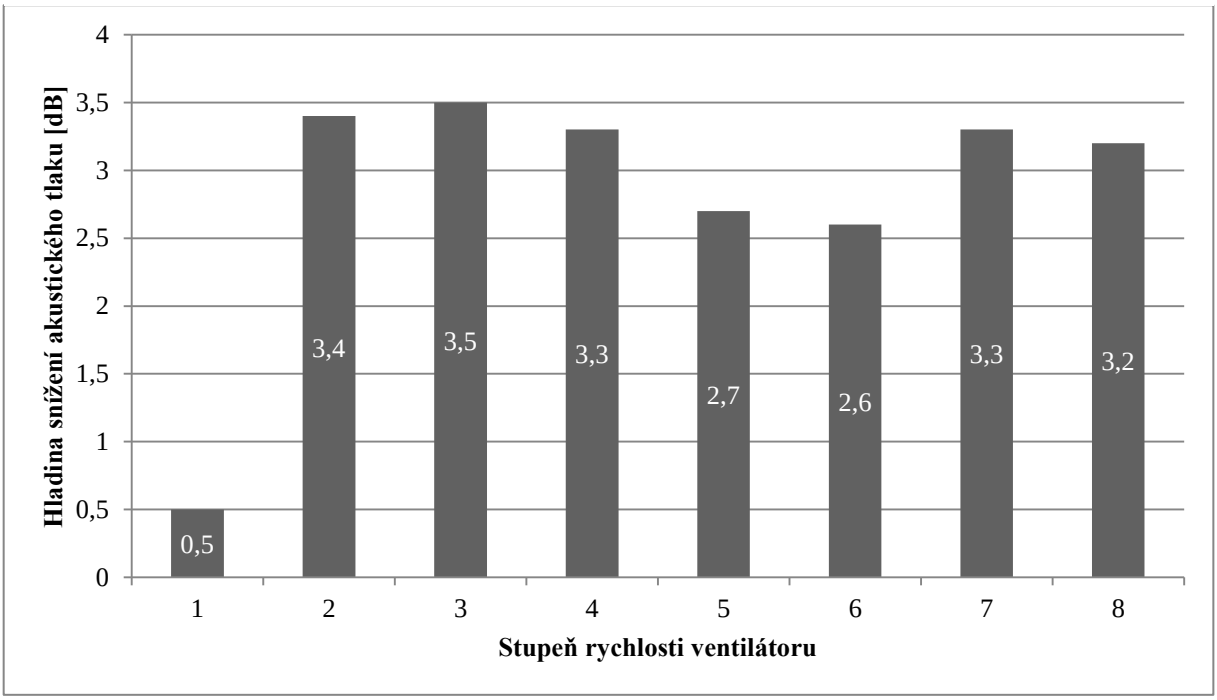
Princip ANC spočívá ve využití destruktivní interference ke zrušení nežádoucího šumu vytvářením sekundární zvukové vlny s upravenou amplitudou a fází tak, aby došlo k co největší minimalizaci hladiny zvuku v prostoru. Řešení ovládání sekundárního zdroje zvuku je pomocí řídicího systému využívajícího monitorovací signál a signál referenční, jak je znázorněno na Obr. 15.

Metoda ANC je efektivní hlavně při nízkých frekvencích a je omezená pro frekvence vyšší, a to hlavně kvůli problémům s přizpůsobením rozložení primárního a sekundárního zvukového pole, jelikož se vlnová délka hluku zmenšuje.

Yuri Adson Ribeiro Silva, Jianfeng He a Jinxiang Song vytvořili experiment, ve kterém se snažili objasnit, jak moc je metoda ANC uvnitř kabiny efektivní [31]. Využili k tomu ANC metodu s využitím multiple input – multiple output (dále jen MIMO) algoritmu. Při MIMO algoritmu jsou 4 reproduktory nacházející se ve dveřích EV využity ke kontrole nízkých až středních frekvencí a dva menší reproduktory za hlavou řidiče (každý z jedné strany) jsou využity ke kontrole středních až vysokých frekvencí a dále je po EV rozmístěno 8 mikrofonů u nejhlučnějších míst HVAC systému. Reproduktory i mikrofony poté komunikují s řídící jednotkou, která data vyhodnotí a snaží se minimalizovat hluk uvnitř kabiny pomocí destruktivních interferenčních vln.

Jak je znázorněno v Tab. 4, snížení hluku pomocí metody ANC ve srovnání se základním stavem bez ANC je více než 2,5 dB ve většině rychlostí ventilátoru. Při maximální rychlosti ventilátoru, tedy nejhlučnějším stavu, je snížení hluku 3,2 dB. K nejvyššímu snížení hluku poté dochází při rychlosti dmychadla 3 a dosahuje 3,5 dB.

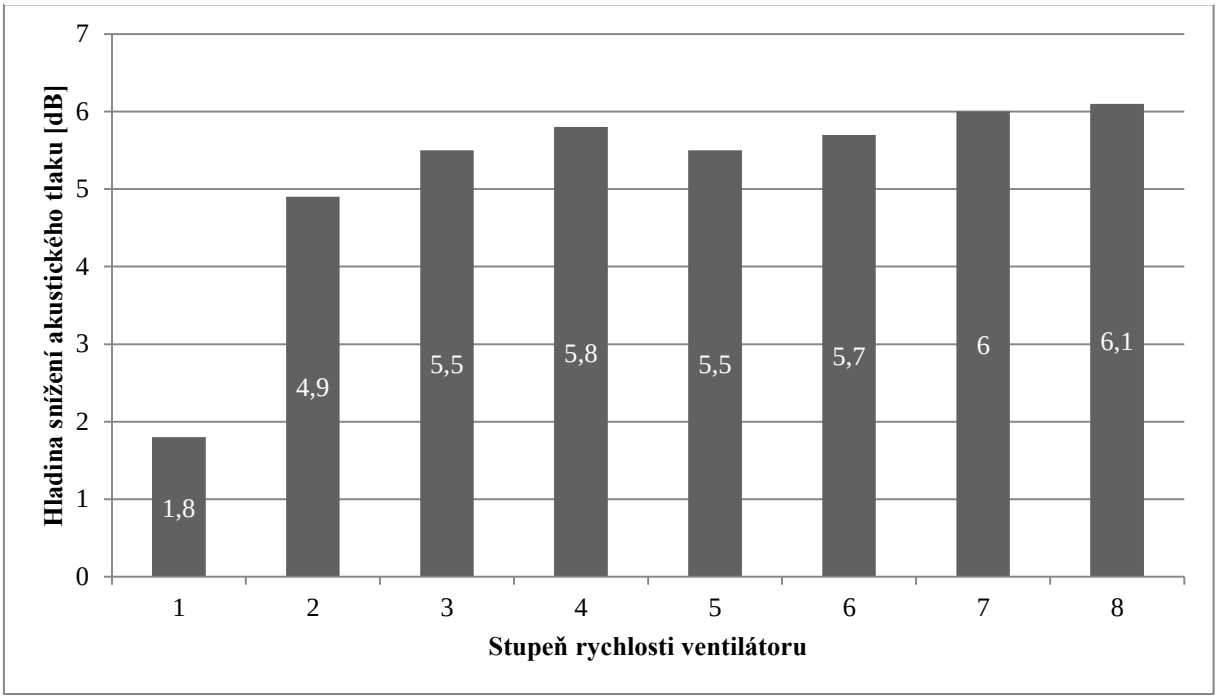
Tab. 4 Snížení hluku pomocí ANC metody [31]



Yuri Adson Ribeiro Silva, Jianfeng He a Jinxiang Song dále zkusili experiment v kombinaci ANC a PNC, kdy ventilační kanál na straně řidiče nahradili akustickým potrubím, které je vyrobeno z vícevrstvého vláknitého materiálu, který by měl pomoci k pasivnímu snížení hluku při proudění vzduchu. V tomto novém ohledu se PNC metoda, která je samotná účinná ve středních až vysokých frekvencích, stala zajímavým doplňkem metody ANC. Při použití samotné metody PNC je maximální snížení hluku kolem 2 dB při maximální rychlosti ventilátoru a postupně se s rychlostí ventilátoru snižuje důsledkem snižování rychlosti proudění vzduchu.

V Tab. 5 je zobrazeno snížení hluku kombinací metod ANC a PNC oproti základnímu stavu bez obou metod. Zjednodušeně by šlo považovat snížení hluku za součet snížení od metody ANC se snížením od metody PNC. Při maximální rychlosti ventilátoru bylo pro ANC metodu snížení hluku 3,2 dB a pro PNC metodu 2 dB, kombinací obou metod bylo dosáhnuto snížení hluku o 6,1 dB, PNC metoda tedy ještě zvýšila potenciál ANC metody.

Tab. 5 Snížení hluku kombinací metod ANC a PNC [31]



Metoda ANC má schopnost snížit hluk o 2,5 až 4 dB ve frekvenčním rozsahu do 1400 Hz, aniž by ovlivnila celkový průtok vzduchu HVAC systémem. Díky kombinaci ANC a PNC metod lze pak schopnost ANC metody ještě navýšit až na 6 dB v téměř celém frekvenčním rozsahu hluku. Důležité je, aby metoda ANC byla kalibrována až po nainstalování metody PNC kvůli její správné funkčnosti. Dále bylo zjištěno, že metoda ANC výrazně snižuje rozdíl hluku mezi levým a pravým uchem řidiče z HVAC systému. Určitě se tedy jedná o systém s potenciálem se dále vyvíjet pro svou větší účinnost a pro ještě větší snížení hluku v kabině.

1.7 SHRNUTÍ VYSKYTUJÍCÍHO SE HLUKU U ELEKTROVOZIDEL

U EV je hodně nových výzev a oblastí, které se musí v souvislosti s hlukem řešit, to ovšem přináší nové možnosti, které u automobilů nešlo využít. Díky rychlému vývoji technologií se neustále zlepšují metody redukce hluku v interiéru, ale i v exteriéru EV, díky kterým se snižuje i hlukové znečištění ve městech. Změny hluku v dopravě by byly pravděpodobně ještě znatelnější, kdyby přešla na elektrický pohon i nákladní vozidla, která dělají výrazně více hluku při nižších rychlostech, než osobní EV.

2 VIBRACE U ELEKTROVOZIDEL

V EV je snížení hluku a vibrací důležitý parametr pro zvýšení pohodlí pro řidiče i cestující. Jak již bylo zmíněno v kapitole 1, hlavními zdroji NVH jsou elektrická pohonná jednotka, interakce kol se silnicí, proudění vzduchu, HVAC systém a další. Každý NVH zdroj vytváří nejen hluk, ale i vibrace. Hlavním problémem jsou pak nejen vibrace ze zdrojů NVH, ale i rezonance mezi jednotlivými zdroji, které jsou příčinou vzniku vibrací ještě větších.

Například ve srovnání EV s klasickým automobilem se spalovacím motorem (dále jen ICE) má elektrický motor v EV lepší krouticí moment a schopnost přesnější regulace rychlosti. V některých případech však může EV vykazovat vyšší NVH než automobil s ICE právě kvůli silné rezonanci vibrací mezi elektrickým motorem a hnací soustavou vozidla [32]. U automobilů s ICE jsou vibrace mezi spojkou a převodovkou potlačeny mechanickými tlumiči, zatímco u EV je mnoho mechanických tlumičů odstraněno kvůli snížení hmotnosti a nákladů na výrobu.

2.1 POTLAČENÍ VIBRACÍ U ELEKTROVOZIDEL

Potlačení rezonancí vibrací je jednou z klíčových výzev v oblasti vibrací u EV. Zdroje vibrací mohou být způsobeny vzduchovou štěrbinovou mezerou u elektromotoru, nevyvážeností hřídelové spojky, excentricitou rotoru nebo zkroucením motoru atd.

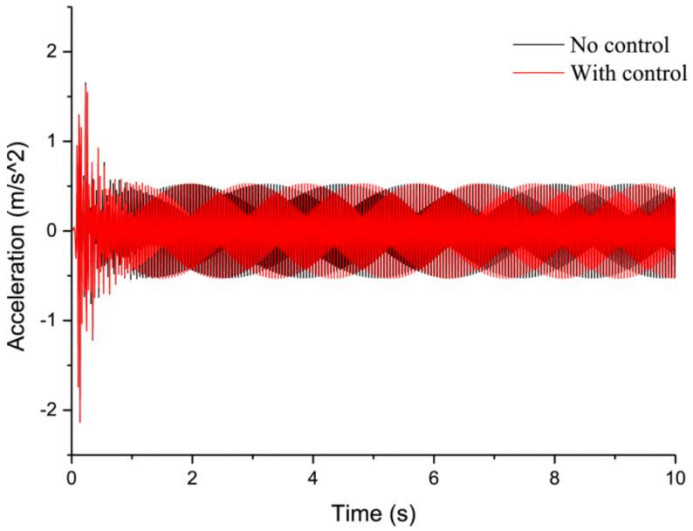
Potlačení vibrací od krouticího momentu z elektromotoru zkoumali Fu a jeho kolegové [33], kteří použili schéma přímého řízení krouticího momentu s prostorovou vektorovou modulací (DTCSVM). Bylo provedeno i několik dalších výzkumů s jinými způsoby řízení, jako například řízení s lineárním proměnným parametrem (LPV) [34], řízení lineárním kvadratickým regulátorem [35], řízení PI/PID regulátorem [36] a další. Pomocí popsaných metod můžou být zdroje vibrací potlačeny na nižší úroveň, ale přesto by mohly zesílit v důsledku rezonance s hnací soustavou vozidla.

Při výzkumu mechanických koeficientů přenosu vibrací bylo zjištěno, že koeficient tlumiče, tuhost a hmotnost mají významnou roli při vzniku rezonancí. Mnoho výzkumníků studovalo vlivy aktivních a semiaktivních tlumičů na rezonanci. Např. Isa a jeho kolegové [37] předložili přehled ohledně elektromagnetického odpružení a zároveň tento druh tlumiče porovnali s tlumičem hydraulickým. O'Regan [38] použil akustickou pěnu a zkonstruoval aktivní absorbéry vibrací (DAVA), které se ukázaly jako účinné v širokém rozsahu. Nebo například Kou a jeho kolegové [39] potlačili vibrace pomocí synchronního motoru s permanentními magnety (PMTLSM). Avšak objem, hmotnost a cena těchto strategií pomocí tlumičů jsou kritickým problémem pro hromadnou výrobu.

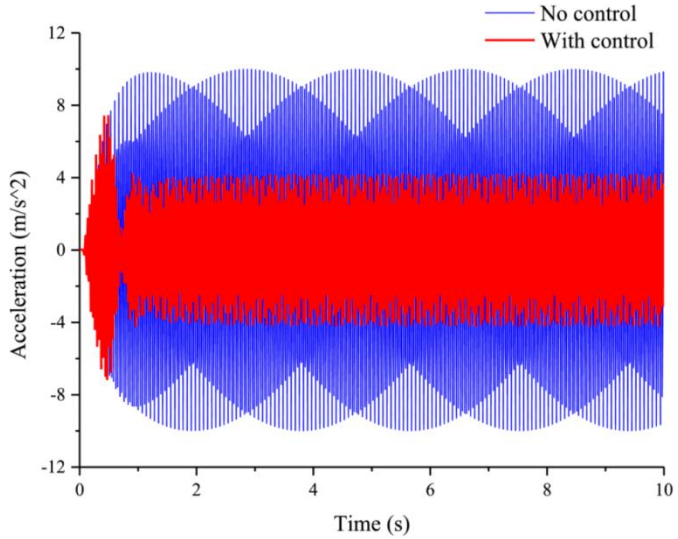
Proto výzkumníci [40] navrhli zobecněnou strategii pro potlačení vibrací v reálném čase tím, že zabrání systému v provozu na rezonančních frekvencích během volnoběhu a jízdy. Při použití vysoce výkonného elektromotoru (FOC) lze k trakčnímu motoru přidat menší posun rychlosti otáčení, aby se tak výrazně snížily rezonanční vibrace se zanedbatelným dopadem na rychlost vozidla. Dále se při této strategii využívá senzoru zrychlení pro poskytování zpětné vazby ohledně vibrací ovladači pro potlačení vibrací. Vzhledem k tomu, že vibrace jsou na základě zpětné vazby potlačeny v reálném čase, tento systém představuje možnost pro různá vozidla za různých jízdních podmínek. Navíc se dá tato možnost tlumení vibrací kombinovat i

s již dříve zmíněnými metodami potlačení vibrací a nevyžaduje pro aplikaci žádný další hardware kromě stejného regulátoru, který je používaný pro řízení hnacího motoru.

Pro zobrazení zpětné vazby o velikosti vibrací je použit snímač zrychlení, aby se zabránilo nežádoucímu chvění, když jsou vibrace vozidla mírné a zanedbatelné. Výsledky zobecněné strategie nasimulované v programu Matlab/Simulink pro rychlost otáčení trakčního motoru 250 rad/s jsou zobrazené na Obr. 16. Jedná se o rychlost trakčního motoru, kdy frekvence vibrací nerezonují, proto i zrychlení zobrazující vibrace je pro redukci vibrací skoro stejné jako bez redukce. Ovšem při rychlosti otáčení trakčního motoru 180 rad/s jsou již znatelné rozdíly. Jedná se o rychlost, kdy vibrace rezonují, a jak je zobrazeno na Obr. 17, při potlačení vibrací je dosáhnuto zrychlení 4,54 m/s^2, zatímco bez potlačení je zrychlení 10,00 m/s^2. Vibrace jsou tedy redukovány o 45 % bez kombinace s jinými metodami.



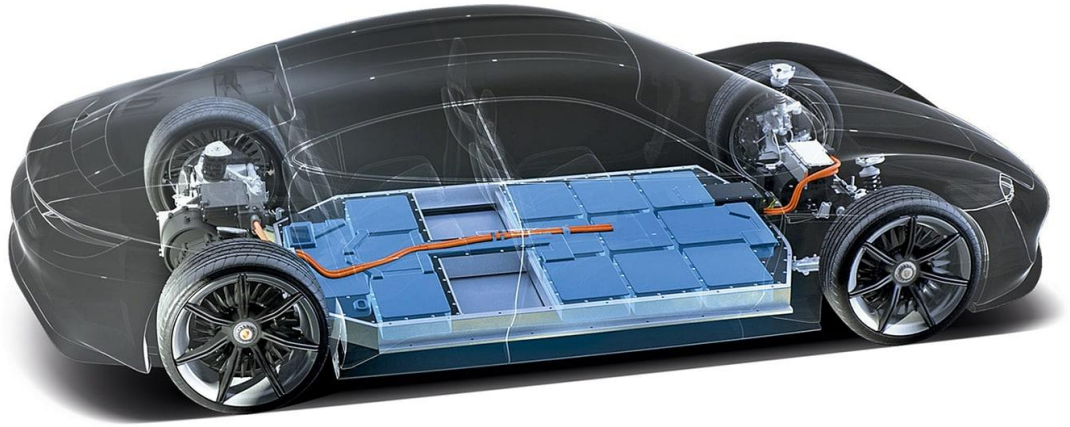
Obr. 16 Simulace zobecněné strategie tlumení vibrací při rychlosti otáčení trakčního motoru 250 rad/s [40], No control – bez potlačení, With control – s potlačením



Obr. 17 Simulace zobecněné strategie tlumení vibrací při rychlosti otáčení trakčního motoru 180 rad/s [40], No control – bez potlačení, With control – s potlačením

2.2 VIBRACE U BATERIÍ

Vibrace baterií u EV souvisí s jejich bezpečností, která je velice důležitá. Výkon baterie EV určuje výdrž a celkově vyspělost technologie EV. Stalo se již mnoho případů, kdy EV explodovalo v důsledku poruchy u baterie. Bezpečnost baterie zahrnuje tři hlavní aspekty: elektrickou bezpečnost, tepelnou rovnováhu a vibrace. Samotné vibrace mohou vést k poklesu výkonu baterie způsobením změny odporu na baterii, narušením kontaktu u spojů nebo nekontrolovatelné zahřívání během jízdy. Výkon baterie závisí nejen na systému řídícím baterii (BMS), který zajišťuje chytré nabíjení a vybíjení baterie, ale i na stabilitě baterie. Vlastnosti EV se se změnou povrchu, po kterém jede, mění a to ovlivňuje i pohyb baterie. Je tedy potřebné zajistit bezpečnost a pohyb baterie.



Obr. 18 série baterií pro pohon u vozidla Porsche Taycan [42]

U baterií jsou 3 kritické faktory: vertikální posuv, úhel sklonu a úhel natočení, ty se vlivem vibrací v průběhu jízdy mění. Dle [43] je kritickým ovlivňujícím faktorem vibrace baterií tuhost zavěšení baterie. S větší tuhostí zavěšení se postupně stabilita baterie snižuje a vibrace se zvyšují. Optimální hodnoty stability baterie se dosáhne správným výběrem parametrů odpružení a zavěšení, které sníží vibrace od nerovností vozovky. Jako další řešení se jeví vybavení EV aktivní kontrolou náklonu vozidla.

Několik organizací vyvinulo standardy a normy pro testování baterií EV, z nichž každá má svůj vlastní přístup:

IEC 62660-2 (2018) [44] definuje test spolehlivosti a využití lithium-iontové baterie. Zahrnuje testování odolnosti při vysokých teplotách, vibracích, nárazech, elektrického zkratu či rozdrcení. Cílem vibrační části testu je charakterizovat odezvu baterie na provoz vozidla. Vibrační test pak sestává z náhodného profilu vibrací prováděného během osmi hodin pro všechny tři osy. Šoková část pak probíhá při 10 polovičních sinusových impulzech ve všech šesti prostorových směrech.

SAE J2464 (2021) [45] definuje test spolehlivosti, který zahrnuje monitorování nebezpečných látek a mechanické, tepelné a elektrické využití. Zkoušky mechanického namáhání zahrnují

náraz, pád, průnik, převrácení, ponoření do vody a rozdrcení. Šoková část využívá tři sinusové impulsy na všech třech osách v kladném i záporném směru. SAE J2380 (2021) [46] poskytuje zkušební postup pro vliv dlouhodobých vibrací vyvolaných vozovkou na výkon a životnost baterií EV. Náhodné profily vibračních zkoušek se provádějí ve třech osách po dobu až 38 hodin. Vybití baterie se během testování mění. Testovací baterie je zároveň vybavena tak, aby detekovala rezonance a ztrátu elektrické izolace nebo abnormální teplotní podmínky.

UN 38.3 (2016) [47] definuje test a požadavky na bezpečnou přepravu lithium-kovových a lithium-iontových baterií, včetně testování nadmořské výšky, teploty, vibrací, otřesů a nárazů. Vibrační test se skládá z 3 hodiny dlouhého sinusového kmitání ve všech třech osách. Šokový test se provádí pomocí tří polovičních sinusových impulzů na třech osách v kladném i záporném směru. Od 1. ledna 2020 musí zásilky lithiových baterií poskytovat informaci o tom, že prošly testem UN 38.3.

ISO 19453-6 (2020): ISO 19453 [48] definuje podmínky prostředí pro testování elektrických součástí pohonného řetězce EV. Část 6 se poté konkrétně vztahuje na lithium-iontové baterie a systémy napěťové třídy A a B. Účelem tohoto dokumentu je definovat standardní zkušební postupy pro lithium-iontové baterie a umožnit pozorovat spolehlivost baterie. Norma také klasifikuje bateriové sady a systémy a specifikuje zkoušky a jejich okrajové podmínky.

2.3 SHRNUTÍ VIBRACÍ U ELEKTROVOZIDEL

Jak již bylo zmíněno, vibrace jdou ruku v ruce s hlukem a každý zdroj NVH vytváří jak hluk, tak vibrace. Stejně jako u hluku i u vibrací u EV se ostatní zdroje vibrací dostanou do popředí kvůli chybějícím vibracím od spalovacího motoru. Nejdůležitější oblastí u vibrací je potlačení rezonancí, které mohou být pro řidiče a pasažéry nepříjemné z důvodu zesilování intenzity vibrací. Toho se dá dosáhnout pomocí správné volby tlumičů nebo metodou tlumení v reálném čase, která se dá kombinovat i s jinými metodami tlumení jako např. s aktivními absorbéry vibrací. Důležité je i potlačit vibrace baterie přenášené z nerovnosti povrchu vozovky a zvýšit tak výkon, ale hlavně bezpečnost EV. Fyzické poškození baterie např. právě kvůli vibracím by mohlo zapříčinit vnitřní zkrat, kterému se dá jen těžce zabránit a to by mohlo vést k fatálním následkům. Proto se také v současnosti s rozvojem EV mění přístup k metodám testování vibrací a k jejich standardům, které musí zajistit vyšší bezpečnost nejen baterie, ale celého EV.

3 NUMERICKÉ SIMULACE PŘI VÝVOJI EV

Pro optimalizaci výkonu, bezpečnosti a celkově stavu EV je nutné porozumět jeho provozu v různých jízdních, ale i okolních podmínkách. Některé z podmínek, jako například teplota, stav vozovky, sklon vozovky, styl jízdy a další, mohou výrazně ovlivnit výkon a vlastnosti vozidla. Aby bylo možné tyto podmínky a jejich následky odhadnout a učinit kritická rozhodnutí při návrhu vozidla, musí být hnací ústrojí EV přesně namodelováno, nasimulováno a zanalyzováno v daném měřítku. Kromě toho musí být tyto modely také dostatečně všestranné a univerzální, aby mohly být vyladěny na základě reálných naměřených dat a aby tak mohly poskytnout lepší možnost prodloužení životnosti vozidla od jeho vypuštění do provozu.

Existuje více druhů modelování vozidel [49] – např.: matematický model, model v ustáleném stavu, fyzikální model, přechodný model nebo dynamický model. Modelování vozidel může probíhat na různých úrovních, jako je např.: modelování systému, modelování podsystému nebo modelování součástí. Výběr typu modelu a modelovacích nástrojů záleží na parametrech, které má model zobrazit, a na analýzách, jež mají být provedeny na výsledcích modelování. Na druhou stranu spoléhat se při vývoji vozidel pouze na simulace může být nebezpečné, nepraktické a někdy i zbytečně nákladné. Proto je při vývoji EV nezbytná rovnováha mezi numerickou simulací a technickými experimenty.

Jeden z nejpoužívanějších programů pro simulaci je MATLAB/Simulink, který je schopný modelovat kompletní hnací ústrojí EV na různých úrovních. Software dokonce obsahuje řadu vzorových modelů pro simulaci EV a hybridních elektrických vozidel. Platforma podporuje např.: modelování založené na rovnicích, modelování založené na datech nebo fyzikální modelování vozidel. Ovšem je i mnoho jiných programů vytvořených za účelem simulace, např.: programy od firmy AVL, která se na simulaci a testování zaměřuje – AVL Cruise, AVL Fire, FIFTY2 Preon Lab a další.

3.1 DYNAMIKA POHYBU EV

Základem modelování EV je samotná dynamika pohybu vozidla. Pro modelování pohybu vozidla se využívá matematického modelu založeného na rovnicích. Dynamika pohybu vozidla je pak reprezentována rovnicemi v cyklech a implementována ve formě podsystémů, bloků a signálů v rámci programu Simulink. Jak udává Druhý Newtonův zákon – objekt zrychluje, je-li výslednice sil působící na těleso nenulová, stejně tak se pohybuje i vozidlo díky síle hnacího ústrojí, která překonává gravitační sílu, odpor vzduchu a valivý odpor. Zrychlení a rychlost, kterou se vozidlo pohybuje, závisí na výkonu hnacího ústrojí, celkové hmotnosti vozidla, stavu vozovky a aerodynamice vozidla. Pohyb vozidla se dá popsat pomocí rovnice:

$$k_m m \frac{dv_{xT}}{dt} = F_{TR} - F_{RL} \tag{16}$$

Kde F_{TR} představuje tažnou sílu od hnacího ústrojí, F_{RL} představuje síly působící od vozovky, m představuje celkovou hmotnost vozidla, v_{xT} představuje rychlost vozidla ve vodorovném směru a k_m představuje součinitel setrvačnosti vozidla. Část $k_m m \frac{dv_{xT}}{dt}$ počítá síly, které pohánějí vozidlo. F_{RL} můžeme dále rozepsat pomocí rovnic (17) - (20):

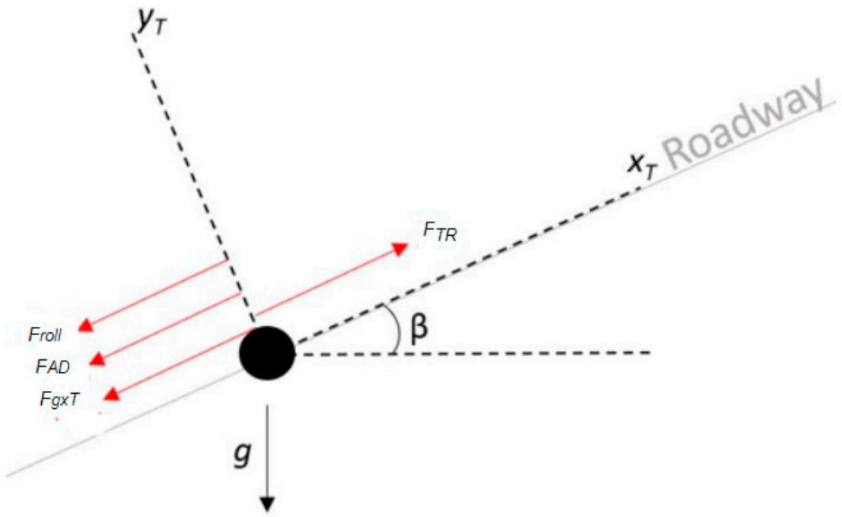
$$F_{RL} = F_{gxT} + F_{roll} + F_{AD} \tag{17}$$

$$F_{gxT} = m \times g \times \sin\beta \tag{18}$$

$$F_{roll} = m \times g \times \cos\beta\,(C_o + C_2 v_{xT}^2) \qquad \text{pro } v_{xT} > 0 \tag{19}$$

$$F_{AD} = \frac{1}{2}\rho C_D A_F (v_{xT} + v_0)^2 \qquad \text{pro } v_{xT} > 0 \tag{20}$$

Kde F_{gxT} je gravitační síla v kolmém směru, F_{roll} je valivý odpor od pneumatik a F_{AD} je odpor vzduchu vozidla. C_o a C_2 představují koeficienty valivého odporu, β představuje úhel stoupání ve stupních, g představuje gravitační zrychlení, ρ představuje hustotu vzduchu, C_D představuje koeficient odporu vzduchu, A_F představuje plochu čela vozidla a v_0 představuje rychlost větru před vozidlem. Síly působící na vozidlo jsou znázorněny na Obr. 19.



Obr. 19 Schéma rozložení sil působících na EV [49]

Vlastnosti a interakce pneumatik s vozovkou jsou důležitými parametry pro dynamiku vozidla. Tažný moment od hnacího ústrojí se převádí na tažnou sílu skrz interakci mezi pneumatikou a povrchem vozovky. Rychlost pneumatiky a rychlost vozidla ve vodorovném směru jsou vektory měnící svoji velikost i směr. Jsou funkcí působících sil na pneumatiky zahrnující působení karoserie vozidla na kola ve směru svislém F_z a působení pneumatik na vozovku ve směru vodorovném F_x. Rychlost valení pneumatiky souvisí s úhlovou rychlostí pneumatiky a velikostí poloměru kola r_w. a je dána rovnicí (21).

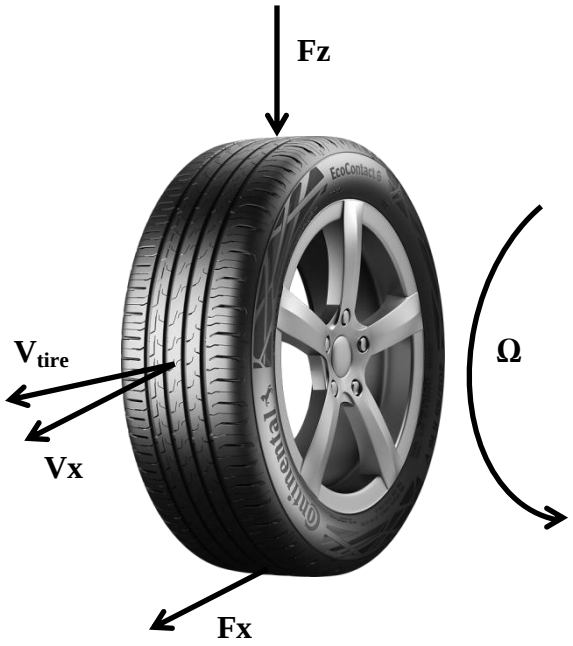
$$V_{tire} = r_w \Omega \tag{21}$$

Poměr rychlostí ve směru x – rychlosti vozidla V_x a rychlosti pneumatik V_{tire} je definován jako prokluz kola, který je dán vztahem (22).

$$s = 1 - \frac{V_x}{V_{tire}} \tag{22}$$

Při brzdění je prokluz kola dán vztahem (23).

$$s = 1 - \frac{V_{tire}}{V_x} \tag{23}$$



Obr. 20 Schéma rozložení sil a rychlostí na kole vozidla [58]

3.2 MODELOVÁNÍ A SIMULACE POHONNÉHO ŘETĚZCE EV

Pro modelování a simulaci pohonného řetězce EV je nutné určit klíčové specifikace, ty jsou odečteny jako příklad pro vozidlo Chevrolet Bolt EV a znázorněny v Tab. 6. Tyto parametry jsou poté využity pro matematický model EV. Model pohonného řetězce dále popisuje ztráty, které vznikají v převodovce.

Tab. 6 Klíčové specifikace vozidla Chevrolet Bolt EV [49]

Specifikace	Hodnota
Zrychlení (0-100 km/h)	7,5s
Hmotnost vozidla	1616,15kg
Výkon motoru	200hp/150kW
Krouticí moment motoru	360Nm
Koncový převodový poměr	7,05:1
Energetická úspornost	186,4Wh/km
Kapacita baterie	53kWh
Maximální rychlost	150km/h
Koeficient aerodynamického odporu	0,308

3.3 MODEL PROTOTYPU EV

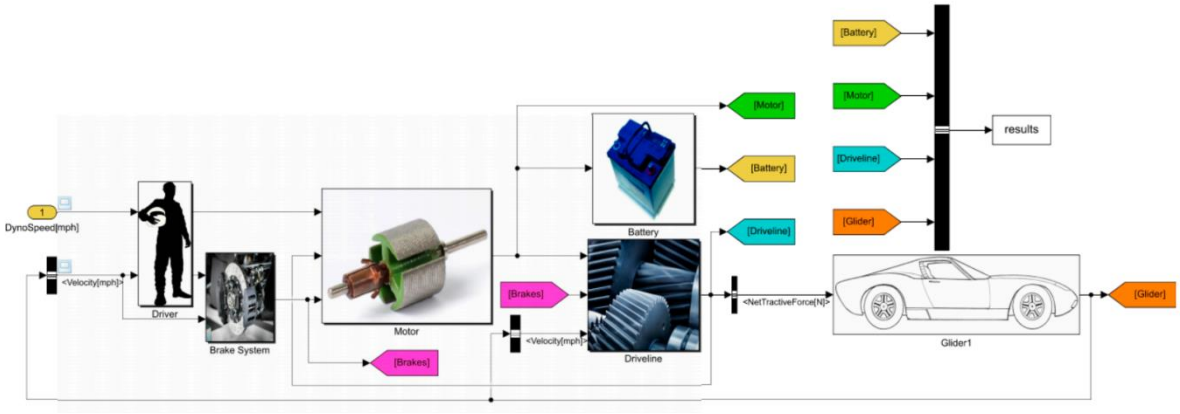
Jak již bylo zmíněno, matematický model je založený na rovnicích, zahrnujících každou součást vozidla nebo podsystému jako sérii bloků, které jsou vzájemně propojeny pomocí signálů. Signály jsou propočítávány a aktualizovány v každém časovém kroku. Model prototypu představuje model sil působících na karoserii vozidla reprezentovanou jako hmotný bod, jak je popsáno v rovnicích (17) - (20). V Tab. 7 je souhrn parametrů použitých pro výpočet dynamiky vozidla v každém časovém kroku. Rovnice (17) - (20) jsou na model implementovány tak, že od tažné síly se odečte součet sil působících od vozovky a tím se získá setrvačná síla, která se převede na zrychlení hmotného bodu vozidla a potom se časově integruje do výstupního modelu rychlosti vozidla, ten je pak přiváděn zpět do řídícího subsystému.

Tab. 7 Souhrn parametrů prototypu [49]

Značka	Jednotka	Specifikace	Hodnota
ρ	kg/m^3	Hustota vzduchu	1,23
C_d	-	Koeficient odporu vzduchu	0,38
A_f	m^2	Přední plocha vozidla	2,1
V	m/s	Rychlost vozidla	-

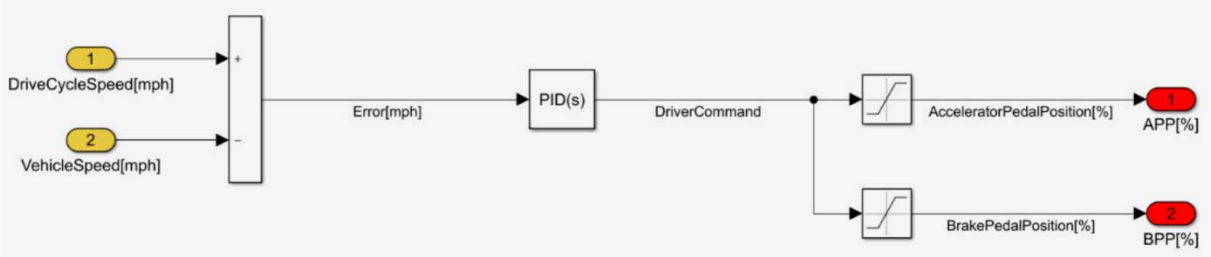
a	m/s^2	Zrychlení vozidla	-
m_i	kg	Setrvačná hmotnost vozidla	1678,3
m	kg	Hmotnost vozidla	1616,15
g	m/s^2	Gravitační zrychlení	9,81
Φ	stupně	Úhel stoupání vozovky	0
C_{rr}	-	Koeficient valivého odporu	0,01

Obr. 21 je znázornění subsystému modelu prototypu v rámci programu Simulink, ve kterém jsou implementovány rovnice (17) - (20).



Obr. 21 znázornění subsystému modelu prototypu v programu Simulink [49]

Obr. 22 blíže znázorňuje, jak vypadá blokové schéma, které představuje výpočty pro určení vzdálenosti, spotřebované tažné energie, tažné síly, energie potřebné pro brzdění a další. Vstupy simulačních bloků jsou označeny žlutě a výstupy simulačních bloků jsou označeny červeně.



Obr. 22 znázornění blokového schématu [49]

3.4 MODEL ŘIDIČE

Model řidiče se dá pomocí programu Simulink reprezentovat jako blokové schéma, kdy vstupy do bloku řidiče jsou rychlost jízdního cyklu a zpětná vazba z modelu prototypu jako rychlost vozidla. Rozdíl mezi oběma rychlostmi je přiváděn zpět do PID regulátoru a výstupem je povel řidiče o poloze plynového (APP) nebo brzdového (BPP) pedálu. Tento modelovací přístup má napodobovat chování a ovládání vozidla řidičem, kterého vyznačuje PID regulátor, který sleduje rychlost vozidla a v daném okamžiku reaguje silou na pedál plynu nebo brzdy vzhledem k požadované změně rychlosti vozidla [49].

3.5 MODEL BRZDOVÉHO SYSTÉMU

Mezi další části simulačního modelu patří brzdový systém. Vstup do brzdového systému je rychlost vozidla a brzdový pedál (BPP) z modelu řidiče. Signál BPP se používá k určení velikosti brzdné síly, kterou má řidič v úmyslu použít na vozidlo. Tato síla je poté rozdělena na výstup regenerativní brzdné síly a výstup třecí brzdy na základě omezení regenerace energie systému a motoru. Vstup rychlosti vozidla se používá k určení, zda je rychlost vozidla nad určitou hodnotou rychlosti potřebné pro použití rekuperačního brzdění, kterého EV hojně využívají [49].

3.6 MODEL MOTORU

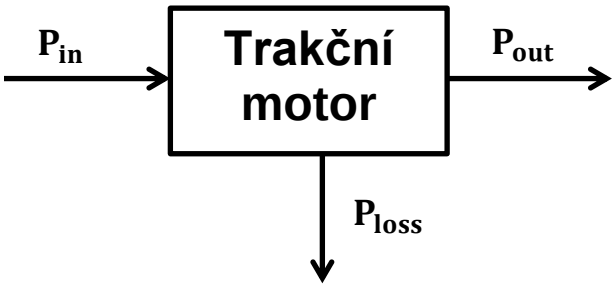
Elektrické motory patří mezi kritické součásti pohonného řetězce EV [50], které zažívají přechodové jevy při velmi vysokých rychlostech. Ke zlepšení výkonu a urychlení procesu vývoje jsou zapotřebí dynamické modely s dostatečnou přesností. K tomu se využívá model ztráty výkonu motoru. Opět se jedná o matematický model znázorněný na Obr. 23 využívající tentokrát rovnici ztráty výkonu elektromotoru. Model motoru přijímá jako vstupní signál polohu plynového pedálu (APP) a zpětnou vazbu o rychlosti motoru. Tyto hodnoty jsou použity v podsystému omezovače krouticího momentu elektromotoru k určení maximálního krouticího momentu. Ve stejném principu určuje podsystém omezovače regenerace k určení maximálního momentu regenerace, který je specifikován faktorem maximálního povoleného momentu motoru. Čistý krouticí moment se pak využije k výpočtu výstupního výkonu pomocí modelu ztráty výkonu motoru, jak je popsáno pomocí vzorců (24) - (26) [49][51].

$$P_{mot} = T_{mot}\omega_{mot} \tag{24}$$

$$P_{loss} = k_c T^2 + k_i \omega + k_\omega \omega^3 + C \tag{25}$$

$$P_{in} = \tau \times \omega + P_{loss} \tag{26}$$

Kde T_{mot} představuje krouticí moment motoru, ω_{mot} představuje otáčky motoru, k_c, k_i, k_w a C představují ztrátové konstanty motoru.



Obr. 23 Model ztráty výkonu motoru [49]

Další modely motoru mimo program Simulink můžou mít různá schémata: elektro-magneto-mechanického modelování, modelování magnetických ztrát, modelování stárnutí a další.

Pro synchronní elektromotor s permanentními magnety byla vyvinuta nová metoda [52] pro výpočet ztrát indukovanými proudy v permanentních magnetech pomocí kombinace magneto-statického výpočtu konečných prvků a analytického přístupu. Vlivem zvýšené teploty byla hodnocena i demagnetizace.

Dále byla vyvinuta nová metoda pro modelování indukčního elektromotoru, který popisuje elektrické, magnetické, mechanické i termické stárnutí motoru. Jedná se o tepelný model, kdy výstupem je rozložení teploty na motoru, které se vrací zpět do elektromechanického modelu pro výpočet správných hodnot teplotně závislých odporů statoru a rotoru. Tepelný model ukazuje závislost mezi ztrátou životnosti a rozložením teploty na vinutí.

Pro reluktanční motor byl vyvinut přístup pomocí reluktanční sítě, která se ukázala jako dobrý kompromis mezi MKP a analytickým výpočtem z hlediska rychlosti a přesnosti simulace. Tato metoda byla ověřena jak pro statický, tak i pro dynamický provoz [52].

3.7 MODEL BATERIE

Do modelu baterie pomocí programu Simulink je spolu s ní zahrnut i model systému BMS, který počítá a kontroluje limity nabití a vybití baterie a hlídá její parametry. Část modelu samotné baterie je vytvořena na základě zdroje konstantního napětí zapojeného v sérii s odporem 0,1 ohm. Model se dále opírá o výpočty ztráty výkonu, ze kterých se určí výstupní proud baterie. Stav nabití baterie je poté určen časovou integrací výkonu a porovnáním s celkovou kapacitou baterie nastavenou ze zadaných parametrů baterie [49].

Mezi další přístupy, jak je možné nasimulovat baterii, patří ekvivalentní obvodový model a semi-empirický tepelný model. Účelem těchto modelů je opět poskytnout simulaci chytré baterie s uživatelsky přívětivou použitelností v praxi a pro použití v dynamických simulacích a zátěžových cyklech i s přihlédnutím na stáří baterie. Vstupy těchto modelů jsou teplota, proud, napětí a ztráta výkonu. Výstupy jsou pak stav nabití baterie a její stáří. Stáří baterie popisuje stav článků baterie, který se projevuje sníženou kapacitou, vyšší impedancí a nižším výkonem baterie. Dále je u těchto modelů možné vyladit některé fyzikální vlastnosti související se stárnutím, energetickou propustností a vnitřním odporem, což umožňuje simulaci různých druhů baterií. Pro zohlednění stárnutí baterie jsou v simulačním bloku nastaveny podmínky charakterizující stárnutí v závislosti na počtu cyklů baterie. Dle [52] se

oba modely baterií velice dobře shodují s experimentálními daty. Během provozu baterie se generuje teplo a je obecně dáno, že základní parametry baterie ovlivňují stárnutí a výkon baterie i teplotu baterie při provozních podmínkách. Chladicí systém je proto důležitý pro zajištění správné teploty baterie, a tak i zajištění vysokého výkonu a dlouhé životnosti baterie. Je proto dobré kombinovat model baterie s modelem chlazení.

3.8 TEPLOTNÍ SIMULACE EV

Chlazení ovšem nezajišťuje pouze správnou teplotu baterie, ale i tepelný komfort cestujících, který patří společně s dojezdem EV mezi nejdůležitější prodejní body. Tyto dva aspekty se však pravidelně střetávají, protože dojezd vyžaduje, aby všechny systémy vozidla fungovaly co nejúčinněji, zatímco HVAC systém je energeticky náročný. Zapnutí HVAC systému u EV může snížit jeho dojezd až o polovinu. Teplota pak může také ovlivnit provozní účinnost elektrických součástí hnacího ústrojí, přičemž na extrémní teploty je vysoce citlivý i elektromotor, což může negativně ovlivňovat výkon EV. Další tepelné jevy mohou způsobit přechodný provoz nebo rychlé nabíjení. Tyto jevy je třeba předvídat, zpracovat a v případě potřeby jim předejít, aby tak byla baterie ochráněna před stárnutím. Správnou optimalizací rozmístění součástí, aerodynamikou a použitím systémů tepelných čerpadel a prediktivního řízení se dosáhne tepelného komfortu cestujících, dojezdu, bezpečnosti a dostatečné životnosti všech součástí hnacího ústrojí. Systémy na takovou optimalizaci jsou však složité a časově náročné na kalibraci a testování, které se obvykle provádí pomocí drahých prototypů vozidel nebo dokonce aerodynamických klimatických tunelů. Za účelem zjednodušení procesu a snížení jeho časové náročnosti tak společnost AVL [54] vytvořila program ThermalLab v kombinaci s testovacím systémem R&D, který zahrnuje simulační modely komponentů hnacího ústrojí a tepelnou hardwarovou testovací základnu AVL VTMS TS, díky čemu je možné provést tepelné testování a kalibraci. Díky kombinaci simulovaných dílů a skutečného hardwaru se sníží vývojová rizika, náklady a i časová náročnost. Simulační program vyváží technické cíle, jako jsou životnost baterie, náklady na systém a dojezd. To výrazně snižuje potřebu provádět testy vozidel v aerodynamických tunelech a na testovacích tratích, díky čemu je urychlen celý vývoj. Chladicí okruhy lze v programu testovat za dynamických podmínek i bez hardwaru. Lze například vyhodnocovat výkon chladicích okruhů na základě skutečných jízdních cyklů, nebo kalibrovat ovládací prvky chladicího systému, jako jsou clony po studených startech, tepelné strategie baterie, nebo správný chod výměníku tepla pro různé jízdní cykly, ovšem potencionálních aplikací je mnohem více.

3.9 VÍCEDOMÉNOVÁ PLATFORMA PRO MODELOVÁNÍ

V článku [52] autoři představili novou pokročilou platformu, kde lze modelovat a zároveň propojit více úrovní modelu najednou – model hnací soustavy, elektrické jednotky, chladicího systému, řídicího systému a další. Plná integrace všech komponent umožňuje globální hodnocení a optimalizaci spotřeby energie v realistických jízdních podmínkách. Plné propojení modelu chladicího systému s tepelnými a výkonnostními modely baterie a s modelem invertoru je nepostradatelné pro přesnou simulaci výkonu jednotlivých elektronických komponent a jejich stárnutí. Díky spojení všech modelů je také zkrácený čas vývoje pohonného řetězce. Další předností, kterou vícedoménová platforma nabízí, je analýza tepelných jevů a jevů stárnutí v jednom modelu, který se zároveň používá pro analýzu výkonu vozidla a rozvržení pohonného řetězce. To má za následek snížené úsilí při vývoji koncepce vozidla, protože lze zvážit a virtuálně otestovat mnoho konstrukčních aspektů v jediném

modelu. Systém obsahuje integrované komponenty, které lze při vytváření simulací využít. Autoři tedy museli ověřit, že integrované součásti lze využít do každého modelu vozidla. Z tohoto důvodu bylo provedeno mnoho simulací při různých metodách. Dále muselo být ověřeno, že i model baterie může být použit do různých druhů EV. Model baterie byl proto nakonfigurován v dostatečné škále parametrů výstupních napětí a kapacit. V každém prostředí byly vytvořeny různé konfigurace vozidla a následně byly propojeny s Globálním simulačním prostředím (GSP) od Volvo Group, GoFast od CRF a AVL od platformy LMS a s Imagine.Lab Amesime Vehicle platformou. Fyzické modely elektrických podsystémů byly naimportovány z jiných prostředí a úspěšně nasimulovány v úplném modelu vozidla každého partnera. Jedná se tedy o komplexní systém propojený s mnoha dalšími platformami, který je velice efektivní a flexibilní pro simulaci EV, hlavně z hlediska stárnutí a vlivu teploty na komponenty.

3.10 SIMULACE HLUKU OD ELEKTROMOTORU

Ovšem ne vždy se vyplatí dělat komplexní simulaci celého EV. Někdy je mnohem levnější a efektivnější zjistit většinu parametrů pomocí experimentů a simulaci udělat jen pro kritické části vozidla. Mezi takové, jak již bylo zmíněné, patří právě elektromotor a jeho hluk. Vibrace a hluk elektromotoru je komplexní problém z mnoha fyzikálních polí související s elektromagnetickými a mechanickými zvukovými poli. Pokud jde o vibrace z motoru, obecně se uznává, že hlavními faktory elektromagnetických vibrací jsou elektromagnetická síla a krouticí moment motoru. Hlavní metody výzkumu vibrací a hluku elektromotoru s permanentními magnety (dále jen PMSM) jsou analytická metoda, metoda hraničních prvků (dále jen BEM) a metoda experimentální.

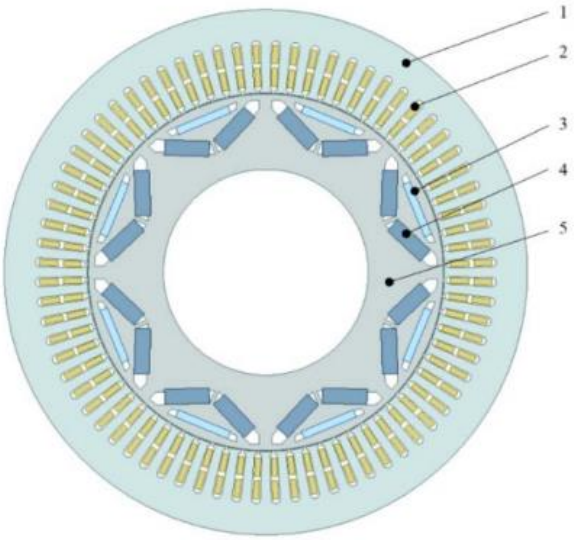
V článku [53] byl pro simulaci hluku použit software pro analýzu elektromagnetického pole k sestavení elektromagnetického simulačního modelu PMSM. Dále byla provedena analýza pomocí programu ANSYS Maxwell a byla nasimulována harmonická odezva motoru při elektromagnetickém buzení. Dále byla v článku provedena simulace PMSM pomocí metody BEM v akustickém softwaru LMS Virtual Lab.

V programu Maxwell byl vytvořen model simulace elektromagnetického pole PMSM Obr. 25 se základními konstrukčními parametry viz Tab. 8**.** Jednalo se o třífázový synchronní motor permanentním magnetem s vnitřním rotorem se 4 páry pólů a se 72 sloty. Rotor byl vybaven vloženými magnetickými póly typu V+1 s chlazením pomocí cirkulující vody. Simulace byla provedena pro otáčky rotoru 3000/min a zatížení motoru 20Nm. Doba trvání simulace byla 0,2s s délkou kroku $5 \cdot 10^{-5}$s. Dále byla získána křivka prostorového rozložení hustoty radiální elektromagnetické síly Obr. 24**.**

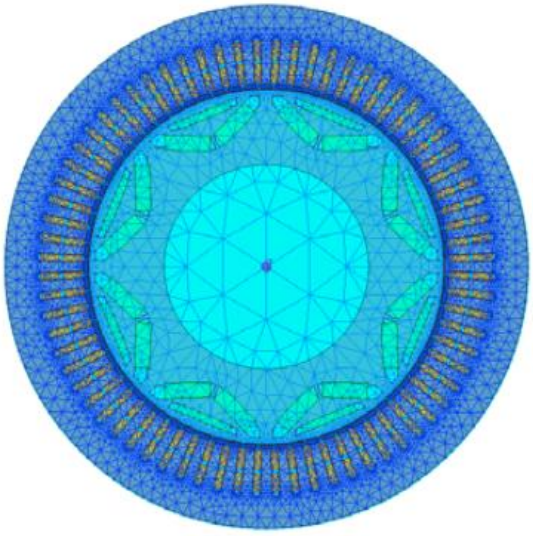
Tab. 8 Základní konstrukční parametry elektromagnetického pole PMSM [53]

Parametry	Hodnota	Parametry	Hodnota
Počet fází	3	Výkon [kW]	40
Počet pólů	4	Maximální výkon [kW]	85

Počet slotů	72	Otáčky [min^{-1}]	3000
Napětí [V]	350	Maximální otáčky [min^{-1}]	10000

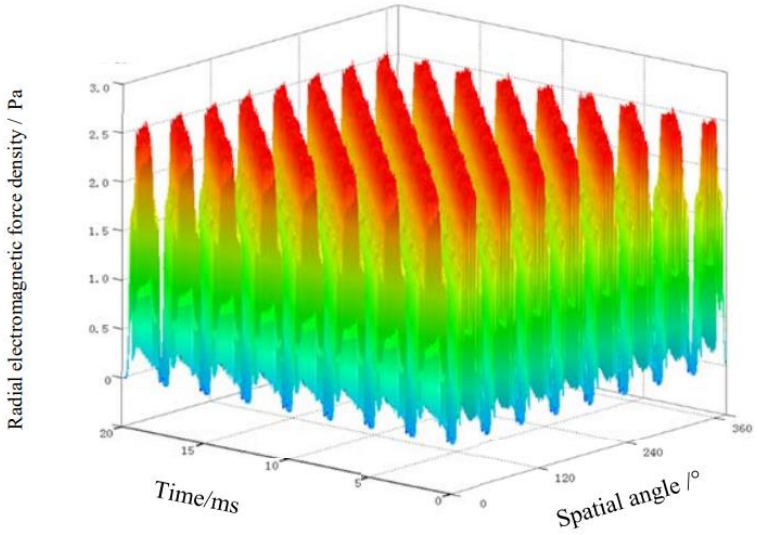


Obr. 24 Model simulace elektromagnetického pole PMSM, 1 – stator, 2 – vinutí, 3 – permanentní magnet ve tvaru „I“, 4 – permanentní magnet ve tvaru „V“, 5 – rotor [53]



Obr. 25 Elektromagnetická síť vytvořená pomocí metody MKP [53]

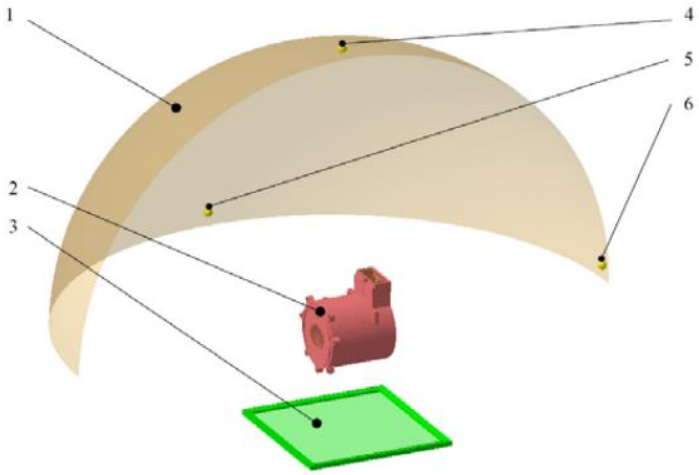
Dále byly vykresleny výsledky výpočtů v čase a byla extrahována radiální složka, tangenciální složka a elektromagnetická síla hustoty toku ve vzduchové mezeře. Na Obr. 26 je vykresleno prostorové rozložení radiální elektromagnetické síly v čase. Výsledky ukazují, že radiální a tangenciální složky radiálního toku ve vzduchové mezeře se mění periodicky v prostoru a čase. Ve stejném časoprostorovém souřadnicovém systému je změna radiální elektromagnetické síly stejná jako u hustoty radiálního toku ve vzduchové mezeře a číselný výsledek je stejný jako výsledek z teoretického výpočtu.



Obr. 26 Prostorové rozložení radiální elektromagnetické síly v čase [53], vodorovná osa – čas [ms], kolmá vodorovná osa – úhel v prostoru [°], svislá osa – hustota radiální elektromagnetické síly [Pa]

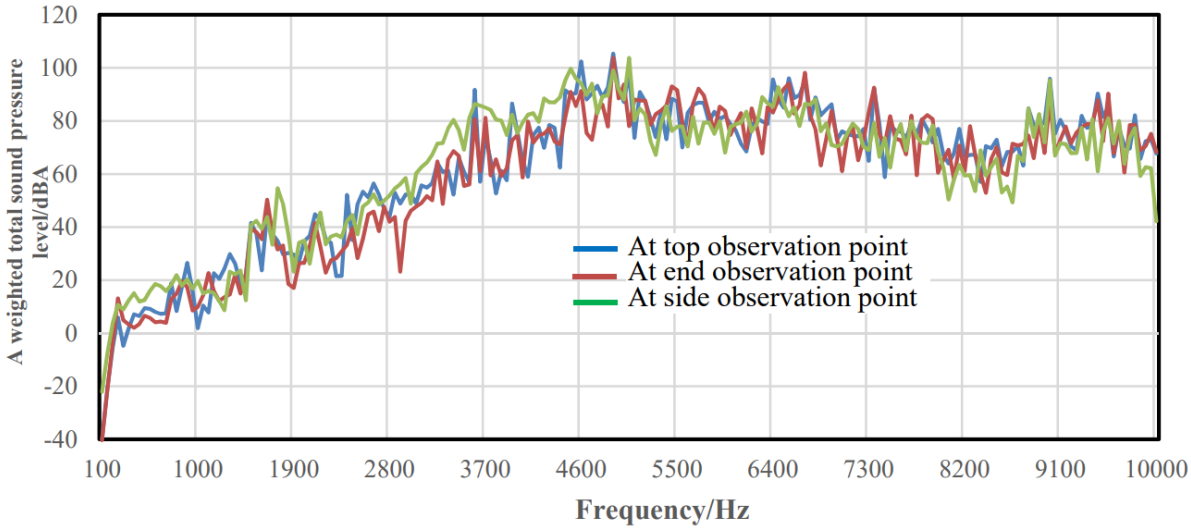
Po provedení elektromagnetické simulace byl použit program ANSYS Maxwell pro analýzu magnetické struktury a simuluje se harmonická odezva motoru od elektromagnetické budicí síly při pracovních podmínkách 3000ot/min a zatížení 20Nm. Frekvenční rozsah je od 0 do 10000Hz s frekvenčním intervalem 50Hz. Poté jsou výsledky zrychlení vibrací v jednotlivých směrech vykresleny do grafů.

Jako poslední část simulace hluku od elektromotoru byla provedena analýza pomocí softwaru LMS virtual Lab metodou BEM. Metoda BEM pracuje s již získanými výsledky z předchozích simulací. Poté se analýzou zvukového pole získá hodnota radiačního šumu a jeho rozložení na mřížce bodů po nastavené ploše. Model BEM a jednotlivé body pozorování jsou znázorněny na Obr. 27.



Obr. 27 BEM model synchronního motoru s permanentními magnety, 1 – síť bodů akustické plochy, 2 – simulační model motoru, 3 – reflektor, 4 – horní bod akustické plochy, 5 – pravý bod akustické plochy, 6 – zadní bod akustické plochy [53]

Aby bylo možné pozorovat citlivé frekvenční pásmo lidského ucha a přiblížit se lidskému sluchovému vjemu, je v každém pozorovacím bodě vypočítáno spektrum hladiny akustického tlaku. Výsledky simulace jsou znázorněny na Obr. 28, kde je vidět, že hladina akustického tlaku má nejvyšší hodnoty při 3700Hz, 4500Hz, 5400Hz a 6400Hz.



Obr. 28 Křivka hladiny akustického tlaku ve třech pozorovacích bodech, modrá křivka – horní bod akustické plochy, červená křivka – zadní bod akustické plochy, zelená křivka – pravý bod akustické plochy, svislá osa – akustický tlak [dB], vodorovná osa – frekvence [Hz]

3.11 SHRNUTÍ NUMERICKÝCH SIMULACÍ

Vývoj EV je jasným předpokladem pro splnění celosvětových emisních cílů pro dopravu během následujících 10 – 15 let, avšak většina vývojových metod a nástrojů byla optimalizována pro vývoj vozidel s konvenčními motory ICE a nebyla dostatečně přizpůsobena pro vývoj EV. Na odstranění těchto nedostatků tak bylo zaměřeno několik výzkumů, které postupně přišly s efektivním řešením – simulačními a testovacími metodami, které umožnily optimální, efektivní a cenově dostupný vývoj EV. Ovšem stejně tak jako EV se i simulační a testovací metody budou i nadále vyvíjet, aby se snížila jejich časová a cenová náročnost, nebo aby byly zaměřené více na kritické parametry charakteristické pro EV.

4 TECHNICKÉ EXPERIMENTY PŘI VÝVOJI EV

Testování je často považováno za činnost prováděnou na konci vývojového procesu, aby se na konci vývoje potvrdily funkční a bezpečnostní požadavky daného systému. Kvůli potřebě vývojových procesů se však tato potřeba změnila a testování probíhá ve všech fázích vývojového procesu. Aby však bylo možné ověřit životnost, výkon nebo bezpečnostní parametry EV v průběhu celého cyklu, bylo nutné zvolit a navrhnout vhodné testovací metody uzpůsobené přímo pro EV a jeho komponenty.

4.1 TESTOVÁNÍ BATERIE

Základem pro pochopení chování baterie jako celku je testování jednotlivých buněk baterie. Standardizované testovací postupy umožňují srovnání specifikací a chemických vlastností, ale i přizpůsobení simulačních modelů. Při testu stárnutí bývá zapotřebí přizpůsobit určité testovací parametry, aby byly respektovány změny fyzikálních vlastností baterie a aby bylo možné detekovat trendy stárnutí, které závisí na jednotlivých stresových faktorech. Pokud by se nepřizpůsobily testovací parametry, aby se respektovalo stárnutí buněk, může to mít za následek stárnoucí účinky závisející na kombinovaných stresových faktorech. Vzhledem k tomu, že účelem testování je pochopit chování buněk, které lze použít při predikci a modelování, je jasnou výhodou mít pod kontrolou alespoň stresový faktor. V článku [52] byly provedeny cyklické testy EIS a DC, které poskytly data o tom, jak funguje baterie při různých teplotách a rychlostech nabíjení. Výkon a kapacita baterie pak může souviset s její impedancí. Data jsou brána jako základ pro kalibraci modelu. Tyto testovací metody berou v úvahu zpětné smyčky pro automatizované adaptivní testování bateriových článků po celou dobu životnosti.

V současnosti se Karlsruhe Institute of Technology (KIT) [55] snaží vylepšit testovací metody pro bezpečnější bateriové systémy. Pro vývoj bateriových systémů jsou nutné spolehlivé testy bezpečnosti používaných lithium-iontových článků v reálném provozu. KIT ve spolupráci se zkušebními a normalizačními institucemi se snaží zdokonalit normy, které by zajistily vyšší bezpečnost, ale i flexibilitu při konstrukci baterií. Dnes se běžně používá postup zničení baterie při testování – např. propíchnutí baterie hřebíkem, je to z toho důvodu, že aby mohly být určité testy provedeny, je nutné bateriové články znehodnotit. Cílem těchto snah je vyvolat v článcích nejhorší možné defekty, aby bylo možné pozorovat, co se stane uvnitř baterie. Kromě propichování baterií je běžnou praxí i vystavování článků extrémnímu přebíjení nebo přehřívání. Rozdíl mezi těmito zkušebními metodami a reálným zatížením má své důsledky – zůstávají neodhaleny výrobní vady článků horší kvality a jejich rizika, zatímco skutečně bezpečné články jsou podhodnoceny. Zjednodušeně řečeno, pokud se baterie navrhují na nejhorší nerealistické scénáře, nevede to k tomu, aby byly bezpečnější, ale k tomu, aby byly objemnější, těžší a také dražší, než je nutné. Obavy z nebezpečných vad lithium-iontových článků jsou opodstatněné, protože na anodě se mohou tvořit lithiové usazeniny, které mohou způsobit zkrat a tím tepelný únik. Pravděpodobnost, že k takové situaci dojde, je vysoká zejména u článků, které obsahují méně kvalitní komponenty. Šíření takové poruchy do sousedních článků vede v nejhorším případě k řetězové reakci, která může způsobit požár baterie. Jakékoli zvýšení energetické hustoty za účelem prodloužení dojezdu EV nebo zlepšení udržitelnosti díky použití menšího množství surovin, je narušeno použitím příliš hrubých zkušebních metod. Je kladen příliš malý důraz na odolnost lithium-iontového článku vůči skutečně nebezpečným závadám, které se mohou u různých výrobců baterií lišit

kvůli konstrukci článku nebo jeho součástem. Výzkum KIT je tedy zaměřen na zdokonalení testů. V jiných testech je kladen důraz na vyvolání tepelného úniku způsobem, který je snadněji opakovatelný, bez ohledu na to, zda by k němu u buňky skutečně došlo v praxi. Výzkum KIT je zatím jediným výzkumem, kde se zkoumají skutečné a pro buňku specifické poruchy. Cílem je tedy vyvinout zdokonalenou zkušební metodu pro nové normy týkající se lithium-iontových baterií ve stacionárních a mobilních aplikacích s cílem odstranit stávající mezery v normách, pokud jde o realistická kritéria hodnocení bezpečnosti a kvality lithium-iontových baterií. Nové normy by pak měly umožnit snížení vstupních surovin a nákladů na vývoj tím, že zabrání nadměrnému návrhu a zlepší provozní bezpečnost lithium-iontových baterií.

4.2 TESTOVÁNÍ ELEKTROMOTORU

Stejně jako u baterie, i u motoru je důležitá část zachytit hlavní faktory ovlivňující stárnutí, jako je např. elektrické a tepelné namáhání. Teplotní faktor lze přiblížit Arrheniusovým vzorcem. V kombinaci se vzorcem napětí je pak v článku [52] navržen nejjednodušší vícefaktorový přístup. Značný problém pro mechanickou odolnost pak představují teplotní šoky (gradienty). Vícefaktorový přístup však nevedl k jednotným modelům nezávislým na výrobcích nebo na základní konfiguraci izolačního systému. Zbývá tedy pouze otestovat izolační systém v podmínkách, pro které byl vyvinut. To nezahrnuje pouze okolní podmínky, jako jsou teploty, vlhkost nebo nečistoty, ale i elektrické a mechanické podmínky. Pokud jsou známy charakteristické veličiny elektromotoru a měniče, měly by být také zahrnuty do testu, protože stárnutí izolace silně závisí na gradientech napětí na svorkách. Totéž platí i pro vibrace a teplené podmínky. Teploty komponentů nejsou ovlivněny pouze okolím, ale především jejich provozním režimem a jízdním cyklem EV. Zohledněním jízdních cyklů a stárnutí součástí bylo v článku [52] získáno několik důležitých poznatků. Za prvé, zahrnutí modelů stárnutí součástí do modelu vozidla poskytuje představu o tom, jak styl jízdy ovlivňuje životnost součástí. Navržené experimenty mohou být použity i k odvození maximálně škodlivých testů pro komponenty na základě dynamiky vozidla. Za druhé, budoucí testy součástí pohonu EV nebudou brát v úvahu pouze statické zatížení a podmínky. Budou co nejvíce napodobovat reálnou situaci ve vozidle, ale zároveň budou omezeny na nejvýznamnější podmínky, čímž se dosáhne optimálního zrychlení testu a zároveň dostatečné přesnosti faktorů určujících životnost a spolehlivost.

4.3 TESTOVÁNÍ MĚNIČE

V článku [52] se také zaměřili na testování, které vygeneruje data pro usnadnění modelování měniče. Měnič byl testován společně s elektromotorem na zkušebním zařízení. Chování baterie bylo nasimulováno pomocí emulátoru baterie, který používal vygenerované modely baterií. Postup testování byl následující: Nejdříve se zkalibrovaly všechny relevantní senzory a byly provedeny a otestovány chody naprázdno. Dále byly sesynchronizovány elektrické a mechanické úhly a byl zkalibrován systém sběru dat. Pro analýzu výkonu byla provedena dynamická elektrická měření při různých konfiguracích rychlosti a zatížení při konstantním stejnosměrném napětí. Dále byla provedena dodatečná měření při sníženém napětí pro posouzení celkového chování měniče. Pro analýzu teplot byla měřena tepelná odezva opět při různých konfiguracích rychlosti a zatížení při postupném ochlazování. Pro upřesnění modelu bylo měřeno napětí, proud, otáčky a krouticí moment při tepelně stacionárním stavu.

4.4 TESTOVÁNÍ EV POMOCÍ VÁLCOVÉHO DYNAMOMETRU

Testováním pomocí válcového dynamometru se určuje jízdní výkon EV. Testování výkonu vozidla obvykle zahrnuje jízdu vozidla podle jízdního cyklu EPA [56] (Environmental Protection Agency), který je primárně určen pro stanovení spotřeby paliva. Před testováním musí být válcový dynamometr zkalibrován tak, aby správně reprezentoval silové zatížení, které působí na vozidlo. To zahrnuje dojezdové testy, kdy vozidlo jede po rovné silnici a zrychluje až do 100 km/h, pak se zařadí neutrál, aby se odstranily schopnosti regeneračního brzdění a umožnilo se vozidlu přirozeně dojet. Z dojezdového testu se určí síly působící na vozidlo, které zahrnují jak aerodynamický, tak i valivý odpor.

V článku [49] byl proveden test k ověření dat z válcového dynamometru vůči reálným podmínkám na silnici. Vozidlo v testu prošlo podobnými jízdními cykly jak na válcovém dynamometru, tak na vozovce, přičemž se shromáždila data výkonu a energie vozidla v průběhu cyklů. Výsledky testu ukázaly, že rozdíly v rychlostech mezi dynamometrem a reálnou vozovkou jsou minimální během celého jízdního cyklu. Dynamické chování vozidla se na dynamometru mírně lišilo od chování na vozovce, ale v čase sledovalo podobný trend a spotřeba energie byla srovnatelná, nemá to tedy na výsledky žádný zásadní vliv.

4.5 TESTOVÁNÍ V AERODYNAMICKÉM TUNELU

Aerodynamický odpor se však mnohem detailněji oproti válcovému dynamometru změří pomocí aerodynamického tunelu. Testování probíhá při rychlosti až 180 km/h a je důležitým nástrojem v procesu vývoje. Větrný tunel umožňuje inženýrům rychle interpretovat výsledky a následně vyvíjet řešení pro zlepšení dojezdu a hlučnosti EV. Takovým testováním se zabývá například tým aktivní aerodynamiky ze společnosti Magna [57]. Tým v aerodynamickém tunelu testuje například aktivní deflektor předních kol, zadní difuzor, aktivní panely podvozku a další. Dále pomocí aerodynamického tunelu vyvíjí nové technologie pro automobilový průmysl. Zatímco počítačové simulace jsou v raných fázích vývoje cenné, testování v aerodynamickém tunelu poskytuje data, která určují hodnocení a výsledky. Většina výrobků tak končí v aerodynamickém tunelu, aby se vyhodnotilo jejich počínání v reálném světě. Zjednodušeně řečeno to umožňuje přejít od konceptu k realitě, protože se zde zlepšuje aerodynamika všech aspektů vozidla, včetně SUV či jiných osobních EV. Zatímco závodní týmy používají aerodynamický tunel ke zlepšení výkonu a rychlosti, inženýři aerodynamický tunel využívají k pochopení přínosu produktů na vozidlech. Aerodynamický tunel je také zdrojem inspirace, kde inženýři vymýšlí různé nápady na zefektivnění vozidel. Patří mezi ně např. morfující povrchy, neboli části karoserie a panely, které mění tvar a dynamicky se v průběhu jízdy pohybují, aby tak zlepšily nebo zhoršily podle dané situace aerodynamiku. Díky tomu testování v aerodynamickém tunelu umožňuje výrobu efektivnějších vozidel.

4.6 X IN THE LOOP TESTOVÁNÍ

Pokud bychom se ale vrátili k testování v rané fázi vývoje, je zde kvůli vyvíjecí se složitosti hnacích ústrojí a rostoucímu podílu EV začlenění spolusimulací v reálném čase pro účely kalibrace a validace jedním ze zajímavých řešení. Z tohoto důvodu vyvinula společnost FEV modulární zkušební stolici X in the Loop (XiL) [58]. Jedná se o standardní testování na zkušební stolici na skutečném komponentu zároveň ve spojení s virtuálními verzemi dalších

souvisejících komponent vozidla. To umožňuje virtuální validaci a kalibraci v raných fázích vývoje. XiL také umožňuje ověřování kritických scénářů, které není bezpečné testovat na silnicích, a odstraňuje nekonzistentní chování různých lidských testovacích řidičů, což zajišťuje vysokou míru reprodukovatelnosti. Mezi další výhody systému patří např. snížení počtu prototypů vozidel potřebných pro ranou fázi vývoje nebo snížení nákladů. Na stolicích od společnosti FEV se setkává reálný svět s virtuálním. Například při testování Engine in the Loop je motor testován na modulární a vysoce dynamické zkušební stolici motoru, zatímco odezva převodovky a vozidla je simulována prostřednictvím modelů. Pro usnadnění komunikace mezi těmito dvěma světy pak společnost FEV využívá vlastní software xMOD. Kromě toho, že software poskytuje komunikační prostředky, je schopen spouštět simulační modely až 40krát rychleji než jiné dostupné softwary. To umožňuje správu vysoce komplexních modelů na zkušebních stolicích v reálném čase bez ztrát informací. V programu lze také použít v případě potřeby již implementované modely, software jde ovšem propojit i s modely třetích stran.

4.7 TESTOVACÍ CENTRUM MERCEDES-BENZ

Jak již bylo zmíněno výše, testování probíhá téměř v každé části vývoje EV, avšak každý test je zaměřen na jinou část vozidla a je tak nutné zařídit různé podmínky pro testování. To vede k tomu, že si automobilky vytvářejí vlastní testovací centra, kde mají různé podmínky pro testování na jednom místě. Např.: Mercedes-Benz vytvořil jedno z nejmodernějších testovacích a technologických center [59], ve kterém je možné dělat různé druhy testů na jednom místě. Testovací centrum leží v obci Immendingen a obsahuje více než 30 různých testovacích tratí na ploše 520 hektarů. Centrum bylo otevřeno v polovině roku 2018 s celkovou délkou tratí 68 kilometrů. Technologické testovací centrum má mnoho zařízení pro testování a zdokonalování nových technologií zaměřených na EV, ale i na hybridní pohony a na asistenční či autonomní systémy. Nachází se zde silnice strmé, úzké, široké, víceproudé, pomalý provoz jako ve městě, prostě mnoho dopravních situací, které lze díky tomu realisticky simulovat.

Testovací centrum obsahuje např. oblasti: „Bertha“ pro hodnocení a testování vysoce automatizovaných vozidel o rozloze 100 000 metrů čtverečních vyasfaltované plochy. Testy jsou zde tedy prováděny hlavně za účelem zkoušky automatizovaného řízení a bezpečnostních funkcí pro současné a budoucí asistenční systémy. Oblast Bertha umožnuje například i testovat bezpečnostní situace při dálničních rychlostech nebo situace při změnách jízdního pruhu či ověřovat funkce prevence kolize v kolonách a na křižovatkách. Další oblast je oblast jízdní dynamiky, která umožňuje testovat chování vozidla na fyzických limitech. Dále se zde nachází brzdná plocha, která má pět rovnoběžných pásů s povrchy s různými koeficienty tření. Na této ploše se pak provádí měření brzdění. Další oblast je přírodní se sítí štěrkových cest a s volnými plochami pro testování a vývoj vozů s pohonem všech kol a terénních vozidel. Městská oblast obsahuje přes 1,5 kilometrů městských silnic s různým uspořádáním křižovatek pro testování různých asistenčních systémů, komunikace mezi vozy a další. Ve středu testovacího centra se nachází oválný okruh s klopenými zatáčkami, které lze absolvovat určitou rychlostí, aniž by muselo být vozidlo řízeno. Jedná se tedy o „nekonečnou rovinku“. Při testování může být také trať postříkána vodou, což umožňuje otestovat vodotěsnost za jízdy. Dále je zde „komfortní“ oblast, kde se testuje hlučnost vozidel. Za tímto účelem jsou zde speciální povrchy, jako jsou dlažební kostky s nebo bez výmolů nebo třeba povrch posypaný štěrkem. Je zde mnoho dalších oblastí zaměřených na jednotlivé testy částí

vozidel, víceméně se v testovacím centru nachází všechno, co je potřeba při vývoji a testování.

4.8 SHRNUTÍ TECHNICKÝCH EXPERIMENTŮ

Testování se provádí v průběhu celého procesu vývoje za účelem zlepšení predikce a návrhu modelu. Dalším důležitým přínosem testů je zajištění bezpečnosti EV, které musí být testovány na homologaci, a to jak na úrovni vozidla, tak na úrovni jednotlivých komponentů. Kromě vozidel jsou však testovány i všechny další okolní aspekty ovlivňující bezpečnost. Testování elektrických vozidel zahrnuje i nabíjecí stanice, bateriové sady, které mohou ve špatných podmínkách představovat nebezpečí, a související systémy. Z hlediska testování a certifikace spojují EV dva světy – automobilový průmysl, který vyžaduje normy ISO, a elektrotechnický průmysl, který vyžaduje normy IEC. Kromě toho, jak již bylo zmíněno, testování pokrývá velmi široké spektrum technologií a vybavení a v důsledku toho se může škála norem ještě rozšířit. Záleží také, na jaký trh je daný EV určen, např. v USA jsou jiné požadavky než v Evropě. Kromě pořizovacích nákladů je hlavním faktorem, který ovlivňuje volbu spotřebitelů, dojezd EV. Můžeme tedy očekávat pokračující vývoj v infrastruktuře nabíjení i ve zvyšování kapacity baterií, což bude klást i vyšší nároky na testovací zařízení.

ZÁVĚR

Problém NVH u elektrovozidel je jedním z nejdůležitějších faktorů ovlivňujících jízdní komfort. Od elektrických vozidel společnost očekává nejen, že nebudou znečišťovat životní prostředí, ale že budou i tišší a komfortnější pro pasažéry. I přesto, že elektromobily jsou obecně tišší než klasické automobily se spalovacím motorem, jak roste jejich popularita, zvyšují se zároveň i nároky na NVH.

Cílem této práce bylo popsat oblasti NVH u elektrovozidel a možnosti jejich řešení a shrnout současný stav numerických simulací a technických experimentů elektrovozidel při jejich vývoji.

Mezi hlavní zdroje hluku patří beze sporu elektrická pohonná jednotka. Za účelem snížení hluku elektrické pohonné jednotky bylo publikováno mnoho studií. Hlavním nástrojem jsou návrhové analýzy a výpočty, díky kterým se hluk optimalizuje ještě před samotným sestavením jednotky. Na samotnou optimalizaci je nutné se při vývoji více zaměřit, protože se jedná o zdroj pasažérům nepříjemného kvílivého zvuku. Dalším hlavním zdrojem, hlavně při nízkých rychlostech elektrovozidla, je HVAC systém. U tohoto problému se objevil nový přístup pro potlačení hluku uvnitř kabiny, nazývaný aktivní potlačení zvuku. Tento přístup se dá kombinovat i s pasivním potlačením vzduchu a zajišťuje tak velkou schopnost snížení celkového hluku uvnitř kabiny. Určitě se tedy jedná o metodu s potenciálem se dále vyvíjet pro svou větší účinnost a pro ještě větší snížení hluku v kabině. Naopak při vysokých rychlostech pak mezi zdroje hluku u elektromobilu patří proudění vzduchu. Aeroakustika elektrovozidla je podobná vozidlům se spalovacími motory a má tedy i podobné řešení. Pro minimalizaci hluku je nutné navrhnout správné utěsnění a aerodynamický tvar vozidla. Na takové návrhy se používají různé simulační programy nebo aerodynamické tunely. Mezi další možnosti snížení hluku elektrovozidel patří snížení hluku od interakce kol s vozovkou. Z hlediska snížení hluku povrch vozovky převládá nad pneumatikami. Chceme-li tedy snížit hluk od interakce kol s vozovkou, je nutné přizpůsobit hlavně povrchy vozovek, které budou mít na snížení hluku větší podíl. Optimalizace vlastností pneumatik pak tento efekt může ještě umocnit, což je důležité hlavně pro hlukové znečištění ve městech. Dál lze snížit hluk od elektromobilu díky snížení hluku při jeho zrychlování. Minulý rok (2021) byla navrhnuta nová metoda založená na měření intenzity zvuku, díky které se zlepšila časová náročnost a chybovost předchozích metod tlumení hluku při zrychlování, a tak může být elektromobil při zrychlování opět o něco tišší. I když v dnešní době přibývá osobních elektrovozidel, změny hluku v dopravě by byly pravděpodobně o dost znatelnější, kdyby přešla na elektrický pohon i nákladní vozidla, která dělají výrazně více hluku při nižších rychlostech, než osobní EV.

Snížení vibrací u elektromobilů je dalším důležitým parametrem pro zvýšení pohodlí pro cestující. Vibrace jsou úzce spjaty s hlukem, a tak většina zdrojů hluku jsou i zdroje vibrací. Nejdůležitější částí u potlačení vibrací je potlačení rezonancí. Proto byla vyvinuta nová metoda pro potlačení vibrací v reálném čase, která se dá navíc kombinovat i s jinými metodami a může tak ještě navýšit účinnost snížení vibrací. Snížení vibrací je ovšem důležité i pro bezpečnost elektrovozidla, a to hlavně u baterie. Proto se také v současnosti s rozvojem elektrovozidel mění přístup k metodám testování vibrací a k jejich standardům, které musí zajistit vyšší bezpečnost nejen baterie, ale celého elektrovozidla.

Většina vývojových metod a nástrojů byla optimalizována pro vývoj vozidel se spalovacími motory a nebyla tak dostatečně přizpůsobena pro vývoj elektrovozidel. Na odstranění těchto nedostatků tak bylo zaměřeno několik výzkumů, které postupně přišly se simulačními a

testovacími metodami, které umožnily optimální, efektivní a cenově dostupný vývoj EV. Ovšem s neustálým vývojem elektrovozidel a se zvyšujícími se nároky a výkonem se budou muset vyvíjet i simulační a testovací metody. Trend, který se v simulacích ohledně časové náročnosti a konkrétnosti udává, bude určitě přetrvávat i do budoucna a vývojáři programující simulační programy a metody se budou do budoucna snažit správně vyvážit dobu simulace s její přesností, je totiž důležité zahrnout do simulace více okrajových podmínek za účelem přesnějších výpočtů, ale zároveň nezvyšovat jejich časovou náročnost.

Dříve bylo testování, a někdy stále je, považováno za činnost prováděnou na konci vývojového procesu, aby se potvrdily funkční a bezpečnostní požadavky. Ovšem v dnešní době už tomu tak není a testování probíhá ve všech fázích vývojového procesu za účelem zlepšení predikce a návrhu modelu a případně jeho simulace. Dalším důležitým přínosem testů je zajištění bezpečnosti elektrovozidel, které musí být testovány na homologaci, a to jak na úrovni vozidla, tak na úrovni jednotlivých komponentů. Kromě vozidel se testují i okolní aspekty ovlivňující bezpečnost a funkčnost. Z hlediska testování spojují elektrická vozidla dva světy – automobilový průmysl, který vyžaduje normy ISO, a elektrotechnický průmysl, který vyžaduje normy IEC, což vede k tomu, že testování pokrývá velkou škálu technologií a zařízení. Kromě pořizovacích nákladů je hlavním faktorem, který ovlivňuje volbu spotřebitelů, dojezd elektrovozidel. Můžeme tedy očekávat pokračující vývoj v infrastruktuře nabíjení i ve zvyšování kapacity baterií, což bude klást i vyšší nároky na testovací zařízení.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

[1] Electric Powertrains. Porsche Engineering [online]. Porsche, c2021 [cit. 2021-9-19]. Dostupné z: https://www.porscheengineering.com/peg/en/services/engineeringservices/powertrain/electrical/

[2] Challenges of vehicle NVH performance. Siemens Software [online]. Siemens Software, c2021 [cit. 2021-9-28]. Dostupné z: https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/webinar/engineering-challenges-electrification-day5/98599

[3] LACHVAJDEROVÁ, Laura a Jaroslava KÁDÁROVÁ. EMISSIONS IN LIFE CYCLE OF ELECTRIC VEHICLE. Perner's Contacts [online]. 2020, 15(2) [cit. 2021-9-19]. ISSN 1801-674X. Dostupné z: doi:10.46585/pc.2020.2.1626

[4] NVH - VEHICLE NOISE, VIBRATION AND HARSHNESS. B&K | SOUND AND VIBRATION MEASUREMENT [online]. [cit. 2022-02-08]. Dostupné z: https://www.bksv.com/en/knowledge/applications/nvh-noise-vibration-harshness

[5] How Do All-Electric Cars Work?. Office of ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY [online]. [cit. 2022-02-05]. Dostupné z: https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work

[6] The powertrain: Pure performance. Porsche Newsroom – The Media Portal by Porsche [online]. Porsche, c2021 [cit. 2021-9-28]. Dostupné z: https://newsroom.porsche.com/en/products/taycan/powertrain-18555.html

[7] LENNSTRÖM, David a Arne NYKÄNEN. Interior Sound of Today's Electric Cars: Tonal Content, Levels and Frequency Distribution [online]. 2015-06-15, , - [cit. 2021-11-06]. Dostupné z: doi:10.4271/2015-01-2367

[8] SWART, Daniël Johannes, Anriëtte BEKKER a Jörg BIENERT. The comparison and analysis of standard production electric vehicle drive-train noise. International Journal of Vehicle Noise and Vibration [online]. 2016, 12(3) [cit. 2021-11-06]. ISSN 1479-1471. Dostupné z: doi:10.1504/IJVNV.2016.080140

[9] MÜNDER, Mara a Claus-Christian CARBON. Howl, whirr, and whistle: The perception of electric powertrain noise and its importance for perceived quality in electrified vehicles. Applied Acoustics [online]. 2022, 185 [cit. 2022-02-12]. ISSN 0003682X. Dostupné z: doi:10.1016/j.apacoust.2021.108412

[10] WANG, Shanjin, Jean-Louis JOUVRAY a Thomas KALOS. NVH Technologies and Challenges on Electric Powertrain [online]. 2018-06-13, , - [cit. 2021-10-10]. Dostupné z: doi:10.4271/2018-01-1551

[11] HE, Song, Jingchuan LI, Michael MUIR, Gautam GSJ a Bhyri Rajeswara RAO. New Integrated Electromagnetic and NVH Analyses for Induction Traction Motors for Hybrid and Electric Vehicle Applications [online]. 2020-04-14, , - [cit. 2021-10-10]. Dostupné z: doi:10.4271/2020-01-0413

[12] RANE, Girish a Sagar DESHMUKH. Development of Mount for Electric Powertrains - A Multi Degree of Freedom Optimization Approach [online]. 2020-04-14, , - [cit. 2021 10-10]. Dostupné z: doi:10.4271/2020-01-0417

[13] HE, Song. NVH Design, Analysis and Optimization of Chevrolet Bolt Battery Electric Vehicle [online]. 2018-04-03, , - [cit. 2021-10-10]. Dostupné z: doi:10.4271/2018-01-0994

[14] DUPONT, Jean-Baptiste a Henri SAUCY. Noise radiated by electric motors – simulation process and overview of the optimization approaches. Automotive Acoustics Conference 2017 [online]. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, 2019-04-26, , 107-121 [cit. 2021-10-10]. Proceedings. ISBN 978-3-658-20250-7. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-658-20251-4_7

[15] LENNSTRÖM, David, Roger JOHNSSON, Anders AGREN a Arne NYKÄNEN. The Influence of the Acoustic Transfer Functions on the Estimated Interior Noise from an Electric Rear Axle Drive. SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems [online]. 2014, 7(1), 413-422 [cit. 2021-10-4]. ISSN 1946-4002. Dostupné z: doi:10.4271/2014-01-9124

[16] ZENG, Mengyuan, Bohuan TAN, Fei DING, Bangji ZHANG, Hongtao ZHOU a Yuanchang CHEN. An experimental investigation of resonance sources and vibration transmission for a pure electric bus. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering [online]. 2020, 234(4), 950-962 [cit. 2021-10-3]. ISSN 0954-4070. Dostupné z: doi:10.1177/0954407019879258

[17] FANG, Yuan a Tong ZHANG. Sound Quality of the Acoustic Noise Radiated by PWM-Fed Electric Powertrain. IEEE Transactions on Industrial Electronics [online]. 2018, 65(6), 4534-4541 [cit. 2021-10-8]. ISSN 0278-0046. Dostupné z: doi:10.1109/TIE.2017.2767558

[18] The Next Generation of Sound. B&K | Sound and Vibration Measurement [online]. Brüel & Kjær, c2021 [cit. 2021-10-15]. Dostupné z: https://www.bksv.com/en/knowledge/blog/sound/electric-vehicle-noise

[19] Truls B, Mioduszewski P. Potential reduction of traffic noise by the means of increased fleet of electric vehicles using a combination of low-noise tyres and low-noise road surfaces. Baltic-Nordic Acoustic Meeting. 2016;:1-8.

[20] CESBRON, Julien, Simon BIANCHETTI, Marie-Agnès PALLAS, Adrien LE BELLEC, Vincent GARY a Philippe KLEIN. Road surface influence on electric vehicle noise emission at urban speed. Noise Mapping [online]. 2021, 8(1), 217-227 [cit. 2021-10-16]. ISSN 2084-879X. Dostupné z: doi:10.1515/noise-2021-0017

[21] ISO 10844:2014: Acoustics — Specification of test tracks for measuring noise emitted by road vehicles and their tyres. ISO [online]. ISO, c [cit. 2021-10-17]. Dostupné z: https://www.iso.org/standard/64218.html

[22] TOP 10 MODELS FLEET Electricity (2019). EAFO [online]. European Alternative Fuels Observatory, c2019 [cit. 2021-10-17]. Dostupné z: https://www.eafo.eu/vehicles-and-fleet/m1

[23] ISO 11819-1:1997: Acoustics — Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise — Part 1: Statistical Pass-By method. ISO [online]. ISO, c [cit. 2021-10-17]. Dostupné z: https://www.iso.org/standard/20232.html

[24] TIANXIU, Wang, Lu ZHIYAO ,Gu XIAOZHUO, et al. Research on control of road excitation noise of small electric vehicle[J]. Noise and Vibration Control, 2019, 39(5):113-117

[25] YU, Zhang, Yang JIAYOU a Wei ZHENG. Interior Noise Control based on Damping Layer Topology Optimization[J]. Noise and Vibration Control, 2018, 38(06):101-104

[26] WU, Shulong. External Acceleration Noise Control of Electric Vehicles Based on Sound Intensity Measurement Method. 2021 13th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA) [online]. IEEE, 2021, 2021, 414-418 [cit. 2022-02-08]. ISBN 978-1-6654-3892-6. Dostupné z: doi:10.1109/ICMTMA52658.2021.00095

[27] Aerodynamické inovace pro elektrická vozidla se stávají skutečností. PLM – Správa životního cyklu výrobků: Siemens Software [online]. c2021 [cit. 2021-11-06]. Dostupné z: https://www.plm.automation.siemens.com/global/cz/webinar/aerodynamics-design-exploration-electric-vehicle-cfd-simulation/41481

[28] Wind Noise Testing. GRAS Sound and Vibration [online]. [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: https://www.grasacoustics.com/industries/automotive/wind-noise-aeroacoustics

[29] The Porsche sound: A special acoustic experience. Porsche Newsroom – The Media Portal by Porsche [online]. Porsche, c2021 [cit. 2021-11-07]. Dostupné z: https://newsroom.porsche.com/en/products/taycan/sound-18556.html

[30] Dokument 32017R1576: NAŘÍZENÍ KOMISE V PŘENESENÉ PRAVOMOCI (EU) 2017/1576. EUR-Lex Přístup k právu Evropské unie [online]. 26. června 2017 [cit. 2022-02-12]. Dostupné z: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX%3A32017R1576&fbclid=IwAR1eZzHoNZYGBdXyvI2rDuRzfbuWIL9RY6TGwOVGkkwNatDM8LR8eAFTGJU

[31] Yuri A Ribeiro Silva, Jianfeng He, Jinxiang Song a Oren Kniaz. Application of local active control for HVAC system noise in an electric vehicle [online]. 2020 [cit. 2022-01-25]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/343902789_Application_of_local_active_control_for_HVAC_system_noise_in_an_electric_vehicle

[32] H. Lv-Chang, Z. Shu-Guang, H. Rong a C. Rui-Feng. Analysis of noise and vibration for a new pure electrical vehicle [online]. Int. Conf. Adv. Comput. Theory Eng., 2010, (Proc. 3rd) [cit. 2022-01-26].

[33] H. Fu, G. Tian, Y. Chen a Q. Chen. A novel control scheme of propulsion motor for integrated powertrain of electric bus. Veh. Power Propulsion Conf. [online]. Proc. IEEE, 2009 [cit. 2022-01-26].

[34] S. Cauet, P. Coirault a M. Njeh. Diesel engine torque ripple reduction through LPV control in hybrid electric vehicle powertrain: Experimental results [online]. Control Eng. Practice, 2013, 21(12) [cit. 2022-01-26].

[35] H. Fu, C. Feng a S. Xue. Vibration suppression control of an integrated powertrain of electric and hybrid vehicles using LQR controller and reduced-order observer. Conf. Expo Transport. Electrific. [online]. Asia-Pacific: Proc. IEEE, 2014 [cit. 2022-01-26].

[36] K. Szabat a Orlowska-Kowalska. Vibration suppression in two-mass drive system using PI speed controller and additional feedbacks–comparative study [online]. IEEE Trans. Ind. Electron., 2007, 54(2) [cit. 2022-01-26].

[37] ISA, Hazril M., WAN NOR LIZA MAHADI, Rahizar RAMLI a Mohd.AzmanZainul ABIDIN. A review on electromagnetic suspension systems for passenger vehicle. International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering 2011 (InECCE) [online]. IEEE, 2011, 2011, , 399-403 [cit. 2022-01-26]. ISBN 978-1-61284-229-5. Dostupné z: doi:10.1109/INECCE.2011.5953914

[38] O'REGAN, Stephen D., Bart BURKEWITZ, Christopher FULLER, Steven A. LANE, Marty JOHNSON a Anna-Maria R. MCGOWAN. <title>Payload noise suppression using distributed active vibration absorbers</title> [online]. 2002-7-9, , 150-159 [cit. 2022-01-26]. Dostupné z: doi:10.1117/12.475060

[39] BAOQUAN KOU, CHENGMING ZHANG, BAIPING YAN a HAICHUAN CAO. Detent force analysis and suppression of electrical shock absorber. 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference [online]. IEEE, 2008, 2008, , 1-4 [cit. 2022-01-26]. ISBN 978-1-4244-1848-0. Dostupné z: doi:10.1109/VPPC.2008.4677631

[40] WANG, Qingchun, Kaushik RAJASHEKARA, Yijiang JIA a Jie SUN. A Real-Time Vibration Suppression Strategy in Electric Vehicles. IEEE Transactions on Vehicular Technology [online]. 2017, 66(9), 7722-7729 [cit. 2022-01-26]. ISSN 0018-9545. Dostupné z: doi:10.1109/TVT.2017.2688416

[41] GM and LG Chem to build a new electric car battery plant in Ohio. Https://www.inceptivemind.com/ [online]. c2019 [cit. 2022-01-27]. Dostupné z: https://www.inceptivemind.com/gm-lg-chem-build-electric-car-battery-plant-ohio/10668/

[42] Battery of the Porsche Taycan. Porsche Cars North America Press Website [online]. c2022 [cit. 2022-02-09]. Dostupné z: https://press.porsche.com/prod/presse_pag/PressResources.nsf/Content?ReadForm&languageversionid=878435

[43] FAN, Yuezhen a Jie SUN. Study on the Interaction of Electric Vehicle Roll and Battery Pack Stability. Mechanics [online]. 2017, 23(1), 92 - 99 [cit. 2022-01-27]. ISSN 2029-6983. Dostupné z: doi:10.5755/j01.mech.23.1.14059

[44] IEC 62660-2:2018: Secondary lithium-ion cells for the propulsion of electric road vehicles - Part 2: Reliability and abuse testing. International Electrotechnical Commission [online]. 12. prosince 2018 [cit. 2022-02-27]. Dostupné z: https://webstore.iec.ch/publication/27387

[45] Electric and Hybrid Electric Vehicle Rechargeable Energy Storage System (RESS) Safety and Abuse Testing: J2464_202108. SAE International [online]. 23. srpna 2021 [cit. 2022-02-27]. Dostupné z: https://www.sae.org/standards/content/j2464_202108/

[46] Vibration Testing of Electric Vehicle Batteries: J2380_202112. SAE International [online]. 21. prosince 2021 [cit. 2022-02-27]. Dostupné z: https://www.sae.org/standards/content/j2380_202112/

[47] Amend. to Rev.5: UN Manual of Tests and Criteria. UNECE [online]. 2013 [cit. 2022-02-27]. Dostupné z: https://unece.org/amend-rev5

[48] ISO 19453-6:2020: Road vehicles — Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment for drive system of electric propulsion vehicles — Part 6: Traction battery packs and systems. ISO [online]. červenec 2020 [cit. 2022-02-27]. Dostupné z: https://www.iso.org/standard/72058.html

[49] ADEGBOHUN, Feyijimi, Annette VON JOUANNE, Ben PHILLIPS, Emmanuel AGAMLOH a Alex YOKOCHI. High Performance Electric Vehicle Powertrain Modeling, Simulation and Validation. Energies [online]. 2021, 14(5) [cit. 2022-02-13]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en14051493

[50] JIAN ZHOU, XIANGMING SHEN a DONG LIU. Modeling and simulation for electric vehicle powertrain controls. 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific) [online]. IEEE, 2014, 2014, 1-4 [cit. 2022-02-14]. ISBN 978-1-4799-4239-8. Dostupné z: doi:10.1109/ITEC-AP.2014.6940824

[51] AGAMLOH, Emmanuel, Annette VON JOUANNE a Alexandre YOKOCHI. An Overview of Electric Machine Trends in Modern Electric Vehicles. Machines [online]. 2020, 8(2) [cit. 2022-02-14]. ISSN 2075-1702. Dostupné z: doi:10.3390/machines8020020

[52] PFLUEGL, H., F. DIWOKY, B. BRUNNSTEINER, et al. ASTERICS – Advanced Simulation Models and Accelerated Testing for the Development of Electric Vehicles. Transportation Research Procedia [online]. 2016, 14, 3641-3650 [cit. 2022-02-15]. ISSN 23521465. Dostupné z: doi:10.1016/j.trpro.2016.05.432

[53] LI, Huibin, Peiyun XU, Cheng CAO, Dongmei HU, Xiaojun YAN a Zhihuan SONG. Acoustic Simulation of the Electric Vehicle Motor. Journal of Physics: Conference Series [online]. 2021, 2095(1) [cit. 2022-02-18]. ISSN 1742-6588. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/2095/1/01203

[54] Virtualization for Thermal Management Excellence. AVL - Development, testing & simulation [online]. 2021 [cit. 2022-03-27]. Dostupné z: https://www.avl.com/html/static/emag/FOCUS_01_2021_E_web/page_9.html

[55] Improved Test Methods For Safer Battery Systems. KIT [online]. Karlsruhe Institute of Technology, 13. července 2020 [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: https://www.kit.edu/kit/english/pi_2020_059_improved-test-methods-for-safer-battery-systems.php

[56] GOOD, D. EPA Test Procedures for Electric Vehicles and Plug-in Hybrids: DRAFT Summary – Regulations take Precedence [online]. 14. listopadu 2017 [cit. 2022-02-27]. Dostupné z: https://www.fueleconomy.gov/feg/pdfs/EPA%20test%20procedure%20for%20EVs-PHEVs-11-14-2017.pdf

[57] Magna's Active Aerodynamics Team: Harnessing the Wind. MAGNA [online]. c2022 [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: https://www.magna.com/innovation/driven-people-driving-change/article/magna%27s-active-aerodynamics-team-harnessing-the-wind

[58] FEV TO ADDRESS VALIDATION NEEDS: XIL SIMULATION SAVES TIME AND MONEY. FEV Group [online]. [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: https://www.fev.com/media-center/press/press-releases/news-article/article/fev-to-address-validation-needs-xil-simulation-saves-time-and-money.html

[59] Test and Technology Center in Immendingen: Consolidation of worldwide vehicle testing in one location. Mercedes-Benz Group Media [online]. 29. října 2019 [cit. 2022-02-27]. Dostupné z: https://group-media.mercedes-benz.com/marsMediaSite/en/instance/ko.xhtml?oid=44800150

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

F_{TR}	[N]	Tažná síla od hnacího ústrojí
F_{RL}	[N]	Působící síla od vozovky
F_{roll}	[N]	Síla valivého odporu od pneumatik
F_{AD}	[N]	Síla odporu vzduchu na vozidla
F_{gxT}	[N]	Gravitační síla
k_m	[–]	Součinitel setrvačnosti vozidla
m	[kg]	Hmotnost elektrovozidla
r_w	[m]	Poloměr kola
A_F	[m^3]	Plocha čela vozidla
ρ	[$kg \cdot m^{-3}$]	Hustota vzduchu
v_{xT}	[$m \cdot s^{-1}$]	Rychlost vozidla ve směru osy x
v_0	[$m \cdot s^{-1}$]	Rychlost větru před vozidlem
V_x	[$m \cdot s^{-1}$]	Rychlost vozidla
V_{tire}	[$m \cdot s^{-1}$]	Rychlost pneumatik
P_{mot}	[W]	Výkon elektromotoru
P_{loss}	[W]	Ztrátový výkon
P_{in}	[W]	Vstupní výkon
T_{mot}	[N·mm]	Krouticí moment elektromotoru
Ω	[$rad \cdot s^{-1}$]	Úhlová rychlost otáčení kola
ω_{mot}	[$rad \cdot s^{-1}$]	Úhlová rychlost otáčení elektromotoru
β	[°]	Úhel stoupání
s	[–]	Prokluz kola
C_o	[–]	Koeficient valivého odporu
C_2	[–]	Koeficient valivého odporu
C_D	[–]	Koeficient odporu vzduchu
C	[–]	Ztrátová konstanta elektromotoru
k_c	[–]	Ztrátová konstanta elektromotoru
k_i	[–]	Ztrátová konstanta elektromotoru
k_w	[–]	Ztrátová konstanta elektromotoru