NÁVRH KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ BOXU PRO ULOŽENÍ PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ V ELEKTROMOBILU

Platil Jakub

Sekce – STROJÍRENSTVÍ,
Fakulta strojní, 3. ročník
Bakalářský studijní program – STROJÍRENSTVÍ

Abstrakt: Tato bakalářská práce se zabývá problematikou vodíkových elektromobilů a jejich technickým řešením. Rešeršní část nejprve zkoumá vliv sektoru dopravy na kvalitu ovzduší v Evropské unii a představuje jednotlivé druhy elektromobilů. Dále je pozornost věnována principu fungování palivových článků, přehledu současně vyráběných vodíkových vozidel a teoretickému základu prostupu tepla stěnou. Praktická část je zaměřena na proces výběru a technický rozbor konkrétního konceptu. Zvolené řešení je rozloženo na jednotlivé konstrukční celky, u kterých je proveden podrobný popis jejich komponent. V závěru práce je realizována simulace prostupu tepla, která slouží ke zjištění vlivu teploty na vybrané segmenty konstrukce.

Klíčová slova: vodík, palivový článek, elektromobil, FCEV, prostup tepla, tepelná simulace, udržitelnost, emise v dopravě

1 Úvod

Nacházíme se ve světě, který za poslední desetiletí prodělává obrovské množství změn v prakticky všech odvětvích lidského vědění. Není proto divu, že se velké pozornosti dostává i na věc v minulosti tak opomíjenou, tedy udržitelnost. Naše životy si dnes už vůbec nedokážeme představit bez možnosti svobodně se dopravovat kamkoli jen zachceme.

Pokud budeme stále spoléhat na osvědčené spalovací motory na fosilní paliva, možnosti se nám zúží a prostředí kolem nás bude negativně ovlivňováno. Vše nasvědčuje tomu, že současné pohony pomalu nahradí pohony elektrické. Mezi jedno z řešení nedostatků klasických bateriových elektromobilů patří i téma této bakalářské práce – elektromobily poháněné vodíkovým palivovým článkem.

2 Teoretická část

2.1 Produkce CO_2 v Evropě

Podle údajů Evropské komise dosáhly emise z dopravy v roce 2014 přibližně 88,9 milionu tun ekvivalentu CO_2. Mezi lety 2010 a 2016 došlo u nových vozidel k efektivnímu snížení měrných emisí o téměř 22 g CO_2/km. Nicméně tento pozitivní trend je v celkové bilanci zastíněn rostoucím počtem ujetých kilometrů. Pařížská dohoda z roku 2015 definovala nový rámec pro zmírnění dopadů klimatických změn, přičemž pro sektor dopravy bylo stanoveno snížení emisí o 20 % do roku 2030 a o 60 % do roku 2050. Silniční doprava je zodpovědná za přibližně jednu pětinu celkových emisí CO_2 v EU a generuje více než 70 % všech emisí v dopravě.

2.2 Druhy elektromobilů

Elektromobily se dají rozdělit na základní typy: Bateriové elektromobily (BEV) využívají k pohonu výhradně elektromotor napájený z trakčního akumulátoru. Hybridní elektromobily (HEV) kombinují spalovací motor s elektromotorem, přičemž nelze provádět externí nabíjení ze sítě. Plug-in hybridní elektromobily (PHEV) umožňují na rozdíl od HEV i externí dobíjení. Elektromobily s palivovými články (FCEV) si vyrábějí elektřinu přímo ve voze prostřednictvím vodíkového palivového článku, přičemž zásoba energie je definována kapacitou vodíkových nádrží.

2.3 Princip funkce vodíkového palivového článku

Palivový článek je elektrochemické zařízení, které produkuje elektřinu kontinuálně, dokud je zajištěn přísun reaktantů z externího zdroje. Vodík je přiváděn na zápornou anodu, kde dochází k jeho rozštěpení na protony a elektrony. Elektrony procházejí vnějším elektrickým obvodem a generují elektrický proud, zatímco protony procházejí membránou ke katodě, kde se slučují s kyslíkem za vzniku tepla a čisté vodní páry. Technologie palivových článků nabízí velmi nízké až nulové emise, modularitu a vysokou efektivitu až 60 %, oproti 33–35 % u konvenčních motorů.

2.4 Prostup tepla stěnou

Vedení tepla je důležitou znalostí při návrhu jakékoli konstrukce, kde vzniká tepelné působení. Prostup tepla zahrnuje kombinaci kondukce (prostup materiálem stěny) a konvekce (přestup tepla z povrchu do okolí). Hustota tepelného toku $\dot{q}$ [W/m²] se vypočítá jako podíl rozdílu teplot a součtu všech tepelných odporů. Odpor při vedení: $R_{ved} = d/\lambda$, odpor při proudění: $R_{pro} = 1/\alpha$. Tyto výpočty sloužily jako základ pro tepelnou simulaci provedenou v praktické části práce.

3 Praktická část

3.1 Koncepční návrhy a výběr konceptu

Před zpracováním konstrukčního návrhu bylo pracováno celkem se třemi návrhy. Koncept 1 počítal s horizontálním rozložením palivových článků nad sebou, ale vznikly problémy s přístupem při servisu. Koncept 2 využíval rozložení článků do kruhu, bez vnitřního boxu, což přinášelo rizika v případě požáru. Koncept 3 s vertikálním uspořádáním článků v sérii s vnitřním boxem byl vybrán na základě rozhodovací tabulky jako nejlepší, s celkovým skóre +3 oproti skóre −1 obou ostatních konceptů. Jako klíčová kritéria sloužily bezpečnost, modularita, servisovatelnost, zástavbový prostor a tepelné působení.

3.2 Rozdělení na hlavní části

Navržený úložný box je konstrukčně rozdělen do tří hlavních částí: vnější plášť, box palivových článků a komponenty pro palivové články. Celkové vnější rozměry sestavy činí 1090 × 900 × 579 mm. Sestava je určena pro umístění v předním prostoru vozidla, kde nahrazuje konvenční spalovací motor.

3.3 Vnější plášť

Vnější plášť se skládá ze spodní podstavy a horního vnějšího pláště. Jako konstrukční materiál byla zvolena hliníková slitina AlSi7Mg0.3 díky svým pevnostním vlastnostem, dobrým slévárenským vlastnostem, nízké hmotnosti a odolnosti vůči vodíkové křehkosti. Ocel byla vyloučena z důvodu trojnásobně vyšší hustoty a rizika vodíkové křehkosti. Vnější stěny odlitků jsou opatřeny hustou sítí vertikálních a horizontálních žeber pro zvýšení tuhosti a odvod tepla.
Spodní podstava o rozměrech 1090 × 900 × 220 mm slouží k uchycení ke konstrukci vozu. Obsahuje EPDM tlumicí desku pro absorpci vibrací v rozmezí teplot od −40 °C do 150 °C, protipožární plasty z materiálu PA 66 s nehořlavými přísadami a fixační lišty z hliníkové slitiny. Horní vnější plášť slouží primárně jako ochranná skořepina s servisními přístupovými body na bočních stěnách.

3.4 Box palivových článků

Vnitřní box je jádrem energetického systému a je rozdělen na nosné prvky a funkční prvky. Nosné prvky tvoří hliníkový skelet boxu s bočními otvory pro přístup k palivovým článkům, spodní vedení hadic, fixace palivových článků, separační lišty a servisní víka. Funkční prvky zahrnují rozvody provozních médií (vodíku, kyslíku a odvod vody) z materiálu PTFE, který zabraňuje úniku malých molekul vodíku.
Základní energetickou jednotkou jsou čtyři moduly palivových článků typu PEM o rozměrech 550 × 100 × 368 mm. Celkový výkon systému byl vypočítán na základě objemové hustoty výkonu 3,1 kW/l (dle Toyota Mirai): V = 4,8 × 3,13 × 0,69 = 10,367 l; P = 10,367 × 3,1 = 32,138 kW na článek; Pcelkový = 32,138 × 4 = 128,55 kW. Tato hodnota je srovnatelná s Toyota Mirai (114 kW).

3.5 Modularita palivových článků

Klíčovým inovačním přínosem práce je modulární řešení uložení palivových článků. Na rozdíl od konvenčních řešení, kde jsou články uspořádány jako jeden velký celek, navržený koncept umožňuje nezávislé vyjímání a záměnu jednotlivých ze čtyř modulů. Pro demontáž jednoho článku je nutné: sejmout hlavní víko a vrchní víko boxu, vysunout fixaci palivových článků, demontovat servisní víka na obou stranách boxu, uzavřít okruhy uzavíracími ventily a odpojit přívody médií. Každý článek je opatřen ergonomickým madlem pro snadnou manipulaci.

3.6 Tepelná simulace

Tepelná simulace v prostředí Ansys Steady-State Thermal byla provedena za účelem optimalizace geometrie vnějšího pláště. Jako zdrojová teplota palivových článků bylo zvoleno 70 °C, pro konvekci stojícího uzavřeného vzduchu hodnota $3 \cdot 10^{-6}$ W/mm²·°C. Simulace využívala 220 103 elementů a 430 395 uzlů.
Z výsledků bylo jasně patrné, že největší tepelné zatížení je v oblasti vnitřního boxu palivových článků, kde se teploty stěn pohybují v rozmezí 65–70 °C. Na základě těchto výsledků bylo implementováno žebrování na vnějším plášti a

podstavě. V prostoru komponentů se teplota pohybuje pouze okolo 10 °C, na hlavním víku je teplota v nízkém teplotním rozsahu, který nevyžaduje žádnou konstrukční úpravu.

4 Závěr

Bakalářská práce se věnovala problematice vodíkové mobility a výsledkem je vlastní konstrukční návrh boxu pro uložení palivových článků v elektromobilu, vytvořený v softwaru Creo Parametric 12.
Z původních tří variant byl po porovnání v rozhodovací tabulce zvolen koncept s vertikálním uspořádáním modulárních palivových článků. Tento přístup zajišťuje servisní příznivost a snadný přístup ke klíčovým prvkům přímo na vozidle, aniž by bylo nutné vyjímat celý box. Navržené řešení umožňuje individuální výměnu každého ze čtyř palivových článků nezávisle na ostatních, což je v porovnání s konvenčními vozidly jako Toyota Mirai nebo Hyundai Nexo výrazně ekologičtější a ekonomičtější přístup k údržbě.
Tepelná simulace odhalila kritická místa s teplotami až 70 °C a vedla ke konstrukční úpravě v podobě implementace žebrování pro efektivnější rozptyl tepla. Vypočítaný celkový výkon systému 128,55 kW je plně dostačující pro osobní automobil a pohybuje se v obdobných hodnotách jako konkurenční vodíková vozidla na trhu.
Přestože navržené řešení vykazuje vyšší hmotnost a prostorovou náročnost, tyto parametry jsou akceptovatelné vzhledem k zamýšlené aplikaci. Získané poznatky a vytvořený 3D model tvoří solidní základ pro budoucí optimalizaci konstrukce, zejména v oblasti redukce hmotnosti při zachování tepelné stability systému.

Literatura

[1] E. Gryparis, P. Papadopoulos, H. C. Leligou a C. S. Psomopoulos, „Electricity demand and carbon emission in power generation under high penetration of electric vehicles. A European Union perspective,“ ScienceDirect, 27 Červen 2020. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484720313378#sec1. [Přístup získán 17 Duben 2026].

[2] „Wikipedia - Kjótský protokol,“ Wikipedie: Otevřená encyklopedie, [Online]. Available: https://cs.wikipedia.org/wiki/Kj%C3%B3tsk%C3%BD_protokol. [Přístup získán 17 Duben 2026].

[3] „Emise CO2 z aut: fakta a čísla (infografika),“ Evropský parlament, 25 Březen 2019. [Online]. Available: https://www.europarl.europa.eu/topics/cs/article/20190313STO31218/emise-co2-z-aut-fakta-a-cisla-infografika. [Přístup získán 18 Duben 2026].

[4] „Obnovitelný vodík: Jaké výhody přinese na cestě ke klimaticky neutrální Evropě?,“ Evropský parlament, 17 Květen 2021. [Online]. Available: https://www.europarl.europa.eu/topics/cs/article/20210512STO04004/obnovitelny-vodik-jake-vyhody-prinese-na-ceste-ke-klimaticky-neutralni-evrope. [Přístup získán 18 Duben 2026].

[5] „Druhy elektromobilů: Přehled typů podle vlastností,“ Electra drive s.r.o., 12 Červen 2024. [Online]. Available: https://www.electradrive.cz/druhy-elektromobilu-porovnani. [Přístup získán 18 Duben 2026].

[6] „How Do All-Electric Cars Work?,“ U.S. DEPARTMENT of ENERGY, [Online]. Available: https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work. [Přístup získán 18 Duben 2026].

[7] „Five Most Popular Electric Cars in Europe 2025, Compared,“ eleport, 2 Prosinec 2025. [Online]. Available: https://eleport.com/most-popular-electric-cars/. [Přístup získán 18 Duben 2026].

[8] „How Do Hybrid Electric Cars Work?,“ U.S. DEPARTMENT of ENERGY, [Online]. Available: https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-hybrid-electric-cars-work. [Přístup získán 18 Duben 2026].

[9] D. Moss, „Best hybrid cars 2026 – plug-in and regular hybrids rated,“ Haymarket Automotive, 20 Listopad 2025. [Online]. Available: https://www.whatcar.com/best/hybrid-cars/n17013. [Přístup získán 18 Duben 2026].

[10] „How Do Plug-In Hybrid Electric Cars Work?,“ U.S. DEPARTMENT of ENERGY, [Online]. Available: https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-plug-in-hybrid-electric-cars-work. [Přístup získán 18 Duben 2026].

[11] G. Armitage, „Top 10 best plug-in hybrid cars 2025,“ 31 Leden 2025. [Online]. Available: https://www.drivingelectric.com/best-cars/592/best-plug-hybrid-cars. [Přístup získán 19 Duben 2026].

[12] „How Do Fuel Cell Electric Vehicles Work Using Hydrogen?,“ U.S. DEPARTMENT of ENERGY, [Online]. Available: https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-fuel-cell-electric-cars-work. [Přístup získán 19 Duben 2026].

[13] „Hydrogen Fuel Cells – How Do They Work?,“ Horizon Fuel Cell Europe, s.r.o, [Online]. Available: https://www.horizoneducational.com/hydrogen-fuel-cells-how-do-they-work/t1405?currency=usd. [Přístup získán 19 Duben 2026].

[14] „How does hydrogen fuel cell technology work?," Inteligent Energy, [Online]. Available: https://www.intelligent-energy.com/news/how-does-hydrogen-fuel-cell-technology-work/. [Přístup získán 19 Duben 2026].

[15] „8 Vehicle Manufacturers Working on Hydrogen Fuel Cell Cars," FASTECH, 31 Srpen 2025. [Online]. Available: https://www.fastechus.com/blog/vehicle-manufacturers-working-on-hydrogen-fuel-cell-vehicles. [Přístup získán 19 Duben 2026].

[16] „Wikipedia - Toyota Mirai," Wikipedia, The Free Encyclopedia, 28 Únor 2026. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Toyota_Mirai#Second_generation_(JPD20;_2020). [Přístup získán 19 Duben 2026].

[17] „Wikipedia - Hyundai Nexo," Wikipedia, The Free Encyclopedia, 29 Březen 2026. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Hyundai_Nexo. [Přístup získán 19 Duben 2026].

[18] „CR-V e:FCEV," American Honda Motor Co., [Online]. Available: https://automobiles.honda.com/2025/cr-v-fcev/specs-features-trim-comparison. [Přístup získán 19 Duben 2026].

[19] „Prostup tepla," OnlineSchool.cz, [Online]. Available: https://onlineschool.cz/termomechanika/prostup-tepla/. [Přístup získán 25 Duben 2026].

[20] N. Burbaki, „Sdílení tepla - Prostup tepla stěnou," Otevřená oborová encyklopedie elektrotepelné techniky, 2005. [Online]. Available: https://www.powerwiki.cz/WikiPrint.jsp?page=OOEET_ResenePriklady. [Přístup získán 25 Duben 2026].

[21] C. Michal a L. Petr, „Mechanické a plastické vlastnosti slitiny AlSi7Mg0.3 při zvýšených teplotách," [Online]. Available: https://www.rgu.cz/download/holecek2009/06_prednaska.pdf. [Přístup získán 3 Květen 2026].

[22] „Wikipedie - Vodíková křehkost," Wikipedie, 13 Prosinec 2025. [Online]. Available: https://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Vod%C3%ADkov%C3%A1_k%C5%99ehkost&oldid=25502956. [Přístup získán 3 Květen 2026].

[23] „EPDM: materiál, který nestárne," GUMEX, [Online]. Available: https://www.gumex.cz/blog/epdm-material-ktery-nestarne-235#toSection. [Přístup získán 3 Květen 2026].

[24] „What types of gases can a PTFE Hose handle?," Shandong Danflex Hose Co.,Ltd., 29 Květen 2025. [Online]. Available: https://www.danflexhose.com/blog/what-types-of-gases-can-a-ptfe-hose-handle-136560.html. [Přístup získán 3 Květen 2026].

[25] „Toyota Mirai," Toyota, [Online]. Available: https://www.toyota.cz/objevte-toyotu/novinky/toyota-mirai. [Přístup získán 3 Květen 2026].

[26] „Proč je PA66 FR nejlepší volbou pro bezpečnostní vybavení," Fuchen New Material, [Online]. Available: https://nylon-granules.com/cs/why-pa66-fr-is-the-top-choice-for-safety-gear/. [Přístup získán 3 Květen 2026].