



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

HYBRIDNÍ POHONNÉ SYSTÉMY: KOMBINACE VODÍKOVÝCH SPALOVACÍCH MOTORŮ A ELEKTROMOTORŮ V DOPRAVĚ

HYBRID PROPULSION SYSTEMS: COMBINING HYDROGEN INTERNAL COMBUSTION ENGINES AND
ELECTRIC MOTORS IN TRANSPORT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Moravec

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Matěj Pouliček

BRNO 2025

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Vojtěch Moravec**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Stavba strojů a zařízení
Vedoucí práce: **Ing. Matěj Pouliček**
Akademický rok: 2024/25

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:

Hybridní pohonné systémy: Kombinace vodíkových spalovacích motorů a elektromotorů v dopravě

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tato bakalářská práce se zaměřuje na výzkum hybridních pohonných systémů, které kombinují vodíkové spalovací motory a elektromotory. Cílem práce je analyzovat výhody a nevýhody těchto systémů v porovnání s jinými hybridními technologiemi a prozkoumat jejich technickou proveditelnost v kontextu moderní dopravy. Práce zahrnuje ekonomické a ekologické hodnocení, analýzu současných aplikací hybridních systémů a návrh inovativní koncepce, která by zlepšila efektivitu a udržitelnost těchto technologií v automobilovém průmyslu.

Cíle bakalářské práce:

Analyzovat principy fungování vodíkových spalovacích motorů a elektromotorů a popsat jejich výhody a nevýhody v kontextu dopravy.

Prozkoumat možnosti kombinace vodíkových spalovacích motorů a elektromotorů v hybridních pohonných systémech a zhodnotit jejich technickou proveditelnost.

Zhodnotit ekonomickou a ekologickou stránku hybridních systémů založených na vodíkovém spalování a elektrickém pohonu ve srovnání s jinými hybridními technologiemi.

Prozkoumat možnosti budoucí aplikace hybridních systémů v dopravě na základě současných výzkumů a technických konceptů.

Navrhnout inovativní koncepci hybridního systému, která kombinuje vodíkový spalovací motor a elektromotor pro maximální efektivitu a udržitelnost.

Seznam doporučené literatury:

GAVRILYUK, Alexander. Hydrogen Energy for Beginners. Pan Stanford Publishing Pte., 2014. ISBN 978-981-4364-78-2.

STOLTEN, Detlef a EMONTS, Bernd. Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology. Německo: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Boschstr., 2016. ISBN 978-3-527-67429-9.

BASILE, Angelo a IULIANELLI, Adolfo. Advances in Hydrogen Production, Storage and Distribution. ISBN 978-0-85709-773-6

CORNEL, Stan. Alternative Propulsion for Automobiles. Berlin: Springer International Publishing, 2017. ISBN 978-3-319-31929-2.

MTZ Motorentechnische Zeitschrift. Wiesbaden: Springer Wieweg | Springer Fachmedien Weisbaden GmbH, 1939- . ISSN 0024-8525.

ATZ Automobiltechnische Zeitschrift. Wiesbaden: Springer Wieweg | Springer Fachmedien Weisbaden GmbH, 1998- . ISSN 0001-2785.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2024/25

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá analýzou principů fungování vodíkových spalovacích motorů a elektromotorů, hodnotí se jejich výhody a nevýhody v kontextu automobilní dopravy. Dále se zaměřuje na možné kombinace těchto technologií v hybridních pohonných systémech a technickou proveditelnost. Práce porovnává ekonomické a ekologické aspekty hybridních systémů používajících vodíkový spalovací motor a elektromotor s jinými dostupnými hybridními metodami. Na základě analýzy aktuálních výzkumů a technických řešení jsou zhodnoceny možnosti budoucího uplatnění těchto pohonných soustav v dopravě. V závěru práce je představen návrh hybridního pohonného celku, který propojuje vodíkový spalovací motor a elektromotor s důrazem na maximální efektivitu a udržitelnost.

KLÍČOVÁ SLOVA

vodíkový spalovací motor, vodík, elektromotor, hybridní pohon, alternativní paliva

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the analysis of the principles of operation of hydrogen internal combustion engines and electric motors, evaluating their advantages and disadvantages in the context of automotive transport. It also focuses on the possible combinations of these technologies in hybrid propulsion systems and the technical feasibility. The paper compares the economic and environmental aspects of hybrid systems using a hydrogen internal combustion engine and an electric motor with other available hybrid methods. Based on the analysis of current research and technical solutions, the possibilities of future application of these propulsion systems in transport are evaluated. The paper concludes with the presentation of a hybrid powertrain design that combines a hydrogen internal combustion engine and an electric motor with an emphasis on maximum efficiency and sustainability.

KEYWORDS

hydrogen internal combustion engine, hydrogen, electric motor, hybrid drive, alternative fuels

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MORAVEC, Vojtěch. *Hybridní pohonné systémy: Kombinace vodíkových spalovacích motorů a elektromotorů v dopravě*. Online, bakalářská práce Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství, 2025. Vedoucí práce Matěj Pouliček. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/165950>. [cit. 2025-05-22].

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Matěj Poulíček a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 23. května 2025

.....

Vojtěch Moravec

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu své bakalářské práce Ing. Matěji Pouličkovi, za jeho odborné vedení, cenné rady a trpělivost při zpracování této práce.

Poděkování patří také mé rodině a blízkým za podporu a motivaci po celou dobu studia.

OBSAH

Úvod.....	11
1 Využití vodíku v dopravě.....	12
1.1 Skladování vodíku.....	13
1.1.1 Stlačený vodík.....	13
1.1.2 Zkapalněný vodík.....	14
1.1.3 Kryostlačený vodík.....	15
1.2 Srovnání palivových článků a vodíkových spalovacích motorů.....	15
1.3 Princip vodíkového spalovacího motoru.....	18
1.3.1 Zážehové spalovací motory.....	19
1.3.2 Vznětové spalovací motory.....	20
1.4 Příklady vodíkových spalovacích motorů.....	21
1.5 Shrnutí.....	24
2 Elektromobily.....	25
2.1 Princip fungování elektromobilů.....	26
2.1.1 Akumulátor.....	26
2.1.2 Elektromotor.....	28
2.1.3 Regenerativní brzdění.....	29
2.1.4 Tok energie.....	30
2.2 Emise.....	30
2.3 Shrnutí.....	31
3 Hybridní pohony.....	32
3.1 Rozdělení podle uspořádání.....	32
3.1.1 Sériové uspořádání.....	32
3.1.2 Paralelní uspořádání.....	33
3.1.3 Sériově-paralelní uspořádání.....	34
3.1.4 Komplexní uspořádání.....	35
3.2 Rozdělení podle typu hybridizace.....	36
3.2.1 Micro hybrid.....	36
3.2.2 Mild hybrid.....	36
3.2.3 Full hybrid.....	36
3.2.4 Plug-in hybrid.....	37
3.3 Technologické výzvy.....	38
4 Kombinace vodíkového spalovacího motoru s elektromotorem.....	39
4.1 Porovnání vodíkových hybridních pohonů s konvenčním hybridem.....	39
4.1.1 Porovnání účinnosti a spotřeby paliva.....	39
4.1.2 Ekonomické a ekologické zhodnocení.....	41
4.1.3 Vliv hybridizace na emise NO _x a spotřebu vodíku.....	42
4.2 Návrh koncepce.....	43
4.2.1 Technický návrh hybridního systému pro těžkou silniční dopravu.....	43
4.2.2 Technický návrh hybridního systému pro železniční dopravu.....	45
4.3 Historické příklady hybridních systémů s vodíkovým spalovacím motorem.....	46
Shrnutí.....	47

Závěr	50
Použité informační zdroje	52
Seznam použitých zkratek a symbolů	59

ÚVOD

Doprava hraje významnou roli v moderní společnosti, avšak její současná podoba je spojena s výraznými environmentálními a ekonomickými problémy. Dochází k postupnému nahrazování spalovacích motorů, poháněných fosilními palivy, alternativními technologiemi, které zvyšují efektivitu a udržitelnost. Mezi nejvýznamnější patří elektromotory a vodíkové pohony, jež představují slibné směry pro budoucí vývoj v dopravě.

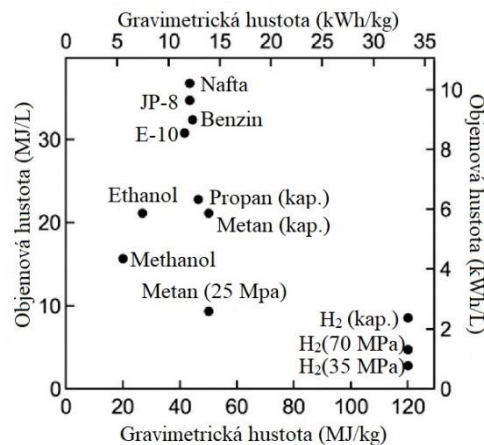
Tento přechod k nízkoemisní mobilitě je podporován i legislativním rámcem Evropské unie, zejména klimatickým balíčkem Fit for 55, jehož cílem je snížení emisí skleníkových plynů o 55 % do roku 2030 ve srovnání s rokem 1990 [1]. V návaznosti na tyto cíle přijala Česká republika Vodíkovou strategii, která stanovuje postupné zavádění vodíkových technologií v dopravě i průmyslu. Strategie počítá s využitím obnovitelného i nízkouhlíkového vodíku jako klíčového prvku pro dekarbonizaci dopravy, zejména v oblastech, kde je elektrifikace technicky nebo ekonomicky náročná [2].

Jedním z možných řešení je právě kombinace těchto dvou technologií v rámci hybridních pohonných systémů. Hybridní koncept, využívající jak spalování vodíku, tak elektrického pohonu, může přinést lepší dojezd i celkové provozní náklady. Výzkum v této oblasti je však stále ve fázi vývoje, a proto je důležité zhodnotit nejen technickou proveditelnost, ale i ekonomické a ekologické dopady ve srovnání s jinými hybridními systémy.

V této bakalářské práci je analyzován princip fungování elektromotorů a vodíkových spalovacích motorů, jejich výhody a nevýhody, a následně možnosti jejich kombinace v hybridních pohonných systémech.

1 VYUŽITÍ VODÍKU V DOPRAVĚ

Vodík představuje jeden z nejperspektivnějších energetických nosičů pro dekarbonizaci dopravy. Jeho klíčovou výhodou je vysoká gravimetrická hustota 120 MJ/kg [3], což výrazně převyšuje energetickou hustotu tradičních paliv na jednotku hmotnosti viz. *obr. 1*. Z hlediska praktického využití ve vozidlech lze vodík aplikovat dvěma hlavními technologickými způsoby – buď spalováním ve speciálně upravených spalovacích motorech, nebo prostřednictvím palivových článků.



Obr. 1 Srovnání gravimetrické a objemové hustoty několika paliv [4]

Další významnou předností vodíku je jeho flexibilita z hlediska produkčních cest. Lze jej vyrábět několika technologiemi, z širokého spektra vstupních surovin a energie, jak z obnovitelných, tak i z fosilních zdrojů. Výsledná ekologická stopa vodíku se pak liší v závislosti na použitém postupu a energetickém mixu, což je vyjadřováno tzv. barevným označením vodíku. Například zelený vodík vzniká elektrolýzou vody s využitím elektřiny z obnovitelných zdrojů nebo biologickými procesy. V případě, že je vodík vyráběn z fosilních paliv, lze pomocí technologií pro zachytávání a ukládání oxidu uhličitého (CCS – carbon capture and storage) výrazně snížit jeho uhlíkové emise – výsledkem je tzv. modrý vodík. Jako perspektivní nízkoemisní varianta se jeví také vodík vyráběný elektrolýzou s využitím jaderné energie, označovaný jako fialový vodík [5], [6], [7].

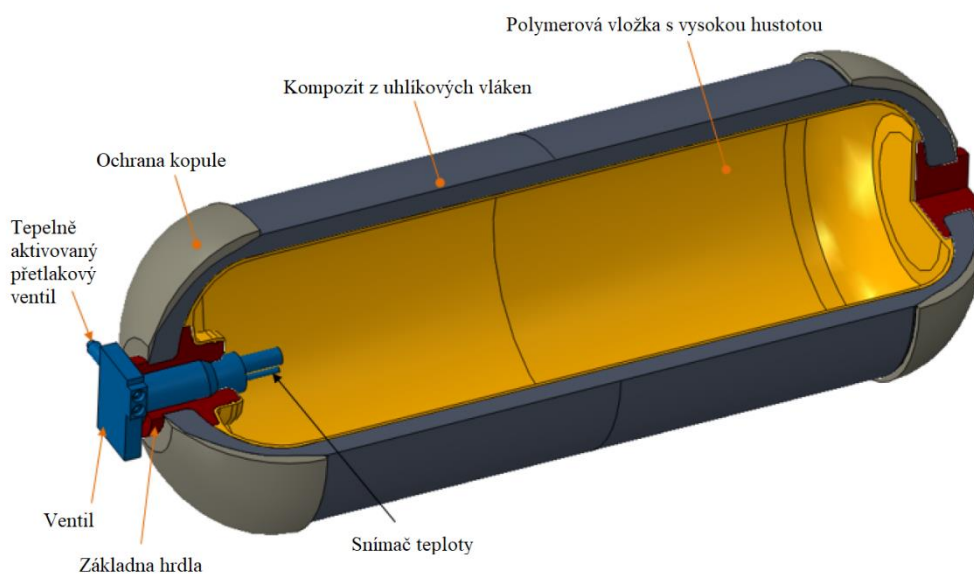
Klíčovou roli v širším uplatnění vodíku však nehraje jen samotná výroba, ale i efektivní skladování a distribuce tohoto plynu. S ohledem na fyzikální vlastnosti vodíku – především jeho nízkou objemovou hustotu viz *obr. 1*, je otázka skladování zásadní pro jeho praktické nasazení v dopravních aplikacích. Významným omezením zůstává rovněž dosud nedostatečně rozvinutá infrastruktura [8], [9], která v současnosti představuje překážku pro širší praktické nasazení vodíku v dopravních systémech. Jedním z klíčových technických aspektů, který s tímto omezením bezprostředně souvisí, je právě způsob skladování vodíku – jak z hlediska bezpečnosti, tak i efektivnosti a integrace do vozidel. Tato problematika je předmětem následující kapitoly, která se zaměřuje na technologické výzvy spojené s uchováváním vodíku v dopravních aplikacích.

1.1 SKLADOVÁNÍ VODÍKU

Mezi hlavní fyzikální metody skladování patří stlačený vodík, kapalný vodík a kryostlačený vodík, které se liší provozními parametry, energetickou účinností a nároky na infrastrukturu. Následující podkapitoly se zaměří na detailní popis těchto tří technologií, jejich výhody, nevýhody a možnosti praktického využití.

1.1.1 STLAČENÝ VODÍK

Skladování vodíku ve formě stlačeného plynu je v současnosti nejpoužívanější metodou, zejména v oblasti pohonu vozidel s palivovými články. Vodík je stlačován na hodnoty 350 nebo 700 bar [10]. Mezi hlavní výhody této technologie patří její technologická vyzrálost, relativní konstrukční jednoduchost a dostupnost infrastruktury. Na druhou stranu je nutné zohlednit nevýhody spojené s velmi nízkou objemovou hustotou vodíku, která klade vysoké nároky na konstrukci tlakových nádob. Pro dosažení potřebné pevnosti se nejčastěji používají kompozitní materiály s vysokým podílem uhlíkových vláken. Tyto nádoby bývají poměrně drahé, hmotnostně náročné a citlivé na tepelné zatížení, například při rychlém plnění, kdy dochází k výraznému nárůstu teploty [11].



Obr. 2 Součásti tlakové nádrže na vodík typu IV [10]

Z konstrukčního hlediska se tlakové nádoby na stlačený vodík rozdělují do čtyř základních typů, lišících se materiálovým složením, hmotností, cenou i mechanickými vlastnostmi [12]:

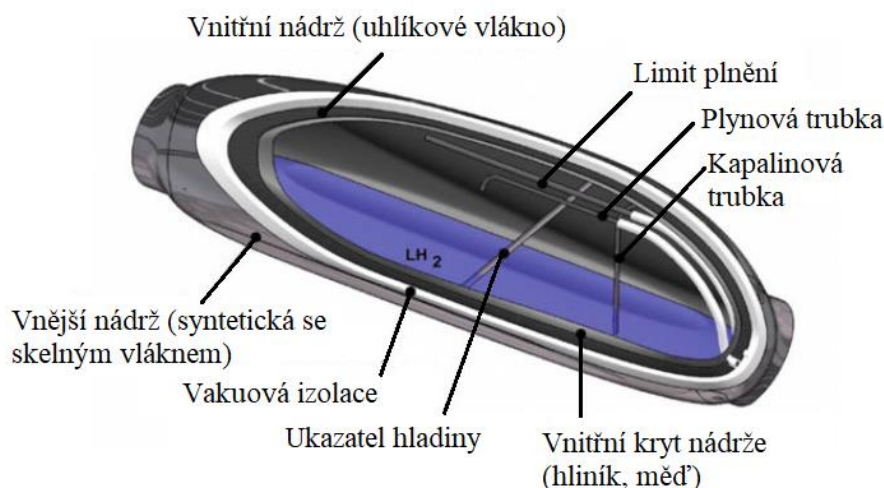
- **Typ I** představuje celokovové nádoby (z oceli nebo hliníku), které jsou konstrukčně jednoduché a levné, ale velmi těžké a nevhodné pro mobilní aplikace.
- **Typ II** využívá kovový plášť s částečným kompozitním opletením, což umožňuje určité snížení hmotnosti oproti typu I, nicméně kovový podíl zůstává významný.

- **Typ III** obsahuje vnitřní kovovou vložku z hliníku nebo oceli, zcela obalenou kompozitním materiálem. Tento typ je výrazně lehčí a vhodnější pro dopravu, avšak může být náchylný k tzv. vodíkové křehkosti, tedy degradaci kovu vlivem pronikání vodíku.
- **Typ IV** představuje nejpokročilejší řešení, kde je použita polymerní vnitřní vložka, která je zcela obalena kompozitem z uhlíkových vláken. Polymer je vůči vodíkové křehkosti odolný, a díky nízké hmotnosti a vysoké gravimetrické kapacitě je tento typ v současnosti nejčastěji využíván ve vozidlech s palivovými články. Nevýhodou jsou však vyšší výrobní náklady.

K řešení nevýhod jako je hmotnost se navrhuje využití tzv. space-filling skeleton – vnitřní výztužné kostry, která umožní redukovat hmotnost a zlepšit mechanickou stabilitu nádoby. Tato konstrukce navíc dovoluje variabilnější tvary tlakových nádob, což by usnadnilo jejich integraci do vozidel. Významným směrem výzkumu je také vývoj nových kompozitních materiálů, které sníží náklady a zároveň zachovají potřebnou pevnost a odolnost [11].

1.1.2 ZKAPALNĚNÝ VODÍK

Zkapalňování vodíku je kryogenní proces, který výrazně zvyšuje jeho objemovou hustotu, čímž umožňuje delší dojezd vozidel a menší nároky na prostor. Proces však vyžaduje extrémně nízké teploty (cca 20 K) a spotřebuje až 35 % energetického obsahu paliva jen na zkapalnění. Další komplikací jsou ztráty způsobené odpařováním („boil-off“), které nastávají při jakémkoli zahřátí systému – například během přepravy nebo při odstavení vozidla. Pokud vozidlo několik dní nejezdí, je nutné nádrž odtlakovat, čímž dochází ke ztrátám paliva [11].



Obr. 3 Řez kryogenní nádrží pro automobily [3]

Tyto nevýhody jsou částečně řešeny pomocí vakuové izolace viz obr. 3, která výrazně omezuje přenos tepla, a vícevrstevných kovových fólií oddělených skelnou vatou. Kromě toho se přidávají

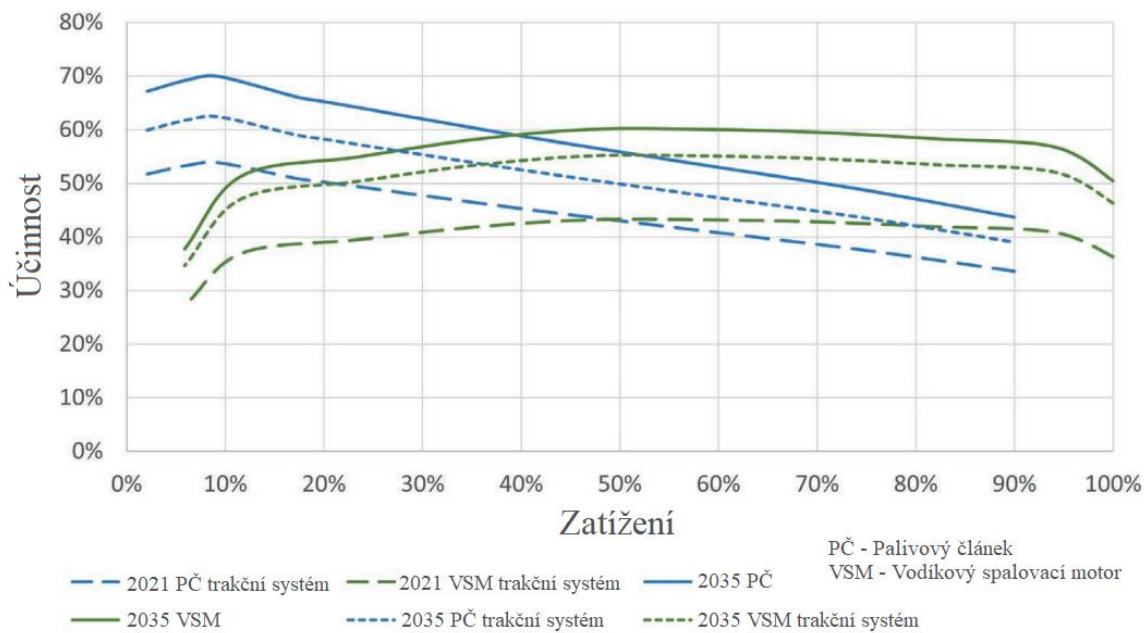
bezpečnostní ventily pro regulované odvětrávání přebytečného plynu. Přestože se tím zvýšila bezpečnost i provozní stabilita, tyto systémy stále vykazují zásadní nevýhody v oblasti energetické efektivity a provozní flexibility, což vedlo k přesunu zájmu směrem ke kryostlačenému skladování [11].

1.1.3 KRYOSTLAČENÝ VODÍK

Kryokompresní skladování vodíku představuje technologii, která kombinuje výhody vysokotlakého a kryogenního uchovávání. Vodík je v tomto případě skladován při teplotách mezi 20–77 K a současně pod tlakem až 350 bar, čímž se dosahuje výrazně vyšších hodnot gravimetrické a objemové hustoty. Například systém Gen-3 vyvinutý v Lawrence Livermore National Laboratory dosáhl parametrů 7,1 wt.% (na každých 100 kg celého systému připadá 7,1 kg skutečně uloženého vodíku) a 44,5 g/l (v jednom litru nádrže se nachází 44,5 gramů vodíku), což převyšuje běžné mechanické metody skladování. Mezi hlavní přednosti této technologie patří prodloužená doba skladování bez ztrát (tzv. dormance). Na rozdíl od čistě kryogenního uchovávání není třeba při ohřevu nádrží ihned odtlakovat, neboť vodík zůstává díky tlaku bezpečně uložen i ve formě plynu. Tím se výrazně snižují ztráty způsobené samovolným odpařováním („boil-off“), které jinak zásadně limitují použití kapalného vodíku. Na druhé straně však tato technologie čelí několika klíčovým problémům. Nejnaléhavější z nich je vysoká cena související s použitím uhlíkových vláken, vakuové vícevrstvé izolace a celkově robustní konstrukce. Tyto náklady se však daří snižovat prostřednictvím optimalizací – například ztenčením hliníkové tlakové vložky a náhradou vnějšího ocelového pláště hliníkovým, čímž lze zvýšit hmotnostní podíl vodíku až na 9,2 wt.% a současně snížit hmotnost celého systému. Dále zůstává nevyřešeným problémem nízká energetická účinnost celého procesu a vysoké náklady na výrobu kapalného vodíku, zejména při centrální produkci parní reformací zemního plynu. V této oblasti se výzkum zaměřuje na vývoj decentralizovaných výrobních metod a energeticky méně náročných technologií zkapalnění, které by mohly zvýšit celkovou udržitelnost systému [11], [13].

1.2 SROVNÁNÍ PALIVOVÝCH ČLÁNKŮ A VODÍKOVÝCH SPALOVACÍCH MOTORŮ

Vodík se v dopravě v současnosti nejčastěji využívá prostřednictvím palivových článků, které přeměňují chemickou energii vodíku přímo na elektřinu. Tyto systémy vynikají vysokou účinností při nízké a střední zátěži a nulovými lokálními emisemi, což je činí vhodnými zejména pro městskou a příměstskou dopravu. Naopak vodíkové spalovací motory představují technologii, která si získává stále větší pozornost zejména v aplikacích, kde je vozidlo dlouhodobě provozováno při vysokém zatížení. Na rozdíl od palivových článků, jejichž účinnost s rostoucím zatížením klesá, vodíkové spalovací motory vykazují opačné chování – jejich účinnost se zvyšuje, a v pásmu nad 60 % zatížení mohou být v reálných podmínkách dokonce účinnější než palivové články (viz *obr. 4*; [14]). Tato charakteristika činí vodíkové spalovací motory výhodnými především pro těžkou nákladní dopravu, dálkové autobusy, a železniční dopravu, kde je stabilní vysoký výkon klíčovým požadavkem.



Obr. 4 Porovnání účinnosti palivových článků a vodíkových spalovacích motorů [14]

Vodíkový spalovací motor představuje výhodnější alternativu oproti palivovému článku nejen z hlediska provozní charakteristiky při vysokém zatížení, ale také z pohledu nároků na čistotu vodíku. Zatímco palivové články s protonvýměnnou membránou (PEMFC) vyžadují vysoce čistý vodík s minimální čistotou 99,97 % dle normy EN 17124 [15], vodíkové spalovací motory jsou schopny efektivně fungovat i s vodíkem nižší kvality, přičemž pro ně dosud neexistuje žádná mezinárodní norma závazně určující požadovanou čistotu paliva. Tento rozdíl je zásadní, neboť palivové články jsou velmi citlivé na kontaminanty, jako jsou například oxid uhelnatý (CO), uhlovodíky (HC) nebo amoniak (NH₃), které mohou vážně poškodit jejich katalyzátor a výrazně zkrátit životnost zařízení [16].

Tato citlivost klade vysoké nároky nejen na skladování a distribuci vodíku, ale především na jeho výrobu a následné přečištění. Vodík se dnes vyrábí různými metodami, které se liší jak emisní zátěží, tak výstupní čistotou paliva. Pro snadnější orientaci byla zavedena tzv. barevná klasifikace vodíku podle vstupních surovin a energetického zdroje [7]. Nejrozšířenější je šedý vodík, vyráběný parním reformingem zemního plynu, který v roce 2021 tvořil 69 % světové produkce [17]. Ten však obvykle obsahuje zbytky CO, CH₄ a síry, a vyžaduje proto nákladné čištění, má-li být použit v palivových článcích. Typickými metodami jsou tlaková výměnná adsorpce (PSA), membránová separace nebo katalytická oxidace, které jsou nutné pro dosažení normované úrovně čistoty vodíku pro PEMFC [18].

Hnědý vodík, vyráběný zplyňováním uhlí, má nejvyšší emisní zátěž. Uhlíková stopa tohoto procesu pohybuje v rozsahu 21,8 až 51,9 kg CO₂eq na 1 kg vyrobeného vodíku [6] zároveň velmi nízkou čistotou, a proto je pro použití v palivových článcích zcela nevhodný bez rozsáhlého přečištění [18].

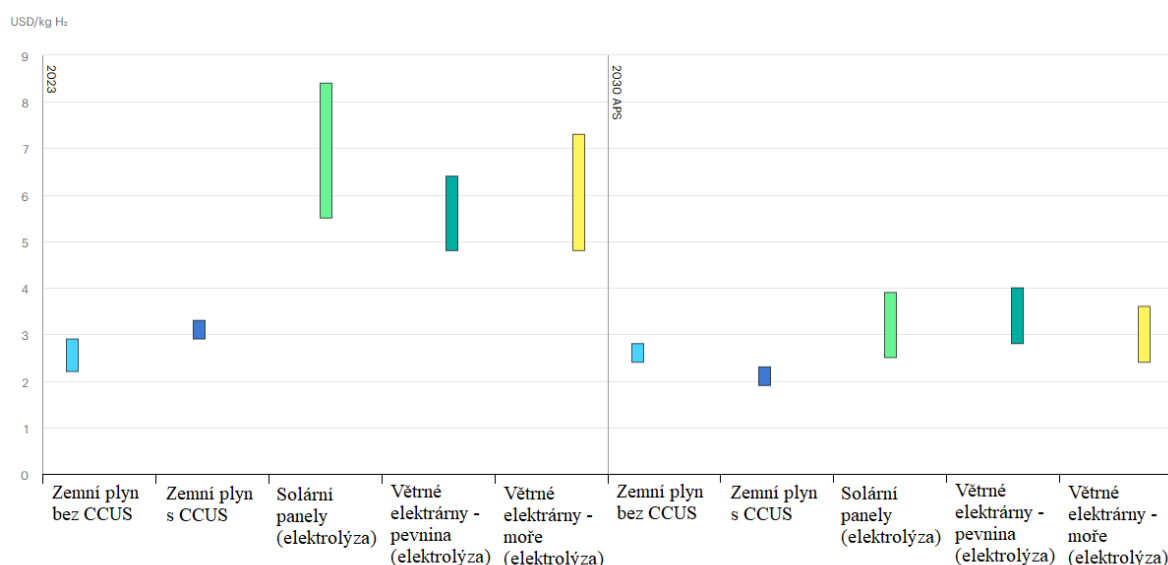
Modrý vodík, vznikající obdobně jako šedý, ale s využitím technologie zachytávání uhlíku (CCUS), může mít v optimálních podmínkách uhlíkovou stopu 2,6 kg CO₂eq/kg H₂ [6], avšak

stejně jako šedý vodík obvykle nevyhovuje kvalitativním požadavkům PEM článků bez úpravy [18].

Naopak zelený vodík, produkováný elektrolýzou vody za využití obnovitelných zdrojů, má výstupní čistotu často natolik vysokou, že je přirozeně vhodný pro PEMFC, obvykle bez nutnosti další separace. Přesto je i elektrolytický vodík odbornou literaturou označován jako tzv. „surový vodík“ a nemůže být považován za automaticky vyhovující požadavkům norem ISO 14687. Může obsahovat stopová množství kontaminantů pocházejících z elektrolytu, elektrod nebo okolního prostředí, a proto je nezbytné jeho parametry ověřit. Ve většině případů však elektrolytický vodík splňuje požadavky pro PEMFC bez nutnosti komplexního vícestupňového přečištění, čímž se odlišuje od vodíku získaného z fosilních zdrojů [6], [7], [18].

Z hlediska spotřeby paliva vykazují vozidla využívající vodík znatelně nižší spotřebu ve srovnání s tradičními benzinovými automobily. U konvenčních vozidel se spalovacím motorem činí průměrná spotřeba přibližně 9 litrů benzínu na 100 km, což odpovídá přibližně 6,75 kg paliva. Naproti tomu vozidla se spalováním vodíku spotřebují přibližně 1,4 kg vodíku na 100 km. Nejnižší spotřeby dosahují vozidla s vodíkovými palivovými články, kde průměrná hodnota činí přibližně 1,0 kg vodíku na 100 km. Tyto údaje se vztahují k vozidlům s výkonem motoru v rozmezí 81–110 kW, tedy běžnému segmentu osobních automobilů [19].

I přes výhodnou spotřebu zůstává z ekonomického hlediska hlavní překážkou širšího uplatnění vodíku jeho současná cena – především v případě zeleného vodíku. Proces výroby je energeticky náročný a dosud méně konkurenceschopný ve srovnání s výrobou šedého či modrého vodíku z fosilních paliv. K vyšší ceně přispívají nejen investiční náklady na elektrolýzery a cenu obnovitelné elektřiny, ale i omezená infrastruktura a nízký objem poptávky.



Obr. 5 Náklady na vodík v severozápadní Evropě, 2023-2030 [20]

Podle scénáře APS Mezinárodní energetické agentury (IEA) a aktualizované Vodíkové strategie ČR [2] však lze očekávat postupný pokles nákladů, viz *obr. 5*, díky technologickému pokroku, masivnějšímu nasazení elektrolyzérů a rozvoji distribučních sítí.

S rostoucí dostupností zeleného vodíku na trhu lze předpokládat, že se v budoucnu sníží i jeho koncová cena pro uživatele, což výrazně zlepší ekonomickou dostupnost vodíkových technologií v běžném provozu.

Ekologický přínos zeleného vodíku je přitom zásadní – jeho výroba i spotřeba mohou být při vhodném nastavení téměř bezemisní [6]. To nejen přispívá ke globálním klimatickým cílům, ale zároveň přináší přímé benefity pro životní prostředí v podobě zlepšení kvality ovzduší, snížení emisí skleníkových plynů a omezení závislosti na fosilních palivech.

Evropský klimatický balíček Fit for 55 navíc stanovuje závazné cíle pro podíl obnovitelného vodíku v dopravě a průmyslu [1], čímž vytváří stabilní regulační a poptávkové prostředí, které podporuje investice a akceleruje tržní uplatnění těchto řešení. Se zvyšujícím se podílem zeleného vodíku v energetickém mixu se tak vodíkové spalovací motory stávají stále realističtější alternativou nejen z technologického a ekologického hlediska, ale i z pohledu dlouhodobé ekonomické dostupnosti pro koncové uživatele – zejména v těžké a dálkové dopravě, kde kombinace dlouhého dojezdu a rychlého doplnění paliva hraje klíčovou roli.

1.3 PRINCIP VODÍKOVÉHO SPALOVACÍHO MOTORU

Vodíkové spalovací motory neboli H₂ICE (Hydrogen Internal Combustion Engine) jsou upravené zážehové nebo vznětové motory, které využívají jako palivo vodík H₂, který se mísí se vzduchem a reaguje s kyslíkem místo benzínu či nafty. Na rozdíl od palivových článků, které přeměňují vodík na elektřinu, H₂ICE spalují vodík přímo v motoru.

Mezi klíčové výhody spalování vodíku patří možnost využití stávajících spalovacích motorů, avšak jejich efektivní využití vyžaduje určité úpravy konstrukce a provozních parametrů. Vodíkové spalovací motory vykazují značný potenciál dosahovat vysoké tepelné účinnosti, zejména při využití chudých směsí a neškrceného sání, což vede ke snížení ztrát při nízkém zatížení. Typické provozní problémy těchto motorů, jako je předzápal a zpětný zášleh, lze účinně minimalizovat prostřednictvím technik, jako je přímé vstřikování paliva, optimalizace poměru palivo – vzduch nebo snížení kompresního poměru [21].

Z hlediska emisí je klíčové, že při spalování vodíku nevznikají emise oxidu uhličitého (CO₂) ani uhlovodíků či oxidu uhelnatého, protože vodík jako palivo uhlík neobsahuje. Jediným významným polutantem jsou oxidy dusíku (NO_x) [21]. Dále tento systém umožňuje rychlé doplňování paliva, což představuje zásadní výhodu oproti bateriovým elektromobilům. Dalším benefitem je nižší závislost na kritických surovinách, jako je lithium a nikl, což snižuje ekologickou i ekonomickou zátěž spojenou s jejich těžbou. Využitím existujících technologií a infrastrukturních investic by vodíkový spalovací motor mohl urychlit zavádění nízkoemisních pohonů do běžného provozu [22]. Pro základní přehled energetických parametrů a fyzikálních vlastností vodíku ve srovnání s konvenčními palivy slouží *tab. 1*, která uvádí jejich přímé porovnání.

Tab. 1 Vlastnosti vodíku ve srovnání s benzinem a naftou [23]

Vlastnost	Vodík	Benzin	Nafta
Obsah uhlíku (hmotnostní %)	0	84	86
Výhřevnost (MJ/kg)	120	44	42,5
Hustota (při 1 baru a 273 K; kg/m ³)	0,089	730–780	830
Objemová energetická hustota (při 1 baru a 273 K; MJ/m ³)	10,7	33 · 10 ³	35 · 10 ³
Bod varu (K)	20	298–488	453–633
Teplota samovznícení (K)	853	~623	~523
Stechiometrický hmotnostní poměr vzduch/palivo	34,4	14,7	14,5
Mezní hodnoty hořlavosti na vzduchu (objemové %)	4–76	1–7,6	0,6–5,5

Vodík lze spalovat v zážehových i vznětových motorech, přičemž každý z těchto přístupů vyžaduje specifické úpravy konstrukce i řízení spalovacího procesu.

1.3.1 ZÁŽEHOVÉ SPALOVACÍ MOTORY

Zážehové vodíkové motory využívají klasický princip vnějšího zapalování směsi pomocí zapalovací svíčky. Díky fyzikálně-chemickým vlastnostem vodíku – zejména mimořádně širokému rozmezí hořlavosti viz *tab. 1*, vysoké rychlosti šíření plamene a nízké zapalovací energii – lze vodíkovou směs zapálit velmi snadno a provozovat motor i na velmi chudé směsi ($\lambda > 2,5$). Tato schopnost přináší výhodu v podobě vyšší tepelné účinnosti a současně nižších emisí oxidů dusíku (NO_x) [24].

Při konstrukci vodíkových zážehových motorů se uplatňují různé strategie dávkování paliva, včetně karburace, vstříku do sacího potrubí (port fuel injection, PFI) a přímého vstříku (direct injection, DI). Každá z těchto metod má specifické technické dopady. Například přímý vstřík umožňuje přesnější kontrolu složení směsi, a především výrazně redukuje riziko zpětného zážehu, protože vodík je vstřikován až po uzavření sacího ventilu a není tak přítomen v sacím potrubí během fáze nasávání. Oproti přímému vstřikování do válce je vstřikování vodíku do sacího potrubí technicky jednodušší a zajišťuje dobré promísení směsi se vzduchem ještě před vstupem do spalovacího prostoru. Tento způsob je však spojen s vyšším rizikem zpětného hoření (backfire), které vzniká v důsledku přítomnosti hořlavé směsi ve sání. Pokud dojde ke zpětnému šíření plamene z válce, může plamen proniknout do sacího potrubí a poškodit jeho konstrukci nebo negativně ovlivnit chod motoru. Tento jev lze účinně potlačit vhodným časováním vstřikovače. Vstřík vodíku by měl být ukončen dostatečně brzy před koncem sacího

zdvihu, aby se ve finální fázi sání nasával již čistý vzduch bez vodíku. Tím se zajistí, že v sacím potrubí na konci sání nezůstává hořlavá směs, což výrazně snižuje riziko zpětného zášlehu [24], [25].

Klíčovým opatřením pro prevenci předčasného hoření je také použití zapalovacích svíček s nízkou tepelnou hodnotou, které minimalizují vznik horkých bodů. Další důležitou konstrukční úpravou je minimalizace objemů v oblasti pístních kroužků a úprava tvaru spalovací komory, aby se zabránilo hromadění vodíku v místech, kde by mohlo dojít k opožděnému nebo nekontrolovanému zážehu. Doporučuje se rovněž upravit sací a výfukové ventily, sedla ventilů a další teplotně exponované součásti z hlediska materiálové odolnosti, neboť vodík může přispívat k jejich zvýšenému opotřebení a degradaci. Vzhledem k vysoké difuzivitě vodíku je také nezbytné zajistit účinné odvětrání klikové skříně, aby se zabránilo hromadění vodíku v mazacím systému. Zásadní výhodou zážehových vodíkových motorů je skutečnost, že mohou být provozovány zcela bez potřeby pilotního paliva, což eliminuje závislost na fosilních palivech, zjednodušuje konstrukci palivového systému a přispívá k celkovému snížení emisní zátěže [25].

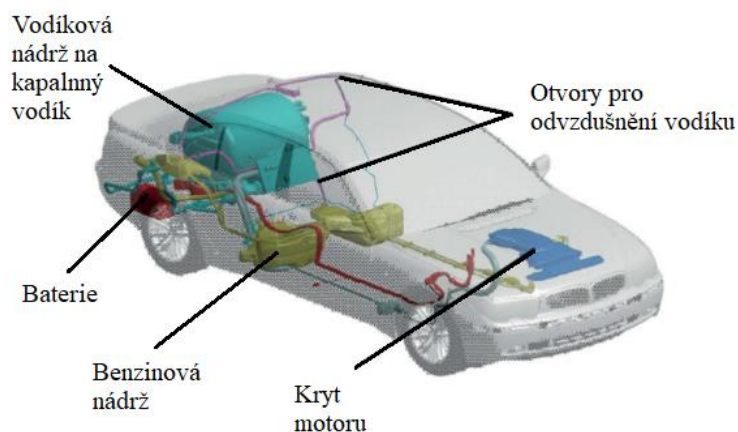
1.3.2 VZNĚTOVÉ SPALOVACÍ MOTORY

Vznětové vodíkové motory se od zážehových zásadně liší přístupem ke spalování. Vodík, vzhledem ke své vysoké samozápalné teplotě 853 K [23], není schopen samovznícení za standardních provozních podmínek vznětového motoru. Z tohoto důvodu se využívá tzv. duální režim, kdy vznětový motor nasává vzduch obohacený o vodík v různém směšovací poměru, směs následně stlačuje a zapaluje vstříknutím malého množství nafty, která iniciuje spalování. Tento systém zachovává některé výhody vznětových motorů, zejména vysokou účinnost při vysokém zatížení a robustnost konstrukce, avšak přináší i určité nevýhody. Jednou z hlavních výzev je zvýšená tvorba NO_x , která je důsledkem vyšších teplot ve spalovací komoře. Aby bylo možné tuto nevýhodu potlačit, využívají se různé strategie, jako například vstříkávání vody, snížení kompresního poměru, které napomáhají snižování teplotních špiček během spalovacího procesu, nebo stejně jako u zážehových motorech pomocí recirkulace výfukových plynů (EGR). Dále lze emise NO_x výrazně snížit také technologií selektivní katalytické redukce (SCR), která je běžně využívána u moderních diesellových vozidel. Tato metoda umožňuje účinné odstranění NO_x z výfukových plynů i při provozu v chudé směsi. Z hlediska dodávky vodíku do motoru se u vznětových jednotek uplatňuje převážně vstřík do sacího potrubí, který umožňuje předmíchání se vzduchem, čímž se zajišťuje rovnoměrné rozložení paliva ve válci a snižuje se pravděpodobnost lokálních bohatých směsí, které mohou vést ke zvýšené tvorbě NO_x [26], [27].

1.4 PŘÍKLADY VODÍKOVÝCH SPALOVACÍCH MOTORŮ

BMW HYDROGEN 7

V roce 2007 BMW začalo prodávat vozidlo vybavené dvanáctiválcovým motorem V12, které kombinuje spalování jak benzínu, tak i vodíku. Motor o objemu 6000 cm³ dosahuje výkonu 191 kW a maximálního točivého momentu 390 Nm při 4300 otáčkách za minutu. Tyto parametry umožňují vozu zrychlení z 0 na 100 km/h za 9,5 sekundy [28].



Obr. 6 Schéma BMW Hydrogen 7, upraveno [28]

Pro maximální dojezd je vozidlo vybaveno dvěma nádržemi viz obr. 6. První nádrž o objemu 74 litrů je určena pro fosilní palivo, zatímco vodík je uchováván v kryogenní nádobě, která je chlazená na teplotu 20 K. Vozidlo má kapacitu pro 8 kg vodíku, což mu umožňuje dojezd přibližně 200 km, pokud je poháněno vodíkem, a 500 km v případě použití benzínu jako paliva [3], [19], [28].

MAZDA RX-8 HYDROGEN RE

V roce 2003 Mazda představila svůj prototyp auta s dvoupalivovým systémem, umožňující jet na benzin či stlačený vodík. Tento model využíval rotační vodíkový motor RENESIS 13B. Objem motoru činí 0,654 litru na každý z dvou rotorů. Maximální výkon je 80 kW při použití vodíku a 154 kW při použití benzínu. Co se týče točivého momentu, motor dosahuje hodnoty 140 Nm na vodík a 222 Nm na benzin při 5000 otáčkách za minutu. Vodík je skladován v plynném stavu ve vysokotlaké nádrži, která je navržena pro tlak 35 MPa, má objem 110 litrů, a je schopna dodávat vodík až na 100 km [29].



Obr. 7 Mazda RX-8 Hydrogen RE [29]

CUMMINS A JCB

Společnost Cummins Inc. představila v rámci veletrhů IAA Transportation 2022 v Hannoveru a ACT Expo v Kalifornii své pokročilé koncepty vodíkových spalovacích motorů viz *obr. 10*, které tvoří klíčovou součást její strategie pro dosažení nulových emisí do roku 2050. Motory o objemech 6,7 litru (B6.7H) viz *obr. 8* a 15 litrů (X15H) jsou navrženy na tzv. palivově flexibilní platformě, jež umožňuje sdílení většiny komponent napříč různými typy motorů, přičemž pouze horní část (nad hlavou válců) je přizpůsobena konkrétnímu palivu – v tomto případě vodíku [30], [31].



Obr. 8 Cummins B6.7H vodíkový motor [30]

Středně těžký motor B6.7H, testovaný na podvozku Mercedes-Benz Atego 4x2, dosahuje výkonu až 216 kW (290 koní) a točivého momentu 1200 Nm, aniž by bylo nutné měnit konstrukci vozidla nebo hnací ústrojí. Díky vodíkovým zásobníkům o tlaku 700 barů, vyvinutým ve spolupráci s firmou NPROXX, nabízí dojezd přibližně 500 km, přičemž plnicí čas činí přibližně 10 minut. Přestavba nijak neomezuje užité vlastnosti vozidla, a zároveň přináší nižší hlučnost oproti konvenčním diesellovým pohonům [30].



Obr. 10 Integrace vodíkového spalovacího motoru a tlakových nádrží v kamionu [32]

Výkonnější X15H, určený pro těžkou nákladní dopravu s celkovou hmotností až 44 tun, nabízí dojezd přesahující 1000 km, čímž představuje praktické řešení pro dálkové trasy. Oba motory byly vyvíjeny s důrazem na kompatibilitu se stávajícími převodovkami, chladicími systémy a výrobními kapacitami, což umožňuje rychlou industrializaci a nízké vstupní náklady oproti alternativám, jako jsou palivové články nebo bateriové elektrické systémy. Sériová výroba je plánovaná na rok 2027, což podtrhuje záměr společnosti zahájit dekarbonizaci v oblasti těžké dopravy ještě v této dekádě [30], [31].



Obr. 9 JCB vodíkový motor [34]

Firma JCB vyvinula první vodíkový spalovací motor viz obr. 9 určený pro komerční využití ve stavebních a zemědělských strojích. Motor získal certifikaci od 11 evropských licenčních orgánů, což umožňuje jeho prodej a použití ve státech jako Nizozemsko, Německo, Francie či Velká Británie. JCB již vyrobila více než 130 hodnotících motorů a testování v reálném provozu potvrzuje jejich úspěšné nasazení v praxi [33].

1.5 SHRnutí

Vodíkové spalovací motory představují technologii, která umožňuje dekarbonizaci dopravního sektoru a představují atraktivní alternativu především v aplikacích, kde je vozidlo dlouhodobě provozováno při vysokém zatížení. Na rozdíl od palivových článků jejich účinnost s rostoucím zatížením stoupá a při vyšším zatížení dosahují větší účinnosti než palivové články. Kromě toho mají spalovací motory nižší nároky na čistotu vodíku – na rozdíl od PEMFC, které vyžadují minimálně 99,97 % čistotu dle EN 17124, tolerují i vodík nižší kvality, který je zároveň levnější. To přináší výhodu z ekonomického hlediska, neboť umožňuje využití širší škály paliv bez nutnosti nákladného čištění.

Z pohledu emisí nevzniká při spalování vodíku CO_2 . Jediným znečišťujícím produktem jsou oxidy dusíku (NO_x), které se tvoří při vysokých teplotách spalování. Produkci NO_x však lze výrazně snížit zavedením osvědčených technologií, jako je například recirkulace výfukových plynů (EGR), přesné řízení poměru vzduch-palivo nebo vstřikování vody. Kromě těchto metod lze ke snižování emisí NO_x efektivně využít také selektivní katalytickou redukci (SCR), která se úspěšně uplatňuje u moderních vznětových motorů.

Zážehové vodíkové motory jsou z konstrukčního a provozního hlediska vhodnější zejména proto, že umožňují provoz pouze na vodík bez nutnosti použití sekundárního paliva. Tato jednopalivová konfigurace výrazně zjednodušuje palivový systém a snižuje výrobní náklady.

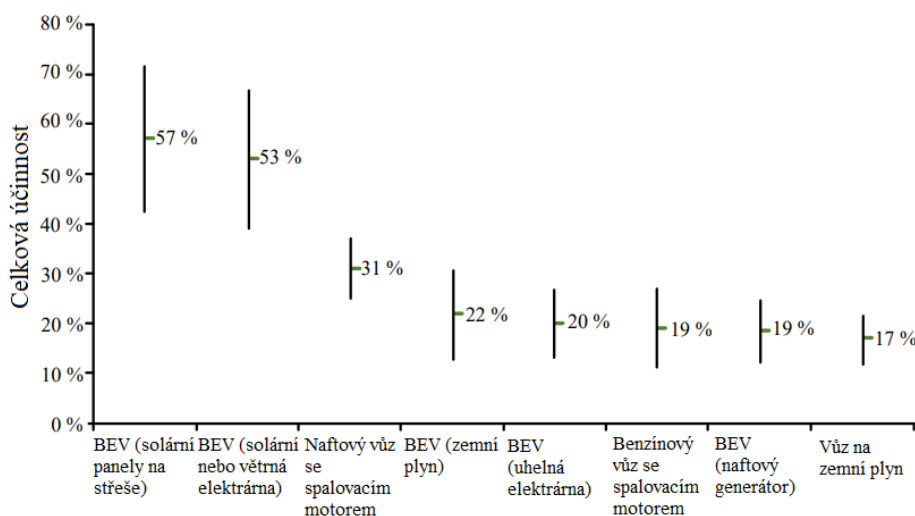
Z dlouhodobého hlediska lze navíc očekávat další zlepšení ekonomické dostupnosti této technologie díky rozvoji vodíkové infrastruktury, zvyšujícím se objemům výroby a širšímu nasazení zeleného vodíku vyráběného z obnovitelných zdrojů. To povede nejen ke snížení ceny vodíku, ale i k dalšímu posílení ekologického přínosu vodíkových spalovacích motorů v těžké dopravě, kde jsou požadavky na vysokou účinnost, flexibilitu a dekarbonizaci stále aktuálnější.

2 ELEKTROMOBILY

Elektromobilita představuje moderní a dynamicky se rozvíjející oblast osobní i veřejné dopravy, jejíž hlavním cílem je snížit závislost na fosilních palivech a omezit emise škodlivých látek. Bateriová elektrická vozidla (BEV – Battery Electric Vehicles) využívají k pohonu elektrickou energii uloženou v bateriích, kterou přeměňují pomocí elektromotorů na mechanickou energii. Na rozdíl od konvenčních vozidel se spalovacími motory jsou elektromobily efektivnější, tišší, mají nižší provozní náklady a vyžadují méně údržby.

Jednou z hlavních výhod elektromobility je vysoká energetická účinnost celého pohonného systému zejména pokud je elektrina z obnovitelných zdrojů viz *obr. 11*. Tento aspekt lze nejlépe hodnotit pomocí metodiky WTW – Well-to-Wheel („od zdroje po kolo“), která poskytuje komplexní přehled o efektivitě využití energie od její těžby až po samotný pohyb vozidla [35]. Metodika se skládá ze dvou částí:

- WTT (Well-to-Tank – „od zdroje k nádrži“) zahrnuje těžbu, zpracování, přepravu a distribuci paliva či energie,
- TTW (Tank-to-Wheel – „od nádrže ke kolům“) hodnotí účinnost využití energie ve vozidle samotném.



Obr. 11 Průměrná účinnost (WTW) různých automobilů poháněných různými zdroji [36]

Celková WTW účinnost je dána součinem účinností WTT a TTW a udává, kolik energie z primárního zdroje je skutečně přeměněno na mechanickou práci potřebnou k pohybu vozidla. V této oblasti elektromobily výrazně vynikají – v rámci TTW fáze dosahují účinnosti mezi 50–80 %, zatímco u spalovacích motorů se tyto hodnoty obvykle pohybují v rozmezí 14–42 % [36]. V kombinaci s možností regenerativního brzdění, při kterém dochází ke zpětnému získávání části kinetické energie, se efektivita elektrického pohonu ještě zvyšuje.

K dalším výhodám elektromobilů patří nízké provozní náklady, zejména při nabíjení z běžné domácí elektrické sítě [37], lokálně bezemisní provoz a schopnost rekuperace [38], [39].

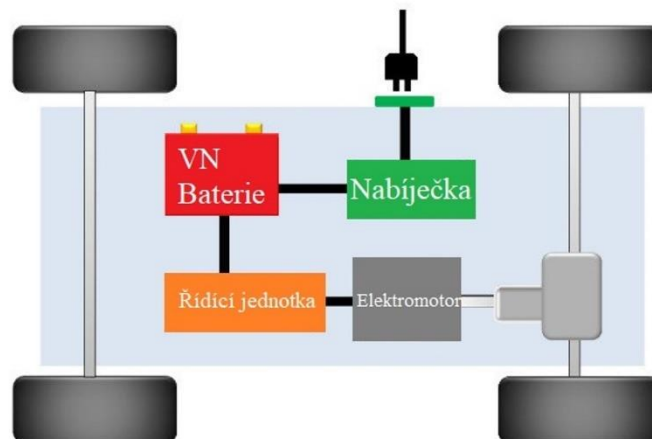
Významný je také plynulý a okamžitý nástup točivého momentu elektromotoru [40], což pozitivně ovlivňuje dynamiku jízdy i celkový komfort řidiče.

V případě, že je elektrická energie vyráběna z nízkoemisních nebo obnovitelných zdrojů, představuje elektromobilita nejen technicky efektivní, ale i environmentálně příznivou alternativu k tradičním spalovacím vozidlům.

Na druhé straně elektromobily zatím nejsou ideální pro všechny druhy dopravy. Baterie jsou těžké kvůli nízké gravimetrické hustotě [41] a zabírají značný prostor, což komplikuje použití v těžké nákladní dopravě nebo železničním provozu. Dále je třeba zohlednit delší dobu nabíjení (zejména bez použití rychlonabíječek) a omezený dojezd na delších trasách (průměrný dojezd elektromobilů je přibližně 380 km [42]). Tyto faktory ovlivňují zejména dálkovou dopravu, kde BEV aktuálně nenabízí plnohodnotnou náhradu.

2.1 PRINCIP FUNGOVÁNÍ ELEKTROMOBILŮ

Elektromobily fungují na základě elektrických motorů poháněných elektrickou energií uloženou v bateriích. Hlavní součásti bateriového elektrického vozidla dělí na elektrickou baterii, elektromotor a řídicí jednotku motoru viz *obr. 12*. Technická struktura je jednodušší ve srovnání s vozidlem se spalovacím motorem, protože nepotřebuje startovací, výfukový ani mazací systém, většinou ani převodovku a někdy ani chladicí systém.



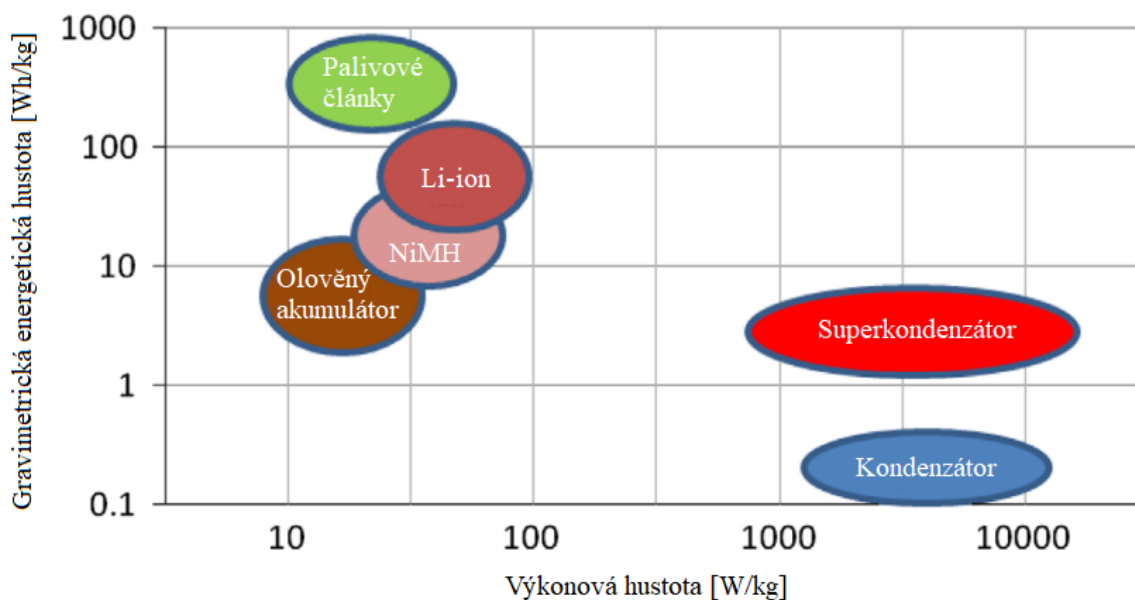
Obr. 12 Schéma elektromobilu [38]

2.1.1 AKUMULÁTOR

Trakční baterie slouží jako hlavní zásobárna elektrické energie. Nabíjení baterie probíhá buď připojením k elektrické síti prostřednictvím nabíjecího zařízení, jehož účinnost se pohybuje v rozmezí 60–97 %, nebo regenerativním brzděním, při kterém je část kinetické energie přeměňována zpět na elektrickou [38].

V současnosti dominují v oblasti bateriových elektrických vozidel lithium-iontové akumulátory, a to díky své vysoké energetické hustotě, dlouhé životnosti a možnostem efektivního řízení nabíjecích a vybíjecích cyklů. Nejčastěji se využívají lithium-iontové baterie s katodou na bázi oxidů niklu, kobaltu a hliníku (NCA) a oxidů niklu, manganu a kobaltu (NMC). Jejich měrná energie dosahuje hodnot přibližně 150–190 Wh/kg pro NCA a pro NMC 100–135 Wh/kg. Dalším často používaným typem jsou baterie na bázi lithium-železo-fosfátu (LFP), ty vykazují měrnou energii v rozmezí 90–120 Wh/kg [41].

Vedle lithium-iontových baterií se stále využívají i starší technologie, jako jsou nikl-metal hydridové (NiMH) akumulátory s měrnou energií 60–120 Wh/kg a olovené baterie s hodnotami 30–50 Wh/kg [41]. NiMH baterie, běžně používané ve zdravotnických a výpočetních zařízeních, nabízejí dobrý poměr mezi energetickou a výkonovou hustotou. Oproti olovu mají delší životnost, vyšší bezpečnost a lépe snášejí nesprávné zacházení, což z nich činí vhodnou volbu pro hybridní vozidla. Mezi jejich hlavní nevýhody patří vyšší pořizovací náklady, samovybíjení, sklon k přehřívání a nutnost řízení ztrát vodíku během provozu [43].



Obr. 13 Srovnání typů akumulátorů na základě výkonové a gravimetrické energetické hustoty [44]

Olovené baterie, i přes nízkou specifickou energii, jsou stále používány díky své nízké ceně, bezpečnosti, spolehlivosti a recyklovatelnosti. Jejich využití je dnes omezeno převážně na vedlejší elektrické systémy v elektromobilech nebo na podporu funkce stop-start ve vozidlech se spalovacím motorem, kde pomáhají snižovat spotřebu paliva. Nevýhodou těchto baterií je nízký výkon v chladném prostředí, kratší životnost a omezená energetická kapacita [43].

Superkondenzátory představují specifickou technologii ukládání energie, která funguje na principu elektrostatického uchovávání náboje na rozhraní mezi elektrodou a elektrolytem. Oproti běžným bateriím mají výrazně nižší energetickou hustotu, zpravidla 3–5 Wh/kg, avšak vyznačují se mimořádně vysokou hustotou výkonu viz obr. 13, velmi rychlým nabíjením a vybíjením, vysokou účinností cyklu (okolo 90 %) a dlouhou životností, která může dosahovat

až 500 000 cyklů. Díky nízkému vnitřnímu odporu vykazují minimální tepelné ztráty a velmi dobrou zpětnou účinnost, což z nich činí efektivní řešení pro dynamické zatížení [43], [44].

V praxi se superkondenzátory často využívají jako sekundární zdroj energie – například při akceleraci, jízdě do svahu nebo rekuperaci brzděné energie – kde pomáhají vyrovnávat výkonové špičky. Tím zároveň přispívají k prodloužení životnosti hlavního akumulátoru, obvykle typu Li-ion. Kombinace baterií se superkondenzátory je obzvláště výhodná v aplikacích, kde je třeba rychlého toku energie při zachování stabilního napájení [43], [44].

Současné výzkumy navíc ukazují, že energetický potenciál superkondenzátorů může být dále výrazně zvýšen. Například asymetrický superkondenzátor s uhlíkovými elektrodami a vodným elektrolytem s vysokou koncentrací soli dosáhl energetické hustoty až 244,8 Wh/kg při výkonové hustotě 3500 W/kg a stále udržel hodnotu 183,7 Wh/kg při extrémní výkonové hustotě 17 500 W/kg [45]. Výzkumy v oblasti superkondanzátorů naznačují, že jejich energetická hustota může být v budoucnu výrazně zvýšena (až na 300–400 Wh/kg), avšak očekávaný vývoj Li-ion baterií míří až k hodnotám 400–600 Wh/kg [44].

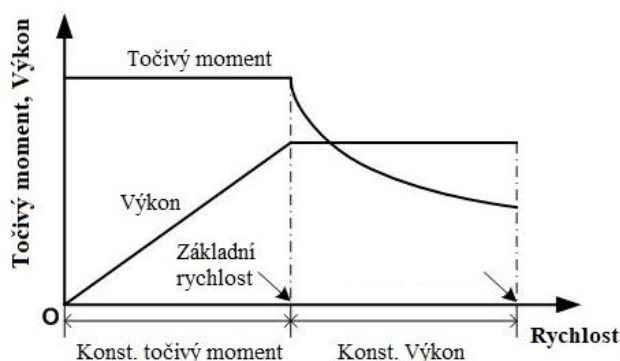
Přestože mají lithium-iontové články relativně vysokou energetickou hustotu, zůstává trakční baterie jednou z nejtěžších komponent celého elektromobilu, často vážící několik stovek kilogramů. Tato hmotnost ovlivňuje nejen konstrukci vozidla, ale i spotřebu energie a jízdní vlastnosti, zejména při zrychlování a brzdění.

2.1.2 ELEKTROMOTOR

Výkonová elektronika a řídicí jednotka regulují přísun energie z baterie do elektromotoru v závislosti na zatížení. Elektromotor pak přeměňuje elektrickou energii na mechanickou práci, resp. na točivý moment přenášený na kola prostřednictvím hnacího ústrojí.

V trakčních systémech bateriových elektrických vozidel se uplatňuje několik typů elektromotorů, přičemž mezi nejčastěji používané patří synchronní motor s permanentními magnety (PMSM), bezkartáčový stejnosměrný motor (BLDCM), asynchronní motor (IM) a reluktanční motor (SRM). Volba konkrétního typu závisí na požadavcích na výkon, účinnost, spolehlivost i náročnost řízení.

Za technicky nejvhodnější řešení pro pohon elektromobilu lze považovat synchronní motor s permanentními magnety (PMSM), který vyniká vysokou účinností, kompaktní konstrukcí, nízkou hlučností, vysokou hustotou výkonu a točivého momentu a minimálními nároky na údržbu. PMSM dosahuje přibližně o 30 % vyšší hustoty výkonu i točivého momentu než BLDC motor, o téměř 89 % více než SRM a až o 200 % více než asynchronní motor. K dalším výhodám patří schopnost udržet vysoký točivý moment i při nízkých otáčkách, což je zásadní pro provoz v městském prostředí s častými rozjezdy, brzděním a využíváním regenerativního brzdění. Oproti BLDC motoru má PMSM nižší pulzace proudu i točivého momentu, což zajišťuje plynulejší chod a přispívá k vyššímu komfortu jízdy [46].



Obr. 14 Křivka poptávky po výkonu a točivém momentu pro elektrická vozidla [40]

Průběh točivého momentu u elektromotoru je jednou z jeho největších výhod – nabízí okamžitý maximální točivý moment již od nulových otáček. Díky tomu vozidlo velmi rychle akceleruje a nepotřebuje klasickou převodovku. Typická charakteristika výkonu elektromotoru zahrnuje oblast konstantního točivého momentu (do základní rychlosti) a oblast konstantního výkonu (od základní do maximální rychlosti) viz obr. 14 [40].

2.1.3 REGENERATIVNÍ BRZDĚNÍ

Jednou z klíčových výhod elektromobilů oproti vozidlům se spalovacím motorem je možnost využití regenerativního (rekuperačního) brzdění. Tento princip spočívá v tom, že při zpomalování vozidla elektromotor přechází do režimu generátoru, čímž dochází k přeměně části kinetické energie zpět na elektrickou, která se ukládá do trakční baterie. Na rozdíl od konvenčního mechanického brzdění, kde je veškerá kinetická energie přeměňována na teplo a nevratně ztracena, umožňuje regenerativní brzdění její částečné znovuvyužití. To vede ke zvýšení celkové energetické účinnosti vozidla a k prodloužení dojezdu [47].

Zároveň se snižuje mechanické zatížení a opotřebení brzdového systému, protože při běžném zpomalování se fyzické brzdy využívají pouze minimálně. To má za následek nižší nároky na údržbu, delší životnost brzdových komponent a snížení emisí. U hybridních elektrických vozidel může být díky regeneraci potřeba třecího brzdění snížena až o 87 %, u plug-in hybridních vozidel až o 95 %. U plně elektrických vozidel se tento efekt projevuje ještě výrazněji, zejména v městských provozních podmínkách [48].

Konkrétně se díky regeneraci mohou emise pevných částic PM10 (částice o průměru do 10 mikrometrů) ve městském provozu dle TfL UIP (Transport for London Urban Interpeak Cycle – městský jízdní cyklus mimo dopravní špičku podle Transport for London) snížit z hodnot 12,0–18,9 mg/km na 3,9–5,5 mg/km, tedy o přibližně 68 %. U frakce PM2.5 (částice o průměru do 2,5 mikrometrů) klesají hodnoty ze 4,6–7,2 mg/km na 1,5–2,1 mg/km. V testovacím cyklu WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure – Celosvětově harmonizovaný zkušební postup pro lehká vozidla) dosahuje snížení emisí PM10 až 88 %. Ačkoli elektromobily vykazují zpravidla vyšší provozní hmotnost než vozidla se spalovacím motorem, schopnost rekuperace tuto nevýhodu ve značné míře kompenzuje [48].

Z environmentálního hlediska má regenerativní brzdění významný přínos, neboť omezuje emise vznikající opotřebením brzdových komponent, které tvoří významnou složku lokálního znečištění ovzduší, zejména ve městském prostředí. Regenerace tak přispívá nejen ke snížení emisí CO₂, ale rovněž ke zlepšení kvality ovzduší v oblastech s intenzivní dopravou.

2.1.4 TOK ENERGIE

Z hlediska toku energie je klíčovým prvkem v bateriovém elektromobilu trakční baterie, která uchovává elektrickou energii ve formě stejnosměrného proudu (DC). Tento proud je pro potřeby pohonu převáděn pomocí DC/AC měniče (invertoru) na střídavý proud (AC) s řízenými parametry frekvence a napětí, což umožňuje optimální činnost elektromotoru v různých provozních režimech. Současně je v systému přítomen DC/DC měnič, jehož úkolem je konverze vysokonapěťové energie z trakční baterie (typicky 400–800 V) na nižší úroveň napětí (např. 12 V nebo 48 V) pro napájení palubních zařízení a elektroniky, jako jsou světlomety, klimatizace nebo řídicí jednotky. Tato nízkonapěťová větev elektrické sítě zajišťuje základní funkce vozidla a je aktivní nezávisle na trakčním režimu. Tok energie v elektromobilu je obousměrný. Během akcelerace směřuje energie z baterie přes invertor k elektromotoru. Naopak při zpomalování elektromotor přechází do režimu generátoru a přeměňuje kinetickou energii zpět na elektrickou, která je za využití měniče převedena zpět na DC a uložena do baterie [49], [50].

2.2 EMISE

Ekologická stopa bateriových elektromobilů je zásadně ovlivněna dvěma hlavními faktory: emisní náročností výroby trakční baterie a uhlíkovou intenzitou elektrické energie, která je používána během provozu vozidla. Z hlediska emisí skleníkových plynů je výroba lithium-iontových baterií dle dostupných analýz životního cyklu (LCA) spojena s emisní zátěží v rozsahu 52 až 291 kg CO₂ ekv./kWh kapacity baterie. Hlavní podíl na těchto emisích mají materiály jako měď, hliník a grafit, přičemž samotné lithium představuje jen zanedbatelný podíl. Důležitým faktorem ovlivňujícím celkovou zátěž je rovněž lokalita výroby baterie – v případě využití nízkoemisních zdrojů energie může dojít ke snížení emisí až o 95–98 %. Provoz elektromobilu je z pohledu emisí lokálně bezemisní, avšak celkové emise související s provozem závisí na spotřebě elektrické energie a způsobu její výroby. Spotřeba se dle různých zdrojů pohybuje v rozmezí 15–20 kWh/100 km, avšak v reálných provozních podmínkách mohou být hodnoty odlišné od údajů získaných v laboratorním prostředí. Například testy vozidla Mitsubishi i-MiEV vykázaly spotřebu 11,3 kWh/100 km při městském provozu, 15 kWh/100 km v mimoměstském režimu a až 24,6 kWh/100 km při jízdě na dálnici. Tyto údaje potvrzují, že nejefektivnější využití elektromobilů je v městském a příměstském prostředí, kde dosahují nejnižší spotřeby a tím i nepřímé emisní zátěže [38].

Výsledné emise z provozu elektromobilu se pak odvíjejí od emisní intenzity národní elektrické sítě. V zemích s vysokým podílem uhlí, jako jsou Čína, Indie nebo Polsko, může provoz elektromobilu generovat až 215 g CO₂/km. Naproti tomu v zemích s nižší uhlíkovou stopou elektřiny, jako je Německo, se hodnoty pohybují mezi 84–113 g CO₂/km. Přesto i v těchto

podmínkách mohou být elektromobily ekologicky příznivější alternativou ve srovnání s konvenčními spalovacími vozidly, zejména těmi využívajícími uhlí převedené na kapalná paliva [38].

2.3 SHRNUÍ

Elektromobily představují klíčovou technologii pro modernizaci a dekarbonizaci dopravního sektoru. Oproti konvenčním vozidlům se spalovacími motory přináší celou řadu zásadních výhod, které z nich činí atraktivní alternativu zejména pro městský a příměstský provoz.

Mezi nejvýznamnější přínosy elektromobilů patří především jejich vysoká energetická účinnost, která ve fázi „tank-to-wheel“ (TTW) dosahuje hodnot mezi 50 až 80 %, zatímco u vozidel se spalovacím motorem se účinnost pohybuje pouze v rozmezí 14 až 42 %. Tato technologie navíc umožňuje lokálně bezemisní provoz, což přispívá ke zlepšení kvality ovzduší, zejména ve městech s vysokou dopravní zátěží. K dalším výhodám patří možnost rekuperace brzděné energie, která nejen prodlužuje dojezd, ale také snižuje opotřebení brzdových komponentů a snižuje produkci pevných částic až o desítky procent.

Elektromobily rovněž vynikají nízkými provozními náklady, především při domácím nabíjení. Jejich technická konstrukce je oproti konvenčním vozidlům jednodušší – neobsahují výfukový systém, převodovku ani složitý mazací okruh, což vede k nižším nárokům na údržbu a vyšší provozní spolehlivosti. Dále je třeba zmínit okamžitý nástup točivého momentu, který zajišťuje plynulou a dynamickou akceleraci bez prodlevy, což má pozitivní vliv na jízdní komfort.

Z pohledu energetické technologie dominují trhu lithium-iontové baterie, které poskytují vysokou měrnou energii (90–190 Wh/kg). Jejich nevýhodou zůstává vyšší hmotnost, která ovlivňuje celkovou konstrukci vozidla a spotřebu energie.

Přestože elektromobily v současnosti nejsou optimálním řešením pro dálkovou a těžkou nákladní dopravu – zejména kvůli delší době nabíjení a omezenému dojezdu – v oblasti osobní dopravy nabízejí výrazné provozní, ekologické i ekonomické benefity. Jejich přínos je nejvíce patrný ve městech, kde mohou významně přispět ke snížení emisí skleníkových plynů a zlepšení kvality života obyvatel.

3 HYBRIDNÍ POHONY

Hybridní elektrická vozidla (HEV – Hybrid Electric Vehicles) představují mezistupeň mezi tradičními automobily se spalovacím motorem a plně elektrickými vozidly. Pohonná energie zajištěna pomocí dvou nebo více typů energetických zásobníků, zdrojů nebo měničů, přičemž alespoň jeden z nich je schopen poskytovat elektrickou energii [51].

Koncept hybridního elektrického vozidla vznikl již na přelomu 19. a 20. století, kdy byly první prototypy představeny na pařížském autosalonu v roce 1899. Mezi nejvýznamnější rané příklady patří paralelní hybrid Henrého Piepera a první sériový hybrid od firmy Vendovelli a Priestly. V dalších letech následovaly konstrukce dalších hybridů, například od Camille Jenatzyho (1903) či H. Kriegera (1902), které kombinovaly různé typy spalovacích motorů a elektrických pohonů. Navzdory ropným krizím v 70. letech a rostoucímu ekologickému povědomí se hybridní vozidla tehdy sériové výroby nedočkala. Pozornost výzkumu se soustředila spíše na elektromobily. Až v 90. letech se zájem o hybridní pohony opět zvýšil, zejména kvůli omezením čistě elektrických vozidel. Významnou roli v obnoveném vývoji sehrála iniciativa společnosti Ford, která motivovala akademická pracoviště k návrhu hybridních verzí běžných automobilů. Ve srovnání s čistě spalovacími vozidly mají hybridní elektrická vozidla několik výhod, jako je nižší energetická spotřeba, menší závislost na dovozu ropy, nižší emise a méně znečištěné ovzduší. Dále přispívají k boji proti globálnímu oteplování, mají nižší náklady na údržbu a jsou tišší. Hlavními přednostmi oproti plně elektrickým vozidlům jsou nižší počáteční investice a delší dojezd [52].

Klíčovými výzvami při návrhu těchto systémů jsou řízení vícezdrojové energetiky, které silně závisí na jízdních cyklech, dimenzování akumulátorů a jejich efektivní správa. Ačkoli hybridní pohony dokážou uspokojit požadavky spotřebitelů, zásadní překážku v jejich širší adopci představují vyšší pořizovací náklady. Ty však mohou být kompenzovány formou státních pobídek, což by mohlo přispět k většímu zastoupení HEV v běžné automobilové produkci [51].

3.1 ROZDĚLENÍ PODLE USPOŘÁDÁNÍ

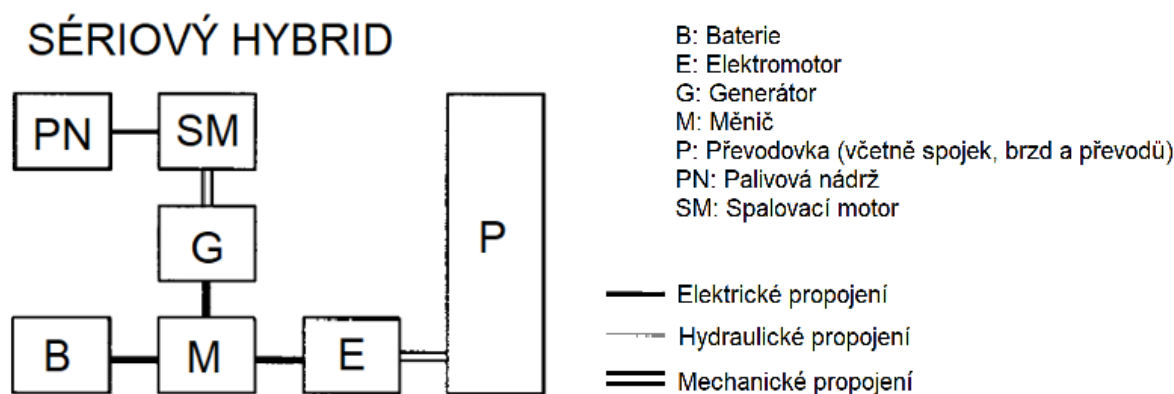
Na základě různého uspořádání komponent, jako je palivová nádrž, spalovací motor, baterie, měnič, elektromotor a generátor, můžeme hybridní pohony rozdělit do několika typů podle způsobu jejich vzájemného propojení a spolupráce.

- sériové uspořádání
- paralelní uspořádání
- sériově-paralelní uspořádání
- komplexní uspořádání

3.1.1 SÉRIOVÉ USPOŘÁDÁNÍ

Sériový hybridní systém představuje nejjednodušší typ hybridního elektrického vozidla. Princip jeho fungování spočívá v přeměně mechanického výkonu spalovacího motoru na elektrickou energii prostřednictvím generátoru. Takto získaná elektrická energie je následně buď

akumulována v baterii, nebo přímo využita k pohonu kol prostřednictvím elektromotoru a mechanického převodového systému. Z hlediska koncepčního návrhu lze sériový hybrid považovat za elektromobil, jehož dojezd je prodloužen využitím spalovacího motoru, čímž se přibližuje tradičním vozidlům se spalovacím pohonem. Jednou z klíčových výhod tohoto systému je oddělení spalovacího motoru od přímého pohonu kol, viz *obr. 15*, což poskytuje flexibilitu v jeho umístění v rámci vozidla. Kromě toho je sériový hybrid charakteristický relativně jednoduchou konstrukcí hnacího ústrojí. Další výhodou je možnost provozovat spalovací motor v jeho optimálním režimu s konstantními otáčkami a stabilním zatížením, což vede ke zvýšení celkové účinnosti a snížení emisí. Tento systém umožňuje různé provozní režimy, například čistě elektrickou jízdu, napájení elektromotoru výhradně generátorem, kombinovaný režim i rekuperaci brzděné energie. Na druhou stranu však systém vyžaduje tři hlavní pohonné komponenty – generátor, elektromotor a baterii – což zvyšuje složitost a hmotnost celého pohonného řetězce a má nepříznivý dopad na účinnost i náklady. Aby bylo možné zvládnout náročné provozní situace, jako je jízda do prudkého a dlouhého stoupání, je nezbytné dimenzovat výkon všech pohonných jednotek na trvalé zatížení. Pokud je však vozidlo určeno především pro kratší městské trasy, postačí nižší jmenovitý výkon generátoru, což umožňuje snížit výrobní náklady i celkovou energetickou náročnost systému [51], [52].

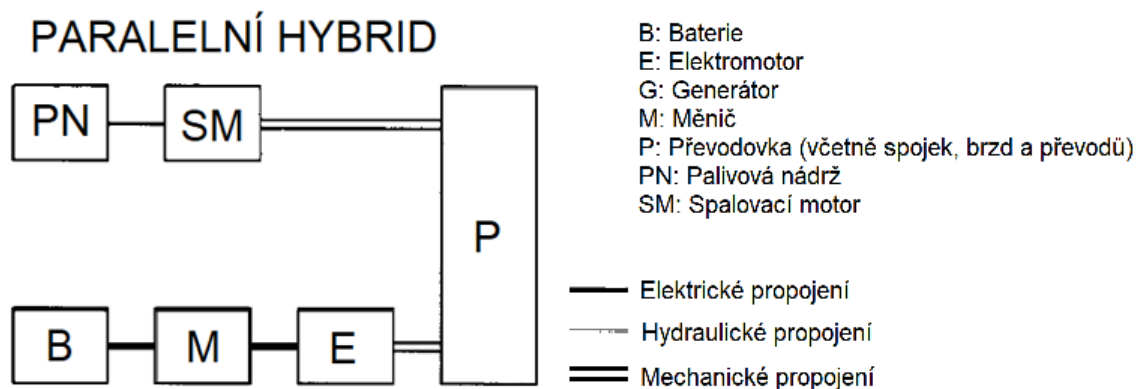


Obr. 15 Schéma sériového hybridu, upraveno [51]

3.1.2 PARALELNÍ USPOŘÁDÁNÍ

Paralelní hybridní systém se od sériového liší tím, že spalovací motor i elektromotor jsou schopné současně nebo samostatně přenášet mechanický výkon na hnací kola vozidla. Oba tyto pohonné prvky jsou mechanicky propojeny s převodovkou viz *obr. 16*, často prostřednictvím dvou spojek. Tato konstrukce umožňuje několik režimů provozu: výhradně spalovací pohon, čistě elektrický pohon, kombinovaný režim obou zdrojů energie, režim dobíjení baterie spalovacím motorem a regenerativní brzdění. Výhodou tohoto uspořádání je, že výkon spalovacího motoru může být optimalizován pomocí asistence elektromotoru. Elektromotor nejen napomáhá akceleraci, ale slouží i jako generátor pro rekuperaci kinetické energie během brzdění, kterou ukládá do akumulátoru. Typicky se v těchto systémech používá jeden reverzibilní elektrický stroj, jenž funguje jak jako trakční elektromotor, tak jako generátor při zpomalování vozidla. Mezi další výhody paralelního hybridu patří nižší hmotnost a výrobní náklady díky možnosti využití menšího spalovacího motoru a menšího elektromotoru k

dosažení požadovaného výkonu. Například i při dlouhodobém provozu postačuje dimenzovat spalovací motor na maximální trvalý výkon, zatímco elektromotor může mít nižší výkon než v sériové konfiguraci. Na druhé straně jsou s touto architekturou spojena určitá úskalí. Patří mezi ně především složitější řízení toku energie a náročnější konstrukce převodového systému. Optimalizace jízdních režimů a přechodů mezi nimi vyžaduje pokročilé algoritmy řízení, které musí zajišťovat plynulý provoz a minimalizaci emisí při zachování jízdního komfortu a účinnosti. Paralelní konfigurace se ukazuje jako efektivnější než sériová, zejména z hlediska přímého přenosu energie, vyšší celkové účinnosti a snazšího přizpůsobení různým jízdním podmínkám. Výhodou je také možnost integrace do plug-in hybridních systémů, které dále rozšiřují dojezd a zvyšují efektivitu díky externímu nabíjení baterie [51], [52].

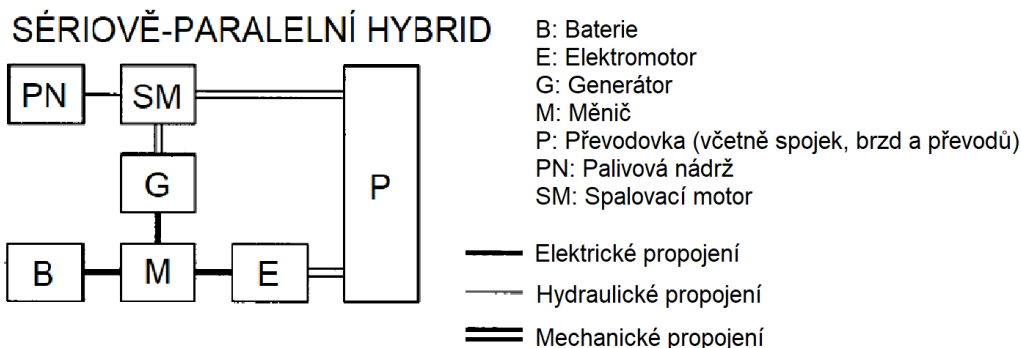


Obr. 16 Schéma paralelního hybridu, upraveno [51]

3.1.3 SÉRIOVĚ-PARALELNÍ USPOŘÁDÁNÍ

Sériově-paralelní hybridní systém představuje kombinaci výhod sériové a paralelní architektury a patří mezi nejuniverzálnější koncepce hybridního pohonu. Umožňuje provoz vozidla buď pouze na spalovací motor, pouze na elektromotor, nebo na jejich kombinaci. Tato flexibilita dovoluje optimalizaci energetického toku podle aktuálních provozních podmínek, stavu nabití baterie či požadavků na výkon a účinnost. Základ systému tvoří spalovací motor napojený na generátor, který může přeměňovat mechanickou energii na elektrickou pro dobíjení trakční baterie nebo napájení elektromotoru. Současně je zde mechanické spojení mezi spalovacím motorem a hnacími koly, které umožňuje přímý přenos výkonu bez nutnosti konverze. Díky tomu může vozidlo přecházet mezi režimem čistě elektrické jízdy, spalovacího pohonu, kombinovaného režimu či rekuperace brzděné energie. Velkou výhodou tohoto uspořádání je schopnost provozovat spalovací motor v optimálním pracovním bodě, nezávisle na momentálním zatížení vozidla. Tím lze dosáhnout vyšší celkové účinnosti systému a nižších emisí. Elektrická energie z generátoru nebo rekuperace je využívána k dobíjení akumulátoru, případně přímo k napájení elektromotoru v trakčním režimu. Na druhé straně je nevýhodou tohoto řešení větší konstrukční a řídicí složitost. Systém vyžaduje generátor a trakční motor – spolu se spalovacím motorem a převodovým ústrojím, což zvyšuje hmotnost i náklady. Přesto díky své provozní variabilitě a schopnosti adaptace na různé jízdní podmínky představuje sériově-paralelní hybrid efektivní kompromis mezi výkonem, spotřebou a emisemi. Tato

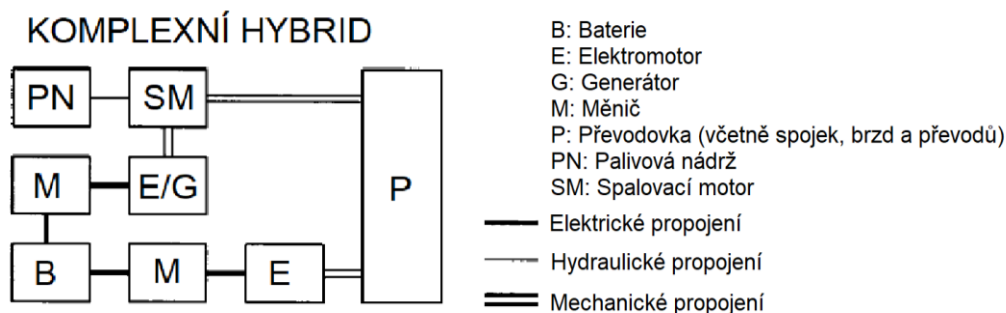
koncepte je proto široce využívána u moderních hybridních vozidel, zejména v segmentech, kde je vyžadována vysoká efektivita bez ztráty jízdního komfortu [51], [52].



Obr. 17 Schéma sériově-paralelního hybridu, upraveno [51]

3.1.4 KOMPLEXNÍ USPOŘÁDÁNÍ

Jak již napovídá samotný název, komplexní hybridní systém představuje pokročilou konfiguraci, kterou nelze jednoznačně zařadit mezi sériový, paralelní ani sériově-paralelní hybridní systém. Jak je patrné z ilustrace *obr. 18*, tento systém se na první pohled podobá sériově-paralelnímu hybridnímu systému, jelikož zahrnuje jak generátor, tak elektromotor. Klíčový rozdíl však spočívá v odlišném toku energie – zatímco u sériově-paralelního hybridního systému generátor přenáší výkon pouze jednosměrně, v komplexním hybridním systému je tok výkonu elektromotoru obousměrný. Tato vlastnost umožňuje širší škálu provozních režimů, včetně režimu se třemi hnacími silami, kde se na pohonu podílí spalovací motor a dva elektromotory. Tuto konfiguraci sériově-paralelní hybridní systém nenabízí. Stejně jako sériově-paralelní uspořádání však i komplexní hybridní systém trpí vyšší konstrukční složitostí a zvýšenými výrobními náklady. Navzdory těmto nevýhodám jej některá moderní hybridní vozidla implementují, zejména v případech, kdy je požadován pohon dvou náprav, což přispívá k lepší trakci a celkové jízdní dynamice [51].



Obr. 18 Schéma komplexního hybridu, upraveno [51]

3.2 ROZDĚLENÍ PODLE TYPU HYBRIDIZACE

Rozdělení podle typu hybridizace vychází z míry spolupráce mezi spalovacím motorem a elektromotorem.

Lze je rozdělit na:

- Micro hybrid
- Mild hybrid
- Full hybrid
- Plug-in hybrid

3.2.1 MICRO HYBRID

Elektromotor napomáhá spalovacímu motoru zejména při rozběhu, čímž přispívá k optimalizaci jeho provozních parametrů. Díky rychlé odezvě elektromotoru umožňují mikrohybridní hybridní elektrická vozidla implementaci funkce start-stop, která automaticky vypíná spalovací motor při zastavení vozidla (např. na semaforu). Výkon elektromotoru je zde od 1,5 kW do 10 kW. Očekávané zlepšení spotřeby paliva v městském provozu se pohybuje v rozmezí 2 až 10 % [52], [53].

3.2.2 MILD HYBRID

Tento systém umožňuje dočasné vypnutí spalovacího motoru při zpomalování, jízdě z kopce nebo zastavení, přičemž jeho opětovné spuštění je velmi rychlé. Mild hybridní systémy dokážou rekuperovat energii při brzdění a částečně podpořit výkon spalovacího motoru, avšak vzhledem k nízkému výkonu elektromotoru, který se obvykle pohybuje v rozmezí 5 až 20 kW, nejsou schopny samostatné jízdy výhradně na elektrický pohon. Mild hybrid přináší omezené úspory paliva přibližně do 15 % při městském provozu a 8 až 10 % v rámci celkového jízdního cyklu [52], [53].

3.2.3 FULL HYBRID

Full-hybridní systém je schopen pohybu výhradně pomocí spalovacího motoru, pouze na elektrickou energii z akumulátorů, nebo prostřednictvím kombinace obou pohonných jednotek. Akumulátor se dobíjí automaticky, a to rekuperací energie při brzdění nebo využitím přebytečné energie ze spalovacího motoru. Je vybaven většími bateriemi a silnějšími elektromotory, které umožňují jízdu na krátké vzdálenosti a při nižších rychlostech čistě na elektřinu. Ve srovnání s mild hybridy jsou tyto vozy dražší, avšak jejich spotřeba paliva je vyšší. [52], [53].

3.2.4 PLUG-IN HYBRID

Plug-in hybridní elektromobil (PHEV) je vybaven akumulátorem, který lze nabíjet jak z externí elektrické sítě prostřednictvím kabelu, tak i během jízdy pomocí spalovacího motoru a vestavěného generátoru. Plug-in hybrid má všechny výhody full-hybridu, a navíc i větší dojezd na samotný elektromotor [53].

Mezi modely tohoto typu patří například Škoda Superb Combi Selection 2024 (viz *obr. 19*), který kombinuje zážehový motor s elektromotorem, což umožňuje efektivní využití paliva a elektrické energie.



Obr. 19 Škoda Superb Combi PHEV 2024 [54]

Kombinovaná spotřeba paliva a elektrické energie tohoto vozu na základě metodiky WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure – Celosvětově harmonizovaný zkušební postup pro lehká vozidla) [54]:

- **Kombinovaná spotřeba paliva (vážená):** 0,4 l/100 km – udává průměrnou spotřebu benzínu při kombinovaném provozu, kdy vozidlo využívá jak elektrický pohon, tak spalovací motor.
- **Kombinovaná spotřeba paliva při vybití baterie:** 5,2 l/100 km – udává spotřebu paliva, když je baterie vybitá a vozidlo je poháněno pouze spalovacím motorem.
- **Kombinovaná spotřeba elektrické energie:** 15,8 kWh/100 km – udává průměrnou spotřebu elektrické energie při kombinovaném provozu

Nicméně data z reálného provozu ukazují, že skutečná spotřeba plug-in hybridních vozidel (PHEV) může tyto laboratorní hodnoty výrazně překračovat. Podle analýzy Mezinárodní rady pro čistou dopravu (International Council on Clean Transportation – ICCT, 2022), která vychází z údajů téměř 9 000 vozidel napříč Evropou, činí průměrná reálná spotřeba paliva 4,0 l/100 km až 4,4 l/100 km u soukromých a 7,6–8,4 l/100 km u firemních vozidel. Tyto hodnoty odpovídají emisím CO₂ v rozsahu 90–105 g/km, respektive 175–195 g/km, což představuje tří – až pětinasobné překročení oficiálních údajů dle WLTP. Klíčovým faktorem tohoto rozdílu je nízký podíl jízdy čistě na elektřinu – v reálném provozu dosahuje pouze 45–49 % u soukromých a 11–15 % u firemních uživatelů, zatímco WLTP metodika předpokládá podíl 70–85 %. Tyto

skutečnosti poukazují na omezenou účinnost technologie PHEV z hlediska úspory paliva a snížení emisí v běžných provozních podmínkách [55].

3.3 TECHNOLOGICKÉ VÝZVY

Hybridní elektrická vozidla, čelí řadě technologických výzev, jejichž překonání je zásadní pro jejich širší implementaci v dopravě. Jednou z klíčových překážek je omezená životnost baterií, způsobená jejich teplotní citlivostí, pomalým nabíjením a degradací při hlubokých cyklech vybití. Perspektivním řešením je využití hybridních akumulacních systémů, které kombinují baterie se superkondenzátory – ty snižují zatížení baterie při špičkových výkonech a tím prodlužují její životnost. Zásadní roli přitom hraje optimalizovaný tepelný management akumulacního systému. Další výzvou je složitost systémů řízení energie, které musí v reálném čase efektivně koordinovat více energetických zdrojů. K tomu se využívají pokročilé řídicí algoritmy a simulační modely, umožňující testování bez nutnosti fyzických prototypů. V oblasti výkonové elektroniky přetrvávají problémy s řízením napětí, ztrátami při přenosu energie a odvodem tepla. Řešení nabízejí moderní DC/DC měniče (např. buck, boost, Ćuk), spolu s optimalizovaným chlazením výkonových komponent. Do budoucna se očekává rostoucí využití umělé inteligence, která umožní prediktivní řízení výkonu a spotřeby energie v reálném čase. Neméně důležitým aspektem je také celková konstrukční optimalizace vozidla, přičemž využití lehkých konstrukčních materiálů a aerodynamických vylepšení představuje efektivní způsob, jak snížit hmotnost jednotlivých komponent a tím zvýšit celkovou energetickou účinnost vozidla [44], [56].

4 KOMBINACE VODÍKOVÉHO SPALOVACÍHO MOTORU S ELEKTROMOTOREM

Zatímco u osobní dopravy se jako hlavní cesta dekarbonizace jeví elektromobilita založená na bateriových elektrických vozidlech, v oblasti těžké dopravy mohou být efektivnější alternativní přístupy. Jedním z nich je kombinace vodíkového spalovacího motoru s elektromotorem, tedy určitá forma hybridního pohonu, která využívá výhody obou technologií. Z čistě technického pohledu se jedná o dynamicky doplňující se systémy – elektromotor poskytuje vysokou účinnost, rekuperaci energie, plynulý rozjezd a lokální bezemisní provoz, zatímco vodíkový spalovací motor nabízí rychlé tankování, vysoký výkon při trvalém zatížení a nezávislost na externí elektrické infrastruktuře. Tento hybridní přístup proto dává zvláštní smysl tam, kde bateriové elektrické pohony narážejí na svá technická nebo provozní omezení – například při přepravě velkých hmotností, dlouhých vzdálenostech nebo v místech bez stabilního přístupu k elektrické síti.

Takové podmínky se typicky vyskytují v oblastech jako je:

- těžká nákladní a autobusová doprava
- železniční doprava

4.1 POROVNÁNÍ VODÍKOVÝCH HYBRIDNÍCH POHONŮ S KONVENČNÍM HYBRIDEM

4.1.1 POROVNÁNÍ ÚČINNOSTI A SPOTŘEBY PALIVA

Pro účely porovnání byly ve zdrojové studii využity simulační modely identického osobního vozidla lehké třídy vybaveného zážehovým motorem FIAT FIRE 1.2 8v, jenž byl uvažován jak ve variantě s konvenčním benzínovým pohonem, tak i ve variantě upravené pro spalování vodíku. V obou případech byl hnací systém koncipován jako sériově-paralelní hybridní uspořádání, které umožňuje dynamické rozdělení výkonu mezi spalovací motor a elektromotor v závislosti na aktuálním jízdním režimu. U vodíkového spalovacího motoru byly zohledněny dvě varianty přeplňování: VCSC (Volumetric Compressor Supercharging), tedy mechanicky poháněný objemový kompresor, a TC (Turbocharging), čili přeplňování výfukovým turbodmychadlem [57].

Tab. 2 Průměrná účinnost motoru (BTE) – konvenční vs. hybridní vozidla [57]

Konfigurace pohonu	Průměrná účinnost (BTE)	Relativní rozdíl oproti benzínu
Benzínový motor (konvenční)	0,211	-
Benzínový motor (HEV)	0,245	+15,9 %
Vodíkový motor VCSC (HEV)	0,266	+8,6 % vůči benzín HEV
Vodíkový motor TC (HEV)	0,286	+16,7 % vůči benzín HEV

Vodíkový spalovací motor vykazuje v porovnání s konvenčním benzínovým motorem vyšší termodynamickou účinnost viz *tab. 2*. Tento rozdíl je dán specifickými vlastnostmi vodíku – zejména chudým spalováním ($\lambda \approx 2$) a rychlým šířením plamene. Hybridizace navíc umožňuje provoz motoru v oblastech maximální účinnosti [57].

Tab. 3 Spotřeba energie a paliva ve WLTC cyklu [57]

Konfigurace pohonu	Spotřeba energie [kJ]	Změna oproti benzín HEV	Spotřeba paliva [kg]
Benzínový motor (konvenční)	50,731	+18,0 %	1,153
Benzínový motor (HEV)	42,930	0	0,976
Vodíkový motor VCSC (HEV)	38,749	-9,7 %	0,323
Vodíkový motor TC (HEV)	36,430	-15,1 %	0,304

Výsledky simulací provedených dle standardizovaného jízdního cyklu WLTC (23,262 km) prokázaly, že hybridní vozidla vybavená vodíkovým spalovacím motorem vykazují nižší celkovou energetickou spotřebu a výrazně nižší hmotnostní spotřebu paliva než srovnatelná vozidla s benzínovým pohonem viz *tab. 3*. Konkrétně hybridní konfigurace s přepínaným vodíkovým motorem s TC dosáhla spotřeby energie na úrovni 36,430 kJ, zatímco benzínový hybrid vykazoval spotřebu 42,930 kJ, což představuje snížení o více než 15 %. Hmotnostní spotřeba vodíku činila přibližně 0,30 kg oproti 0,98 kg benzínu u benzínového hybridu, tedy

přibližně třetinové množství paliva [57]. Tento rozdíl je podmíněn jak vyšší výhřevností vodíku [23], tak efektivnějším provozním režimem spalovacího motoru v hybridní konfiguraci, který umožňuje častější využití oblastí s vyšší termodynamickou účinností [57]. Další nezávislá simulační studie zaměřená na mild hybridní pohon s přepínaným vodíkovým spalovacím motorem potvrdila vysokou provozní účinnost a nízkou spotřebu paliva. Elektrický generátor typu BSG (řemenem poháněný startér-generátor) s výkonem 5 kW byl napájen z 48V baterie (10 Ah) a zajišťoval funkce jako rekuperace, start-stop a podpora akcelerace. Simulace pokrývaly více kategorií vozidel, včetně C-segmentu a lehkých dodávek, a vycházely z jednoválcového výzkumného motoru odpovídajícího čtyřválcí o objemu 1,5 l. Pro model střední třídy byla ve WLTC cyklu stanovena průměrná spotřeba vodíku 1,1 kg/100 km a maximální účinnost motoru 42 %. Oproti starším vodíkovým vozům (např. Ford H₂RV, BMW Hydrogen 7) vykazoval systém o 25–40 % nižší spotřebu, což odráží pokrok v oblasti spalovacích strategií (např. chudé směsi $\lambda > 2,5$), přepínání a řízení točivého momentu. Navzdory absenci čistě elektrického režimu se mild hybridní řešení ukázalo jako účinný způsob zvýšení efektivity bez zásadních konstrukčních změn či výrazného navýšení hmotnosti [58].

4.1.2 EKONOMICKÉ A EKOLOGICKÉ ZHODNOCENÍ

Z porovnání spotřeby paliva jednotlivých pohonných jednotek viz *tab. 3*, přepočtené na 100 km na základě původní vzdálenosti WLTC cyklu (23,262 km) [57], vyplývá, že vodíkový hybridní systém s přepínaným spalovacím motorem (TC HEV) může být v určitých případech ekonomicky výhodnější než konvenční benzínové systémy viz *tab. 4*. Výsledná efektivita však závisí na konkrétním typu a způsobu výroby použitého vodíku.

Tab. 4 Náklady na 100 km v Kč u vybraných pohonných jednotek [57], [59]

Konfigurace	Typ výroby vodíku	Cena paliva (Kč/kg)	Spotřeba (kg/100 km)	Náklady (Kč/100 km)
Vodíkový motor TC (HEV)	PEM elektrolýza	241,0	1,3	313,3
Vodíkový motor TC (HEV)	Parciální oxidace	202,0	1,3	262,6
Vodíkový motor TC (HEV)	Parní reforming	149,0	1,3	193,7
Benzínový motor (konvenční)	-	50,8	5,0	254,0
Benzínový motor (HEV)	-	50,8	4,2	213,4

Poznámka: Průměrná cena benzínu byla vypočtena jako aritmetický průměr maloobchodních cen ve 26 evropských zemích na základě údajů Evropské komise (EU Weekly Oil Bulletin) ke dni 12. května 2025 [60]. Výsledná průměrná cena činí 38,1 Kč/l, což odpovídá přibližně 50,8 Kč/kg při uvažované hustotě benzínu 0,75 kg/l.

Z porovnání spotřeby paliva jednotlivých pohonných jednotek viz *tab. 3*, přepočtené na 100 km na základě původní vzdálenosti WLTC cyklu (23,262 km) [57], vyplývá, že vodíkový hybridní systém s přepřínovaným spalovacím motorem (TC HEV) může být v určitých případech ekonomicky výhodnější než konvenční benzínové systémy viz *tab. 4*. Výsledná efektivita však závisí na konkrétním typu a způsobu výroby použitého vodíku.

Z ekonomického hlediska vychází nejvýhodněji využití vodíku vyrobeného parním reformingem, kdy náklady činí 193,7 Kč/100 km (při ceně 149,0 Kč/kg a spotřebě 1,3 kg/100 km). To je méně než u konvenčního benzínového motoru (254,0 Kč/100 km) i benzínového hybridu (213,4 Kč/100 km). Vodík z parciální oxidace přináší náklady 262,6 Kč/100 km, tedy na srovnatelné úrovni s tradičními fosilními palivy. Naopak použití vodíku vyrobeného pomocí PEM elektrolýzy, který je v současnosti nejdražší (241,0 Kč/kg), zvyšuje náklady až na 313,3 Kč/100 km, což je nejvíce ze všech posuzovaných variant. Z pohledu koncového uživatele je tedy ekonomická konkurenceschopnost vodíkového pohonu výrazně závislá na způsobu výroby a ceně paliva.

Z ekologického hlediska je však situace opačná: největší přínos přináší právě zelený vodík, tedy vodík vyrobený elektrolýzou vody s využitím obnovitelných zdrojů energie. Při jeho využití lze dosáhnout téměř bezemisního cyklu – jak při výrobě paliva [5], tak při jeho spalování ve vozidle, kde vzniká převážně vodní pára [21]. Oproti tomu benzínový hybrid, byť úspornější než konvenční spalovací motor, stále produkuje emise CO₂ v závislosti na jízdním stylu a konkrétním modelu [55]. I když jsou náklady na zelený vodík v současnosti vyšší, představuje tento scénář nejšetrnější variantu z pohledu ochrany klimatu a ovzduší. Oproti tomu reformovaný vodík sice nabízí nižší provozní náklady, ale jeho výroba stále zahrnuje fosilní vstupy a emisní zátěž [5], [6].

Závěrem lze říci, že vodíkový hybridní pohon může být buď ekonomicky výhodný, nebo ekologicky extrémně čistý – podle zvoleného zdroje vodíku. V budoucnosti, s poklesem ceny zeleného vodíku a rozvojem infrastruktury, lze očekávat sblížení obou přístupů a širší uplatnění této technologie v osobní i nákladní dopravě.

4.1.3 VLIV HYBRIDIZACE NA EMISE NO_x A SPOTŘEBU VODÍKU

Pouhá přítomnost vodíkového spalovacího motoru nezaručuje minimální emise NO_x – zejména při vyšším zatížení již nelze udržet chudé spalování. Hybridizace však umožňuje provoz motoru v optimálních režimech, a tím dosahovat výrazně nižších emisí NO_x.

Na základě simulačních modelů bylo zjištěno, že sériově-paralelní hybridní struktura, která kombinuje výhody paralelního a sériového uspořádání, umožňuje dosáhnout snížení emisí oxidů dusíku o více než 90 % a současně redukce spotřeby vodíku o více než 16 % viz *tab. 5* ve srovnání s nehybridním vodíkovým spalovacím motorem při jízdním cyklu WLTC [61].

Tab. 5 Srovnání hybridních uspořádání H₂-HEV (WLTC cyklus) [61]

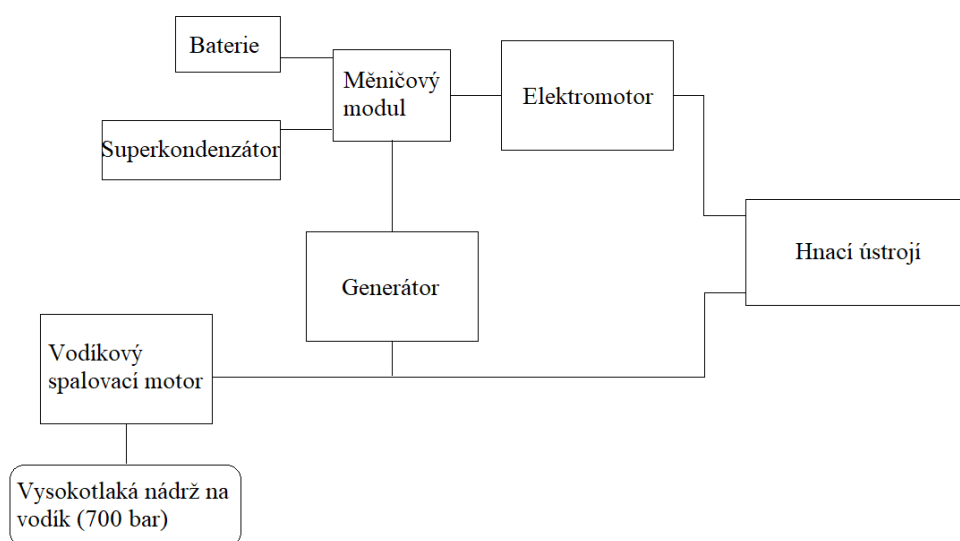
Typ hybridu	NO _x snížení	Úspora vodíku
Sériově-paralelní H ₂ -HEV	>90 %	>16 %
Sériový H ₂ -HEV	~80–85 %	~13–14 %
Paralelní H ₂ -HEV	~65–70 %	~10–12 %

4.2 NÁVRH KONCEPCE

V této části je představena technická koncepce hybridního pohonného systému pro aplikace v těžké silniční a železniční dopravě, přičemž návrhy vycházejí z požadavků na vysokou energetickou účinnost, provozní flexibilitu a snížení emisní zátěže. Systém je navržen tak, aby využíval výhody diskutované v předchozích kapitolách, zejména v oblasti optimalizace spotřeby paliva, prodloužení životnosti akumulčních prvků a efektivního využití rekuperace.

4.2.1 TECHNICKÝ NÁVRH HYBRIDNÍHO SYSTÉMU PRO TĚŽKOU SILNIČNÍ DOPRAVU

Navržený hybridní systém vychází ze sériově-paralelní konfigurace viz *obr. 20*, která umožňuje adaptivní řízení rozdělení výkonu mezi spalovací a elektrickou pohonnou jednotku v závislosti na aktuálních provozních podmínkách. Toto uspořádání maximalizuje účinnost systému tím, že udržuje spalovací motor v optimálních pracovních režimech, zatímco elektromotor pokrývá provoz při nízké zátěži, rozjezdech nebo rekuperaci.



Obr. 20 Koncept sériově-paralelního uspořádání

Elektromotor je koncipován jako synchronní stroj s permanentními magnety, který díky své vysoké účinnosti a okamžitému náběhu točivého momentu přispívá k vysoké provozní dynamice.

Systém akumulace elektrické energie využívá kombinaci lithium-iontové baterie (např. typu NMC nebo LFP) a superkondenzátoru. Tato hybridní konfigurace umožňuje efektivní pokrytí jak dlouhodobé energetické potřeby (baterie), tak krátkodobých špičkových výkonů při akceleraci nebo rekuperaci (superkondenzátor), přičemž výrazně snižuje tepelnou zátěž a degradační procesy bateriových článků.

Pro aktuální návrh je zvoleno skladování vodíku ve formě stlačeného plynu při tlaku 700 bar, což odpovídá současným možnostem z hlediska technologické vyspělosti, dostupnosti komponent a existující infrastruktury. Tlakové zásobníky na tuto úroveň tlaku představují standardizované řešení, které je ověřeno v provozu a kompatibilní se stávajícími plnicími systémy.

Tlakové zásobníky typu IV představují nejvhodnější variantu – kombinují nízkou hmotnost, vysokou gravimetrickou kapacitu a odolnost vůči vodíkové křehkosti. Přestože jsou jejich výrobní náklady vyšší, jejich technické výhody převažují a činí z nich preferované řešení pro těžkou silniční dopravu.

Z pohledu dlouhodobého technického rozvoje však zůstává relevantní i varianta kryokompresního skladování, jež byla rozebrána v předchozí kapitole. Tato technologie by mohla v budoucnu přinést další zvýšení energetické hustoty a prodloužení dojezdu vozidla, zejména v případech, kde bude dostupná odpovídající infrastruktura.

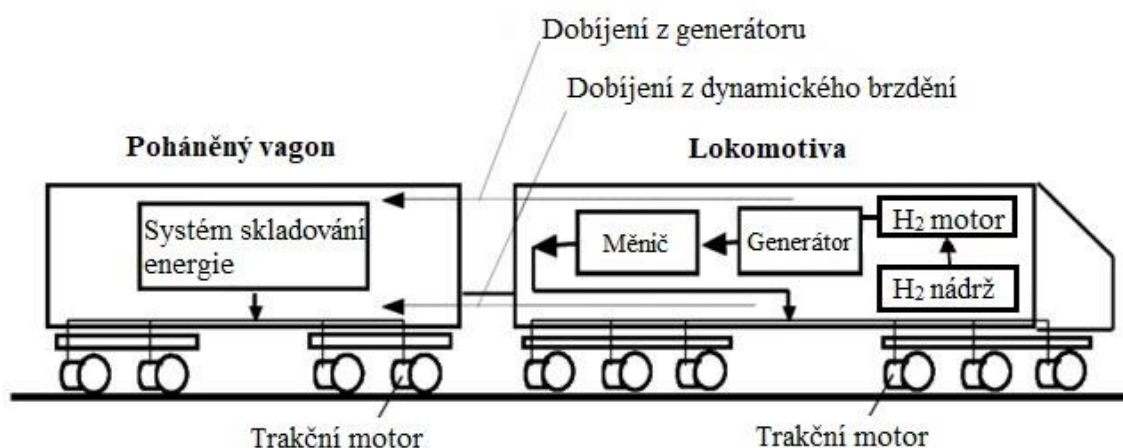
V praktickém provozu je systém navržen tak, aby umožňoval inteligentní řízení jednotlivých režimů podle provozních podmínek. Například v případě nákladního vozidla je možné, aby do rychlosti přibližně 50 km/h fungovalo vozidlo výhradně v elektrickém režimu, využívajíc energii z baterie a superkondenzátoru. Při poklesu stavu nabití baterie pod stanovenou mez (např. 30 %) se automaticky aktivuje spalovací motor, který začne dobíjet akumulátory a případně přispívá k trakčnímu výkonu.

V rychlostním rozmezí 50–80 km/h pracuje systém v hybridním režimu, kdy se výkon adaptivně rozděluje mezi spalovací motor a elektromotor v závislosti na aktuální zátěži, stavu nabití baterie a dalších provozních parametrech. Elektromotor zde slouží k podpoře dynamiky při akceleraci nebo změnách zatížení, zatímco spalovací motor zajišťuje většinu energie potřebné pro trvalý pohon a současné dobíjení akumulátorů.

Při rychlostech nad 80 km/h, tedy v tzv. dálničním režimu, je vodíkový spalovací motor trvale aktivní a slouží jako hlavní zdroj trakčního výkonu, protože při konstantní rychlosti může pracovat v optimálním režimu s nejvyšší účinností. Elektromotor v tomto režimu zůstává k dispozici jako podpůrná jednotka, která se automaticky zapojuje při nárazovém zvýšení výkonových požadavků, například při předjíždění, jízdě do stoupání nebo krátkodobé akceleraci. Takové řízení umožňuje udržet spotřebu paliva na minimu a současně zajistit dostatečnou dynamiku i v náročnějších jízdních situacích.

4.2.2 TECHNICKÝ NÁVRH HYBRIDNÍHO SYSTÉMU PRO ŽELEZNIČNÍ DOPRAVU

Zatímco návrh silničního hybridního systému vychází ze sériově-paralelní konfigurace, v případě železniční dopravy se jako vhodnější ukazuje čistě sériová konfigurace pohonu viz *obr. 21*. Ta se vyznačuje jednoznačným tokem energie [51]: spalovací motor neslouží k přímému mechanickému pohonu kol, ale výhradně k výrobě elektřiny, která je využívána k napájení trakčních elektromotorů nebo k dobíjení bateriového úložiště. Trakční elektromotory jsou umístěny přímo na hnacích nápravách a převádějí elektrickou energii na mechanický pohyb bez potřeby převodového ústrojí.



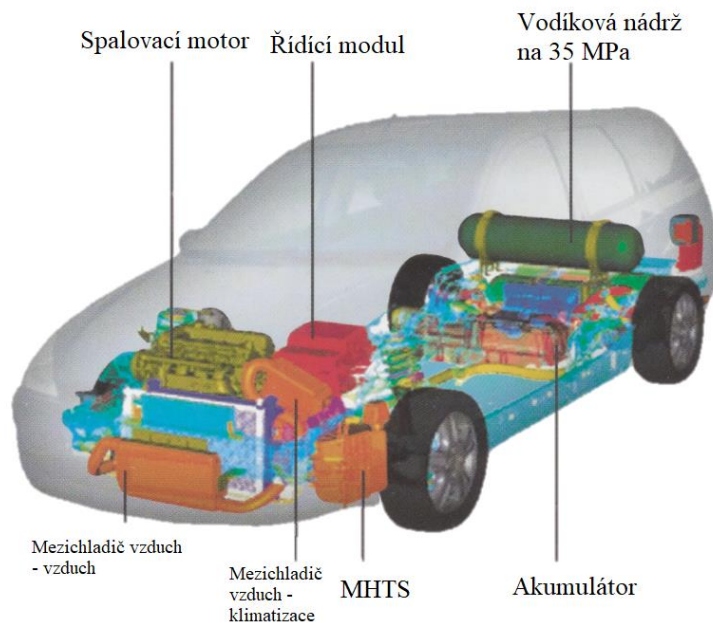
Obr. 21 Koncept hybridního pohonu vlaku, upraveno [62]

Souprava je koncipována pro provoz jak na elektrifikovaných, tak na neelektrifikovaných tratích. V elektrifikovaných úsecích využívá primárně trakční napájení z trolejového vedení, přičemž současně dochází k dobíjení baterií. V oblastech bez trakční infrastruktury spalovací motor spolupracuje s bateriovým úložištěm. Z hlediska řízení tohoto hybridního provozu existují dvě varianty: buď se spalovací motor spouští až po vybití baterie, nebo – jak je zvoleno v tomto konceptu – provoz s trvale běžícím vodíkovým spalovacím motorem, jehož konstantní otáčky umožňují provoz v optimálním účinnostním režimu. To zvyšuje efektivitu využití paliva, snižuje mechanické opotřebení a zajišťuje stabilní energetický tok pro trakci. Bateriový systém zde plní podpůrnou roli – vyrovnává výkonové špičky a ukládá rekuperovanou energii, což umožňuje jeho dimenzování na nižší kapacitu a snižuje celkové provozní náklady. Tato varianta je provozně výhodnější zejména pro dlouhé neelektrifikované úseky, regionální tratě a nákladní dopravu s vysokým a trvalým zatížením, kde stabilní chod motoru zajišťuje plynulý výkon, nižší spotřebu paliva a delší životnost akumulátorů díky omezení hlubokých vybíjecích cyklů. Princip sériového hybridního pohonu je v železničním prostředí dlouhodobě využíván v konvenčních diesel-elektrických lokomotivách, které tvoří páteř neelektrifikované nákladní a regionální osobní dopravy. Nahrazením vznětového agregátu vodíkovým spalovacím motorem lze bez zásadních změn stávající trakční architektury výrazně snížit uhlíkovou stopu těchto systémů. Díky tomu je vodíkový sériový hybrid jednou z klíčových technologií pro postupnou, ale efektivní dekarbonizaci železniční dopravy v místech, kde je elektrifikace ekonomicky či technicky neproveditelná [63], [64].

4.3 HISTORICKÉ PŘÍKLADY HYBRIDNÍCH SYSTÉMŮ S VODÍKOVÝM SPALOVACÍM MOTOREM

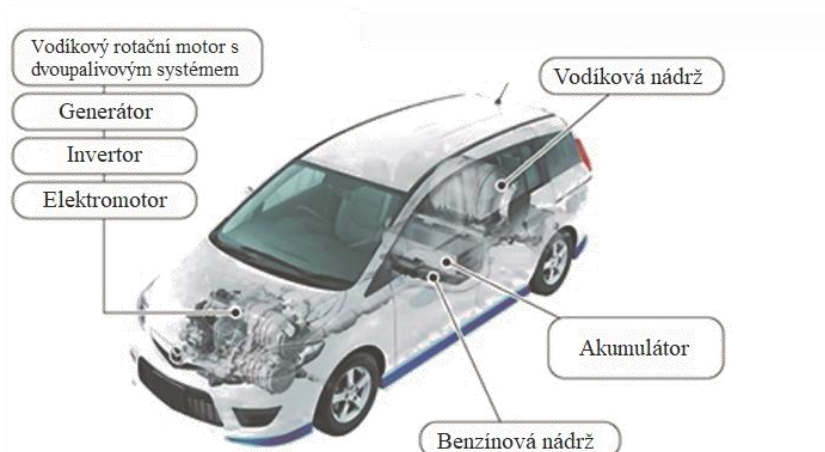
V této podkapitole jsou uvedeny vybrané příklady raných aplikací hybridního pohonu kombinujícího vodíkový spalovací motor a elektromotor, které slouží jako důležitá technologická reference pro současné vývojové směry v oblasti nízkoemisních pohonných systémů. Přestože se jednalo o experimentální nebo předprodukční modely, tyto projekty představovaly významné kroky směrem k využití vodíku v mobilitě v době, kdy byla infrastruktura pro jeho výrobu a distribuci teprve v počátcích.

Jedním z příkladů je hybridní vozidlo s přepínaným čtyřválcovým spalovacím motorem o objemu 2,3 litru, jehož výkon dosahoval 82 kW při 4500 ot./min. Tento systém byl doplněn o elektromotor s výkonem 24,6 kW, který plnil především funkci asistenčního pohonu, zejména při akceleraci. Vozidlo dosahovalo akcelerace z 0 na 100 km/h za 11 s a jeho spotřeba činila přibližně 1,39 kg vodíku na 100 km, což odpovídá přibližně 5,2 l/100 km v přepočtu na benzínový ekvivalent. Celkový dojezd byl limitován na 200 km, což však v kontextu tehdejších možností představovalo technicky hodnotný výsledek [65], [66].



Obr. 22 Ford H₂RV [65]

Dalším pozoruhodným příkladem je model Mazda Premacy Hydrogen RE Hybrid, poprvé představený v roce 2005 a následně technicky vylepšený v roce 2007. Tento systém využíval dvoupalivový dvourotorový Wankelův motor RENESIS o objemu 1,3 litru, který umožňoval plynulé přepínání mezi vodíkovým a benzínovým režimem v závislosti na dostupnosti paliva. Výkon hybridního systému dosahoval až 110 kW, tedy přibližně o 40 % více než u dřívějšího konceptu Mazda RX-8 Hydrogen RE, a celkový dojezd byl téměř dvojnásobný oproti předchozím verzím [67], [68].



Obr. 23 Konceptní uspořádání vozu Mazda Premacy Hydrogen RE Hybrid [68]

Energie produkovaná spalovacím motorem byla prostřednictvím invertoru přeměňována na elektrickou energii a následně přenášena do trakčního elektromotoru, který přes redukční převodovku poháněl přední nápravu. Součástí systému byla rovněž lithium-iontová baterie, která sloužila k rekuperaci energie při brzdění a zajišťovala krátkodobou podporu výkonu zejména při akceleraci. Hybridní konfigurace umožňovala efektivní využití obou zdrojů energie při různých provozních režimech [67], [68].

V roce 2009 byl v Japonsku zahájen omezený pronájem tohoto modelu vybraným koncovým uživatelům, čímž se Mazda Premacy Hydrogen RE Hybrid stal jedním z prvních veřejně provozovaných vozidel využívajících rotační vodíkový spalovací motor v kombinaci s elektrickým pohonem. Ačkoli se tento koncept nedočkal sériové výroby, představoval technologicky vyspělý hybridní systém s důrazem na flexibilitu paliv, energetickou rekuperaci a elektrifikaci trakce – atributy, které zůstávají stěžejní i v moderním vývoji nízkoemisních pohonů [67], [68].

SHRNUTÍ

Simulační analýzy hybridních vozidel vybavených vodíkovým spalovacím motorem ukazují, že tato technologie představuje efektivní a environmentálně příznivou alternativu ke klasickým spalovacím systémům. Vodíkový motor vykazuje vyšší termodynamickou účinnost než konvenční benzínový agregát, a to především díky schopnosti spalování velmi chudých směsí ($\lambda \approx 2$) a rychlému šíření plamene. Tyto vlastnosti umožňují účinnější konverzi energie, zejména při hybridním provozu, který motor udržuje v optimálních pracovních režimech.

Porovnání bylo provedeno na identickém modelu osobního vozidla lehké třídy osazeném motorem FIAT FIRE 1.2 8v ve variantách s benzínovým a vodíkovým palivem. V obou případech byla použita sériově-paralelní hybridní konfigurace, která umožňuje dynamické rozdělení točivého momentu mezi spalovací motor a elektromotor. U vodíkového motoru byly uvažovány dvě varianty přepínání: mechanický objemový kompresor (VCSC) a turbodmychadlo (TC). Výsledky simulací dle WLTC ukázaly, že vodíkový hybrid s

turbodmychadlem dosáhl průměrné účinnosti 0,286 (tj. +16,7 % oproti benzínovému HEV) a současně nejnižší spotřeby energie (36 430 kJ/100 km) i hmotnostní spotřeby paliva (0,304 kg/100 km). To představuje přibližně třetinovou hmotnost paliva oproti benzínové variantě, což je dáno jednak vyšší výhřevností vodíku, jednak efektivnějším provozem spalovacího motoru v hybridní konfiguraci.

Z porovnání spotřeby paliva a vypočtených nákladů podle *tab. 4* vyplývá, že vodíkový hybridní pohon může být buď ekonomicky výhodný, nebo ekologicky mimořádně čistý – v závislosti na zvoleném zdroji vodíku.

Při použití vodíku z parního reformingu činí náklady na 100 km 193,7 Kč, což je méně než u konvenčního benzínového motoru (254,0 Kč) i benzínového hybridu (213,4 Kč). Vodík z parciální oxidace vychází s náklady 262,6 Kč/100 km na úrovni tradičních paliv. Naopak nejdražší variantou je zelený vodík z PEM elektrolýzy, jehož výroba je výrazně energeticky náročnější – výsledné náklady činí 313,3 Kč/100 km. Tyto hodnoty vycházejí ze simulačního modelu, v němž byly náklady vztaženy ke specifické spotřebě paliva udávané danou studií.

Z ekologického hlediska však právě tato varianta přináší největší přínos – výroba zeleného vodíku s využitím obnovitelných zdrojů a jeho spalování bez emisí CO₂ umožňuje téměř bezemisní provoz. Naproti tomu levnější vodík z reformingu je spojen s emisemi vznikajícími při výrobě z fosilních zdrojů.

Všechny hodnoty byly přepočteny na 100 km na základě simulace jízdy podle standardizovaného WLTC cyklu, který reprezentuje kombinovaný městský a dálniční provoz. Výsledky rovněž potvrdily, že vhodná hybridní struktura může výrazně snížit produkci NO_x – až o více než 90 % oproti nehybridnímu provozu.

Druhá zdrojová studie se zaměřila na mild hybridní uspořádání, které představuje jednodušší a nákladově příznivější řešení. V této konfiguraci byl použit řemenový startér-generátor (BSG) o výkonu 5 kW, napájený z 48V baterie o kapacitě 10 Ah. Tento systém plní podpůrné funkce, jako je rekuperace, start-stop a asistence při akceleraci, avšak neumožňuje čistě elektrický pohon. I přes svou jednoduchost prokázala tato struktura vysokou provozní účinnost (až 42 %) a nízkou spotřebu vodíku (1,1 kg/100 km). V porovnání s dřívějšími H₂ICE systémy, jako byly Ford H2RV či BMW Hydrogen 7, byla spotřeba vodíku snížena o 25–40 %.

Navržený hybridní pohon pro silniční dopravu využívá sériově-paralelní konfiguraci, která umožňuje efektivní rozdělení výkonu mezi vodíkový spalovací motor a elektromotor. Kombinace lithium-iontové baterie a superkondenzátoru zajišťuje efektivní ukládání energie a zvyšuje životnost systému. Vodík je skladován při tlaku 700 bar. Díky více provozním režimům a inteligentnímu řízení systém dosahuje vysoké účinnosti a provozní flexibility.

V železniční aplikaci je navržena čistě sériová struktura, kde vodíkový motor pohání generátor elektrické energie pro trakční pohon. Řešení využívá osvědčený princip diesel-elektrických lokomotiv, který je snadno přizpůsobitelný na vodíkový pohon bez zásadních změn v konstrukci. Výhodou je výrazné snížení emisí a možnost nasazení v neelektrifikovaných oblastech.

Závěrem lze konstatovat, že hybridní pohon založený na vodíkovém spalovacím motoru – ať už v podobě plnohodnotné sériově-paralelního uspořádání, nebo zjednodušeného

mild hybridního systému — představuje technicky proveditelnou, energeticky efektivní a ekologicky šetrnou alternativu k tradičním pohonným jednotkám. Díky snadné integraci do stávajících automobilových platforem a využití dostupných komponent nabízí tyto koncepty reálnou cestu k dosažení nízkoemisní mobility v silniční dopravě.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo prozkoumat principy fungování vodíkových spalovacích motorů a elektromotorů, zhodnotit jejich přednosti a nedostatky v dopravním kontextu, a posoudit možnosti jejich kombinace v hybridních pohonných jednotkách z technického, ekologického i ekonomického hlediska. Na základě rešerše současné literatury, dostupných výzkumných studií a existujících technických řešení lze formulovat následující závěry.

Vodíkové spalovací motory se jeví jako perspektivní nástroj pro dekarbonizaci dopravního sektoru, zejména tam, kde jsou vozidla dlouhodobě provozována při vysoké zátěži – typicky v silniční nákladní nebo železniční dopravě. Ve srovnání s palivovými články nabízejí vyšší účinnost právě při větší zátěži, nižší nároky na čistotu paliva a konstrukčně jednodušší řešení. Spalování vodíku nezpůsobuje emise CO₂, přesto je třeba řešit tvorbu oxidů dusíku (NO_x), které lze výrazně omezit pomocí technologií jako recirkulace výfukových plynů, úprava směsi, pozdní časování zapalování nebo vstřikování vody.

Elektromotory vynikají svou efektivitou a provozní nenáročností, což z nich činí ideální volbu pro městskou či příměstskou mobilitu. Nabízejí tichý provoz, lokální bezemisnost a možnost rekuperace brzděné energie. Limitujícími faktory však zůstávají omezený dojezd, delší doba nabíjení a závislost na infrastruktuře, což snižuje jejich vhodnost pro dálkové a těžké aplikace.

Hybridní systémy propojující vodíkový motor a elektromotor se ukazují jako proveditelné a nadějně řešení. Zvláště sériově-paralelní struktura umožňuje efektivní rozdělení výkonu mezi oba pohonné zdroje a zajišťuje chod spalovacího motoru v režimu optimální účinnosti. Tato kombinace spojuje výhody obou technologií – schopnost zvládat zátěž při vyšších výkonech a úsporný elektrický pohon při částečném zatížení. Výzkumy potvrzují snížení spotřeby vodíku a emisí NO_x při zachování vysoké provozní adaptability. Ve srovnání s benzínovým hybridem přináší vodíkový systém vyšší účinnost a nižší hmotnostní spotřebu paliva, a zároveň eliminuje uhlíkové emise během provozu.

Z provedené analýzy provozních nákladů vyplývá, že hospodárnost vodíkového pohonu je úzce závislá na způsobu výroby vodíku. Nejvýhodněji vychází palivo vyrobené parním reformingem, které snižuje provozní náklady o 31,1 % oproti konvenčnímu benzínovému motoru a o 10,2 % ve srovnání s benzínovým hybridem. Vodík získávaný parciální oxidací je z hlediska nákladů na 100 km o 35,5 % dražší než reformovaný vodík a zůstává tak na úrovni tradičních fosilních paliv. Naopak zelený vodík vyráběný elektrolyzou je v současnosti nejdražší variantou, s provozními náklady o 23,4 % vyššími než u konvenčního benzínového motoru, o 46,9 % vyššími než u benzínového hybridu a o 61,7 % vyššími oproti vodíku z reformingu. Všechny tyto hodnoty byly stanoveny na základě simulačního modelu, který vycházel ze specifické spotřeby paliva definované ve zdrojové studii, a vztahují se tedy ke konkrétním provozním podmínkám modelového scénáře. Z environmentálního pohledu však zelený vodík nabízí největší přínos – jeho výroba a využití mohou být zcela bezemisní, což z něj činí klíčový nástroj pro dosažení klimatických cílů. Do budoucna se však s rozvojem výroby, poklesem cen obnovitelné elektřiny a zvyšující se efektivitou elektrolyzérů očekává postupné snižování nákladů na zelený vodík. V kombinaci s rostoucí dostupností infrastruktury by se tak tato technologie mohla stát nejen ekologicky, ale i ekonomicky konkurenceschopnou alternativou k tradičním fosilním palivům.

Z pohledu technického řešení byl navržen sériově-paralelní hybridní pohonný systém kombinující vodíkový spalovací motor a synchronní elektromotor s permanentními magnety. Pro akumulaci energie je uvažováno duální úložiště tvořené lithium-iontovou baterií a superkondenzátorem, které společně zajišťují jak dlouhodobou stabilní dodávku energie, tak pokrytí krátkodobých výkonových špiček při akceleraci nebo rekuperaci. Toto uspořádání přispívá k vyšší celkové účinnosti, prodlužuje životnost baterie a snižuje ztráty v energetickém cyklu.

Vodík je v návrhu skladován v tlakových nádobách typu IV ve formě stlačeného plynu při tlaku 700 bar, což odpovídá současným technologickým standardům i infrastrukturním možnostem. Z dlouhodobého hlediska se jako perspektivní alternativa jeví kryokompresní technologie, která umožňuje zvýšení energetické hustoty a tím i prodloužení dojezdu bez navýšení hmotnosti zásobníků.

Pro aplikaci v železniční dopravě je navržen pohon s čistě sériovou strukturou, kde vodíkový spalovací motor slouží k pohonu generátoru vyrábějícího elektrickou energii pro trakční elektromotory a dobíjení akumulčního systému. Tento koncept je technicky kompatibilní se současnými diesel-elektrickými jednotkami a umožňuje ekologickou přestavbu bez nutnosti zásadních změn v konstrukci. Zajišťuje stabilní výkon pro těžké vlakové soupravy i v neelektrifikovaných úsecích, přičemž významně snižuje lokální emise.

Na základě shromážděných poznatků lze uzavřít, že hybridní pohonné jednotky založené na vodíkovém spalování a elektrickém pohonu představují technologicky uskutečnitelnou, provozně flexibilní a environmentálně udržitelnou alternativu ke klasickým spalovacím motorům.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] EVROPSKÁ RADA. *Fit for 55 (online)*. Brusel: Evropská rada, 2021 [cit. 2025-04-05]. Dostupné z: <https://www.consilium.europa.eu/cs/policies/fit-for-55/#what>
- [2] MINISTERSTVO PRŮMYSLU A OBCHODU ČR. *Vodíková strategie ČR – aktualizace 2024 (online)*. Praha: Ministerstvo průmyslu a obchodu, 2024 [cit. 2025-03-29]. Dostupné z: <https://mpo.gov.cz/assets/cz/prumysl/strategicke-projekty/2024/7/Vodikova-strategie-CR-aktualizace-2024.pdf>
- [3] STAN, Cornel. *Alternative Propulsion for Automobiles (online)*. 1. vyd. Cham: Springer, 2017. ISBN 978-3-319-31930-8. [cit. 2025-02-16]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-31930-8>
- [4] TEKKAYA, D. a YÜRÜM, Y. Mesoporous MCM-41 material for hydrogen storage: A short review. *International Journal of Hydrogen Energy (online)*. 2016, roč. 41. [cit. 2025-03-22]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.050>
- [5] KOTHARI, R., BUDDHI, D. a SAWHNEY, R. L. Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews (online)*. 2008, roč. 12, č. 2, s. 553–563. [cit. 2025-04-11]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.07.012>
- [6] USTOLIN, Federico, CAMPARI, Alessandro a TACCANI, Rodolfo. An Extensive Review of Liquid Hydrogen in Transportation with Focus on the Maritime Sector. *Journal of Marine Science and Engineering (online)*. 2022, roč. 10, č. 9, čl. 1222. ISSN 2077-1312. [cit. 2025-04-16]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/jmse10091222>
- [7] KOŁODZIEJSKI, Marcin. Review of hydrogen-based propulsion systems in the maritime sector. *Archives of Thermodynamics (online)*. 2023, roč. 44, č. 4, s. 335–380. [cit. 2025-02-16]. Dostupné z: <https://doi.org/10.24425/ather.2023.149728>
- [8] LBST GmbH. *17th Annual assessment of H2stations.org by LBST (online)*. 11. února 2025 [cit. 2025-03-09]. Dostupné z: <https://www.h2stations.org/press-release-2025-milestone-reached-over-1000-hydrogen-refuelling-stations-in-operation-worldwide-in-2024/>
- [9] ČISTÁ DOPRAVA. *Mapa vodíkových stanic v ČR (online)*. 2024 [cit. 2025-03-29]. Dostupné z: <https://www.cistadoprava.cz/mapy/h2/>
- [10] UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. *Physical Hydrogen Storage (online)*. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/physical-hydrogen-storage>
- [11] DURBIN, D. J. a MALARDIER-JUGROOT, C. Review of hydrogen storage techniques for on board vehicle applications. *International Journal of Hydrogen Energy (online)*. 2013, roč. 38, č. 34, s. 14595–14617. [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.07.058>

- [12] MAGLIANO, Alfonso, Carlos PEREZ CARRERA, Carmine Maria PAPPALARDO, Domenico GUIDA a Valentino Paolo BERARDI. A Comprehensive Literature Review on Hydrogen Tanks: Storage, Safety, and Structural Integrity. *Applied Sciences (online)*. 2024, 14(20), 9348 [cit. 2025-05-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app14209348>
- [13] AHLUWALIA, R. K., HUA, T. Q., PENG, J.-K., LASHER, S., MCKENNEY, K., SINHA, J. a GARDINER, M. Technical assessment of cryo-compressed hydrogen storage tank systems for automotive applications. *International Journal of Hydrogen Energy (online)*. 2010, roč. 35, č. 9, s. 4171–4184. [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.02.074>
- [14] ATKINS, Penny, PIKE-WILSON, Emily a MORGAN, Rob. *Can Hydrogen Engines Support Decarbonisation in the Heavy Duty Sector? (online)*. Brighton: University of Brighton, Advanced Engineering Centre, 2021. [cit. 2025-05-07]. Dostupné z: https://cris.brighton.ac.uk/ws/portalfiles/portal/25512117/University_of_Brighton_Hydrogen_Report_2021.pdf
- [15] EN 17124. *Hydrogen fuel – Product specification and quality assurance for hydrogen fueling stations – Proton exchange membrane (PEM) fuel cell applications for road vehicles*. Brussels: European Committee for Standardization, 2018.
- [16] TAVAKOLI MEHRABADI, B. A., DINH, H. N., BENDER, G. a WEIDNER, J. W. Effect of system contaminants on the performance of a proton exchange membrane fuel cell. *Journal of The Electrochemical Society (online)*. 2016, roč. 163, č. 14, s. F1527–F1534. [cit. 2025-02-27]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1149/2.0901614jes>
- [17] INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY. *Hydrogen – A key technology for the energy transition (online)*. IRENA, [cit. 2025-02-16]. Dostupné z: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydrogen>
- [18] DU, Zhemin, LIU, Congmin, ZHAI, Junxiang, GUO, Xiuying, XIONG, Yalin, SU, Wei a HE, Guangli. A review of hydrogen purification technologies for fuel cell vehicles. *Catalysts (online)*. 2021, roč. 11, č. 3, čl. 393. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/catal11030393>
- [19] WRÓBEL, K., WRÓBEL, J., TOKARZ, W., LACH, J., PODSADNI, K. a CZERWIŃSKI, A. Hydrogen internal combustion engine vehicles: A review. *Energies (online)*. 2022, roč. 15, č. 23, čl. 8937. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en15238937>
- [20] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. *Levelised cost of hydrogen via selected technologies in Northwest Europe in the announced pledges scenario 2023–2030 (online)*. 2025. [cit. 2025-02-16]. Dostupné z: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/levelised-cost-of-hydrogen-via-selected-technologies-in-northwest-europe-in-the-announced-pledges-scenario-2023-2030>
- [21] DE BOER, P. C. T., MCLEAN, W. J. a HOMAN, H. S. Performance and emissions of hydrogen fueled internal combustion engines. *International Journal of Hydrogen Energy*

- (online). 1976, roč. 1, č. 2, s. 153–172. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360319976900689>
- [22] TOYOTA MOTOR EUROPE. *Prototype Corolla Cross Hydrogen Concept Highlights Toyota's Multi-Path Approach To Zero (online)*. Brussels: Toyota Europe Newsroom, 5. prosince 2022. [cit. 2025-02-24]. Dostupné z: <https://newsroom.toyota.eu/prototype-corolla-cross-hydrogen-concept-highlights-toyotas-multi-path-approach-to-zero/>
- [23] STĘPIEŃ, Zbigniew. A Comprehensive Overview of Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines: Achievements and Future Challenges. *Energies (online)*. 2021, roč. 14, č. 20, čl. 6504. [cit. 2025-04-19]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en14206504>
- [24] SHADIDI, Behdad, NAJAFI, Gholamhassan a YUSAF, Talal. A review of hydrogen as a fuel in internal combustion engines. *Energies (online)*. 2021, roč. 14, č. 19, čl. 6209. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en14196209>
- [25] VERHELST, Sebastian a WALLNER, Thomas. Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Progress in Energy and Combustion Science (online)*. 2009, roč. 35, č. 6, s. 490–527. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.08.001>
- [26] DIMITRIOU, Pavlos a TSUJIMURA, Taku. A review of hydrogen as a compression ignition engine fuel. *International Journal of Hydrogen Energy (online)*. 2017, roč. 42, č. 38, s. 24470–24486. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.232>
- [27] RUEDA-VÁZQUEZ, José Manuel, SERRANO, Javier, PINZI, Sara, JIMÉNEZ-ESPADAFOR, Francisco Javier a DORADO, María Pilar. A review of the use of hydrogen in compression ignition engines with dual-fuel technology and techniques for reducing NO_x emissions. *Sustainability (online)*. 2024, roč. 16, č. 8, čl. 3462. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/su16083462>
- [28] WALLNER, Thomas, LOHSE-BUSCH, Henning, GURSKI, Stephen, DUOBA, Mike, THIEL, Wolfgang, MARTIN, Dieter a KORN, Thomas. Fuel economy and emissions evaluation of BMW Hydrogen 7 Mono-Fuel demonstration vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy (online)*. 2008, roč. 33, č. 24, s. 7607–7618. [cit. 2025-02-16]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.08.067>
- [29] MAZDA. *Mazda Starts Leasing Rotary Hydrogen Vehicles (online)*. 15. února 2006. [cit. 2025-02-20]. Dostupné z: <https://newsroom.mazda.com/en/publicity/release/2006/200602/060215.html>
- [30] CUMMINS INC. *Cummins reveal zero-carbon H₂-ICE concept truck at IAA Expo powered by B6.7H (online)*. Cummins, 2022. [cit. 2025-04-13]. Dostupné z: <https://www.cummins.com/news/releases/2022/09/13/cummins-reveal-zero-carbon-h2-ice-concept-truck-iaa-expo-powered-b67h>
- [31] CUMMINS INC. *Cummins Inc. debuts 15-liter hydrogen engine at ACT Expo (online)*. Cummins, 2022. [cit. 2025-04-13].

- Dostupné z: <https://www.cummins.com/news/releases/2022/05/09/cummins-inc-debuts-15-liter-hydrogen-engine-act-expo>
- [32] NEBERGALL, Jim. *Hydrogen engine insights for truck and bus manufacturers (online)*. Cummins Inc., 13. června 2022. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.cummins.com/news/2022/06/13/hydrogen-engine-insights-truck-and-bus-manufacturers>
- [33] JCB. *Landmark Start to 2025 as JCB's Hydrogen Engine Approved for Use (online)*. 2025. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.jcb.com/en-us/news/2025/01/landmark-start-to-2025-as-jcbs-hydrogen-engine-approved-for-use>
- [34] JCB. *Hydrogen (online)*. [cit. 2025-04-24]. Dostupné z: <https://www.jcb.com/en-us/campaigns/hydrogen>
- [35] EVROPSKÁ KOMISE. *Well-to-Wheels Analyses (online)*. Brussels: Joint Research Centre, 2016. [cit. 2025-03-25]. Dostupné z: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/welcome-jec-website/jec-activities/well-wheels-analyses_en
- [36] ALBATAYNEH, A., ASSAF, M. N., ALTERMAN, D. a JARADAT, M. Comparison of the Overall Energy Efficiency for Internal Combustion Engine Vehicles and Electric Vehicles. *Environmental and Climate Technologies (online)*. 2020, roč. 24, č. 1, s. 669–680. [cit. 2025-03-12]. Dostupné z: <https://doi.org/10.2478/rtuect-2020-0041>
- [37] LANZ, Lukas, NOLL, Bessie, SCHMIDT, Tobias S. a STEFFEN, Bjarne. Comparing the levelized cost of electric vehicle charging options in Europe. *Nature Communications (online)*. 2022, roč. 13, čl. 5277. [cit. 2025-05-08]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32835-7>
- [38] HELMERS, Eckard a MARX, Patrick. Electric cars: Technical characteristics and environmental impacts. *Environmental Sciences Europe (online)*. 2012, roč. 24, č. 14. [cit. 2025-03-29]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/2190-4715-24-14>
- [39] CLEGG, S. J. *A review of regenerative braking systems [Working Paper] (online)*. Leeds: Institute of Transport Studies, University of Leeds, 1996. [cit. 2025-03-22]. Dostupné z: <https://eprints.whiterose.ac.uk/2118/>
- [40] TUMBEEK, Mustafa, KESLER, Selami a ONER, Yusuf. *Design and FEM analysis of low voltage outer rotor line start permanent magnet synchronous motors with different magnet alignments*. In: *6th International Conference on Advanced Technology & Sciences (ICAT'Riga) (online)*. Riga, 12.–15. září 2017. Pamukkale University, 2017. [cit. 2025-03-17]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/320611871>
- [41] MOHAMMADI, Fazel a SAIF, Mehrdad. A comprehensive overview of electric vehicle batteries market. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy (online)*. 2023, roč. 3, čl. 100127. [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.prime.2023.100127>
- [42] EV DATABASE. *Electric car range (online)*. 2023. [cit. 2025-03-22]. Dostupné z: <https://ev-database.org/cheatsheet/range-electric-car>

- [43] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Electric Batteries (online)*. Alternative Fuels Data Center. [cit. 2025-05-12]. Dostupné z: <https://afdc.energy.gov/vehicles/electric-batteries>
- [44] HANNAN, M. A., AZIDIN, F. A. a MOHAMED, A. Hybrid electric vehicles and their challenges: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews (online)*. 2014, roč. 29, s. 135–150. [cit. 2025-05-13]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.097>
- [45] ARSHA, M. S. a BIJU, V. A 3.5 V Supercapacitor with Ultrahigh Energy and Power Capabilities using Thermally Deoxygenated Graphite Oxide Electrodes and Water-in-Salt Electrolyte. *Energy & Fuels (online)*. 2024, roč. 38, č. 19, s. 19076–19087. [cit. 2025-05-12]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.4c02984>
- [46] GEBREMARIAM, Simon a WONDIE, Tebeje. Comparative analysis of electric motor drives employed for propulsion purpose of Battery Electric Vehicle (BEV) systems. *International Journal of Science and Research Archive (online)*. 2023, roč. 10, s. 1097–1112. [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://doi.org/10.30574/ijsra.2023.10.2.1074>
- [47] CLEGG, S. J. *A review of regenerative braking systems [Working Paper] (online)*. Leeds: Institute of Transport Studies, University of Leeds, 1996. [cit. 2025-03-22]. Dostupné z: <https://eprints.whiterose.ac.uk/2118/>
- [48] HICKS, William, GREEN, David C. a BEEVERS, Sean. Quantifying the change of brake wear particulate matter emissions through powertrain electrification in passenger vehicles. *Environmental Pollution (online)*. 2023, roč. 336, čl. 122400. [cit. 2025-05-06]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122400>
- [49] OLABI, A. G., M. A. ABDELKAREEM, T. WILBERFORCE, A. ALKHALIDI, T. SALAMEH, A. G. ABO-KHALIL, M. M. HASSAN a E. T. SAYED. Battery Electric Vehicles: Progress, Power Electronic Converters, Strength (S), Weakness (W), Opportunity (O), and Threats (T). *International Journal of Thermofluids (online)*. 2022, roč. 16, 100212 [cit. 2025-05-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100212>
- [50] PARCZEWSKI, K. a H. WNEK. Analysis of Energy Flow in Hybrid and Electric-Drive Vehicles. *Energies [online]*. 2024, roč. 17, č. 8, s. 1915 [cit. 2025-05-20]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/en17081915>
- [51] CHAN, C. C. *The state of the art of electric and hybrid vehicles. Proceedings of the IEEE (online)*. 2002, roč. 90, s. 259–261. [cit. 2025-02-25]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/5.989873>
- [52] AGARWAL, V. a DEV, M. *Introduction to hybrid electric vehicles: State of art (online)*. In: *2013 Students Conference on Engineering and Systems (SCES)*. Allahabad, Indie, 2013. IEEE, 2013, s. 1–6. [cit. 2025-05-05]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/SCES.2013.6547512>
- [53] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. *Hybrid Electric Vehicles (HEVs) (online)*. [cit. 2025-03-08]. Dostupné z: <https://afdc.energy.gov/vehicles/electric-basics-hev>
- [54] ŠKODA AUTO. *Nový Superb Combi (online)*. 2024. [cit. 2024-03-29]. Dostupné z: <https://www.skoda-auto.cz/modely/novy-superb/superb-combi>

- [55] PLÖTZ, Patrick, Steffen LINK, Hermann RINGELSCHWENDNER, Marc KELLER, Cornelius MOLL, Georg BIEKER, Jan DORNOFF a Peter MOCK. *Real-world usage of plug-in hybrid vehicles in Europe: A 2022 update on fuel consumption, electric driving, and CO₂ emissions* (online). Berlin: International Council on Clean Transportation, 2022 [cit. 2025-05-16]. Dostupné z: <https://theicct.org/publication/real-world-phev-use-jun22/>
- [56] AMJAD, Shaik, S. NEELAKRISHNAN a R. RUDRAMOORTHY. Review of design considerations and technological challenges for successful development and deployment of plug-in hybrid electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews (online)*. 2010, 14(3), 1104–1110 [cit. 2025-05-21]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.001>
- [57] BECCARI, S. *On the use of a hydrogen-fueled engine in a hybrid electric vehicle*. *Applied Sciences (online)*. 2022, roč. 12, č. 24, čl. 12749. [cit. 2025-05-13]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app122412749>
- [58] KYJOVSKÝ, Štěpán, VÁVRA, Jiří, BORTEL, Ivan a TOMAN, Rastislav. *Drive cycle simulation of light duty mild hybrid vehicles powered by hydrogen engine*. *International Journal of Hydrogen Energy (online)*. 2023, roč. 48, č. 44, s. 16885–16896. [cit. 2025-05-13]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.137>
- [59] HYTEP. *Ceny vodíku pro dopravní sektor v ČR: Pracovní podklad (online)*. Praha: Národní akční plán čisté mobility, 2022 [cit. 2025-05-17]. Dostupné z: https://www.cistadoprava.cz/files/NAHYC_DP002N-V008-Ceny_vodik.pdf
- [60] EUROPEAN COMMISSION. *EU Weekly Oil Bulletin (online)*. Brussels: Directorate-General for Energy, 2024 [cit. 2025-05-17]. Dostupné z: https://energy.ec.europa.eu/data-and-analysis/weekly-oil-bulletin_en
- [61] MACHACEK, David Theodor, YASAR, Nazim Ozan, HUBER, Thomas a ONDER, Christopher Harald. *Energy management of hydrogen hybrid electric vehicles — A potential analysis*. *International Journal of Hydrogen Energy (online)*. 2024, roč. 58, s. 1–13. [cit. 2025-05-13]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.01.124>
- [62] RASUL, Mohammad, PATEL, A., COLE, Colin, SUN, Y., SPIRYAGIN, Maksym, GODBER, T. a HAMES, S. *Train Motive Power Technologies: A Review on Existing and Emerging (Hybrid) Technologies (online)*. 2013 [cit. 2025-05-21]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/308719679_Train_Motive_Power_Technologies_A_Review_on_Existing_and_Emerging_Hybrid_Technologies
- [63] KAMEL, Tamer, AMOR, Peter, POLATER, Nursaid, ZHANG, Yizhe, TIAN, Zhongbei, HILLMANSEN, Stuart a TRICOLI, Pietro. *Development of a smart hybrid drive system with advanced logistics for railway applications*. *International Journal of Hydrogen Energy (online)*. 2024, 52, část B, s. 559–576 [cit. 2025-05-21]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.293>
- [64] CIPEK, Mihael, PAVKOVIĆ, Danijel, KLJAJIĆ, Zdenko a MLINARIĆ, Tomislav Josip. *Assessment of battery-hybrid diesel-electric locomotive fuel savings and emission*

- reduction potentials based on a realistic mountainous rail route (online)*. Energy, 2019, 173, s. 1154–1171 [cit. 2025-05-21]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.144>
- [65] FORD MOTOR COMPANY. *Access C: 2003 Ford Focus H2RV Hydrogen Hybrid Research Vehicle Brochure (online)*. 2003. [cit. 2025-03-26]. Dostupné z: https://static1.squarespace.com/static/5b123d3785ede1508bab2a35/t/676ea8c35e277f267c6246cc/1735305414684/access-c_2003_ford_focus_h2rv_hydrogen_hybrid_research_vehicle_brochure_ar_96_212010_22186.pdf
- [66] WHITE, C. M., STEEPER, R. R. a LUTZ, A. E. *The hydrogen-fueled internal combustion engine: A technical review*. *International Journal of Hydrogen Energy (online)*. 2006, roč. 31, č. 10, s. 1303–1315. [cit. 2025-03-26]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.12.001>
- [67] MAZDA MOTOR CORPORATION. *Mazda Begins Commercial Leasing of World's First Hydrogen Rotary Hybrid Vehicle (online)*. 25. března 2009. [cit. 2025-02-22]. Dostupné z: <https://newsroom.mazda.com/en/publicity/release/2009/200903/090325b.html>
- [68] SO KHUONG, Leang, HASHIMOTO, Nozomu a FUJITA, Osamu. *Spray, droplet evaporation, combustion, and emission characteristics of future transport fuels for compression-ignition engines: A review*. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition) (online)*. 2024, roč. 11, č. 4, s. 575–613. [cit. 2025-02-22]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2024.04.003>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

APS	Announced Pledges Scenario	Scénář oznámených závazků
BEV	Battery Electric Vehicle	Bateriové elektrické vozidlo
BMS	Battery Management System	System správy baterií
BSG	Belt Starter Generator	Řemenový startér-generátor
CCS	Carbon Capture and Storage	Zachytávání a ukládání uhlíku
DI	Direct Injection	Přímé vstřikování
EGR	Exhaust Gas Recirculation	Recirkulace výfukových plynů
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle	Vozidlo s palivovým článkem
H ₂ ICE	Hydrogen Internal Combustion Engine	Vodíkový spalovací motor
HEV	Hybrid Electric Vehicle	Hybridní elektrické vozidlo
ICE	Internal Combustion Engine	Spalovací motor
IM	Induction Motor	Asynchronní motor
LCA	Life Cycle Assessment	Posouzení životního cyklu
PEM	Proton Exchange Membrane	Membrána s protonovou výměnou
PEMFC	Proton Exchange Membrane Fuel Cell	Palivový článek s protonvýměnnou membránou
PFI	Port Fuel Injection	Vstřikování do sacího potrubí
PM	Particulate Matter	Pevné částice
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Motor	Synchronní motor s permanentními magnety
PSA	Pressure Swing Adsorption	Tlaková výměnná adsorpce
RE	Rotary Engine	Rotační motor
SCR	Selective Catalytic Reduction	Selektivní katalytická redukce

SRM	Switched Reluctance Motor	Reluktanční motor
TTW	Tank-To-Wheel	Od nádrže ke kolům
VCSC	Volumetric Compressor Supercharging	Přepřívání objemovým kompresorem
WLTC	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Cycle	Celosvětově harmonizovaný cyklus
WTW	Well-To-Wheel	Od zdroje ke kolům
λ	[-]	Poměr motorem nasávaného, a tedy spotřebovaného množství vzduchu k množství potřebnému pro dokonalé spálení 1 kg paliva