



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

PROVOZ ELEKTRICKY POHÁNĚNÝCH VOZIDEL, HYBRIDNÍCH VOZIDEL A VOZIDEL SE SPALOVACÍM MOTOREM

OPERATION OF ELECTRIC VEHICLES, HYBRID VEHICLES AND VEHICLES WITH AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radim Herzog

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Kučera

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Radim Herzog**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Kučera**
Akademický rok: 2022/23

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:

Provoz elektricky poháněných vozidel, hybridních vozidel a vozidel se spalovacím motorem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce rešeršního charakteru, která se bude zabývat popisem provozu vozidel s různou koncepcí pohonu zaměřená na účinnost, spotřebu a vznik emisí škodlivin. Přestože při provozu elektricky poháněných vozidel nevznikají žádné místní emise výfukových plynů, je vhodné se zamyslet, jak je vyráběna elektrická energie, kterou jsou tato vozidla dobíjena a porovnat účinnost a množství emisí z výroby s provozem vozidla se spalovacím motorem nebo hybridním vozidlem.

Cíle bakalářské práce:

Provést rešerši současných koncepcí pohonu vozidel.
Popsat vznik a složení emisí škodlivin při provozu vozidel.
Vytvořit přehled spotřeby a účinnosti jednotlivých koncepcí.
Porovnat uvedené varianty.
Kriticky zhodnotit shromážděné informace.

Seznam doporučené literatury:

BOSCH GMBH, Robert. Automotive Handbook, 11th Edition. Wiley–Blackwell, 2022. ISBN 9781119911906.

HAYES, John G. a Abas GOODARZI. Electric Powertrain: Energy Systems, Power Electronics and Drives for Hybrid, Electric and Fuel Cell Vehicles. 2018. ISBN 978-1-119-06364-3.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

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 porovnáním různých koncepcí pohonu a jejich spotřebou, účinnostmi a množstvím vyprodukovaných emisí při provozu. Ačkoliv elektromobily neprodukují žádné lokální emise, je potřeba si uvědomit, že při výrobě elektrické energie v elektrárnách emise vznikají. V hlavní části práce je vypracováno seznámení s principem funkce jednotlivých pohonů. Dále je popsán vznik emisí výfukových plynů u spalovacích motorů a vypsány jejich limity. Následně je spočítáno množství emisí vyprodukované elektrárnou pro provoz konkrétního příkladu elektromobilu a hybridního vozidla. Na závěr je znázorněno porovnání produkce emisí od reprezentativních příkladů každého pohonu.

KLÍČOVÁ SLOVA

spalovací motor, elektromobil, emise, elektrárna, hybridní vozidlo, spotřeba

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with the comparison of different propulsion concepts and their consumption, efficiency, and amount of emissions produced during operation. Although electric vehicles do not produce any local emissions, it is necessary to consider that emissions are generated during the production of electricity in power plants. The main part of the thesis introduces the functional principles of individual propulsion systems. Furthermore, it describes the formation of exhaust gas emissions in combustion engines and outlines their limits. Subsequently, the amount of emissions produced by a power plant for the operation of a specific example of an electric vehicle and a hybrid vehicle is calculated. Finally, a comparison of emissions production from representative examples of each propulsion system is illustrated.

KEYWORDS

combustion engine, electric vehicle, emissions, power plant, hybrid vehicle, consumption

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Herzog, R. *Provoz elektricky poháněných vozidel, hybridních vozidel a vozidel se spalovacím motorem*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí bakalářské práce Ondřej Kučera. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149712>.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 26. května 2023

.....

Radim Herzog

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Ondřeji Kučerovi za důležité rady, věnovaný čas a vstřícnost při jakýchkoliv dotazech. Poděkování také patří mé rodině za podporu a trpělivost během celého studia.

OBSAH

Úvod.....	9
1 Historie pohonů.....	10
1.1 Parní pohon.....	10
1.2 Elektrický pohon.....	11
1.3 Pohon spalovacím motorem.....	12
1.4 Hybridní pohon.....	13
2 Automobily se spalovacím motorem.....	14
2.1 Automobily se zážehovým motorem.....	14
2.1.1 Paliva pro zážehový motor.....	14
2.1.2 Příprava zápalné směsi.....	14
2.1.3 Spalování.....	17
2.1.4 Přehled škodlivých emisních látek a emisní limity.....	18
2.1.5 Opatření pro snižování emisí.....	20
2.1.6 Spotřeba a účinnost.....	21
2.2 Automobily se vznětovým motorem.....	22
2.2.1 Paliva pro vznětové motory.....	23
2.2.2 Příprava zápalné směsi.....	23
2.2.3 Emisní normy.....	24
2.2.4 Opatření pro snižování emisí.....	25
2.2.5 Spotřeba a účinnost.....	26
2.2.6 Reprezentativní příklady.....	26
3 Elektromobily.....	28
3.1 Elektromotory.....	28
3.1.1 Stejnoseměrný motor.....	28
3.1.2 Synchronní motor.....	28
3.1.3 Asynchronní motor.....	29
3.2 Výroba elektrické energie v ČR.....	30
3.3 Akumulátory.....	31
3.3.1 Olověné akumulátory.....	31
3.3.2 Nikl-kadmiové akumulátory.....	32
3.3.3 Nikl-metal hydridové akumulátory.....	32
3.3.4 Lithium-iontové akumulátory.....	33
3.4 Spotřeba a účinnost.....	33
3.5 Reprezentativní příklad.....	35
4 Automobily s hybridním pohonem.....	36
4.1 Typy hybridních pohonů.....	36
4.1.1 Micro hybrid.....	36
4.1.2 Mild hybrid.....	36
4.1.3 Full hybrid.....	37
4.1.4 Plug-in hybrid.....	38
4.2 Reprezentativní příklad.....	38

5	Porovnání reprezentativních příkladů vozidel z hlediska emisí a spotřeby	40
	Závěr	42
	Použité informační zdroje	43
	Seznam použitých zkratek a symbolů	47

ÚVOD

S přicházejícími restrikcemi v automobilovém průmyslu omezující produkci škodlivin ve výfukových plynech se hledají alternativní paliva, či pohony, které budou ekologicky čistší. Automobily se spalovacím motorem přeměňují chemickou energii uloženou v palivu na mechanickou práci. Výstupem této přeměny je kromě pohonu klikové hřídele také produkce výfukových plynů. Existuje mnoho opatření, které zdatelně snižují obsah škodlivých látek ve výfukových plynech, jako jsou například katalyzátory, různé filtry nebo recirkulace spalin. Ovšem k plnění nově přichozích přísnějších emisních limitů nebudou tyto zařízení stačit. Velmi sledované škodlivé látky jsou oxidy dusíku (NO_x), pevné částice (PM), nespálené uhlovodíky (HC) a v neposlední řadě oxid uhličitý (CO_2), který není v malém množství škodlivý lidskému organismu, ale napomáhá skleníkovému efektu a tím i globálnímu oteplování.

Velký rozmach zažívají elektromobily, které neprodukují žádné lokální emise, a tudíž se zdají být šetrné k životnímu prostředí. Ovšem samotná výroba elektrické energie, která slouží jako palivo do elektromobilů, už tak čistá být nemusí. Záleží také na typu elektrárny, která elektrickou energii vyrobí. V České republice je 36 % hnědohelných elektráren, které mají největší produkci emisních látek ze všech typů elektráren, proto je snaha omezovat tento typ elektráren a soustředit se na obnovitelné zdroje. Alternativou by také mohla být hybridní vozidla, která kombinují výhody jednotlivých pohonů a tím dosahují optimálních hodnot spotřeby a účinnosti. Nejběžnějším hybridním pohonem je kombinace spalovacího motoru a elektrického pohonu.

Cílem této bakalářské práce je zhodnotit výhody a nevýhody provozu automobilu se spalovacím motorem v porovnání s elektromobilem, případně s hybridním vozidlem. Dále porovnat množství vyprodukovaných emisí od jednotlivých konceptů na reprezentativních příkladech a vyčíslit náklady na provoz.

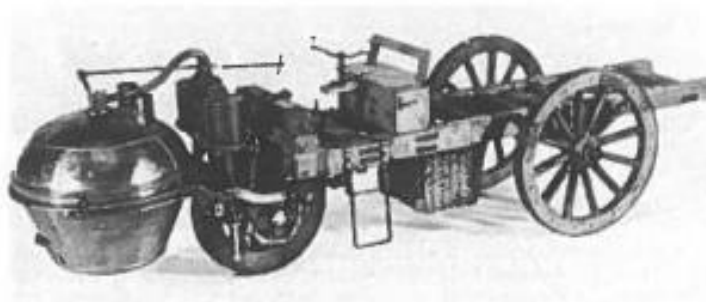
1 HISTORIE POHONŮ

Už v dávné minulosti byly vytvořeny stroje, které umožňovaly lidstvu přepravu jak těžkých nákladů, tak lidí samotných. K pohonu nejrůznějších typů strojů, povozů a vozidel byly používány všechny dostupné zdroje energie, například byly poháněny větrem, zvířaty, či používaly ke svému pohonu lidskou sílu. Až v druhé polovině 18. století, v důsledku průmyslové revoluce, byl zkonstruován první stroj poháněný parou. Základem stroje byl píst ve válci, do kterého byla přiváděna pára z parního kotle. Jednalo se o tříkolku s maximální rychlostí 3,6 km/h a účinností 10 %. Na území Čech se proslavil Josef Božek, který se zabýval problematikou parního pohonu a v roce 1815 zkonstruoval parní automobil. Koncem 19. století byla parní vozidla nahrazena vozidly se spalovacími motory. [1] Ty pracovaly na principu přeměny chemické energie uložené v palivě na energii mechanickou. Z počátku se využívalo plynné palivo (svítiplyn), ale později se ukázalo, že z důvodu větší objemové hustoty energie je lepší kapalné palivo. Konkrétně se jedná o benzin a naftu, které se vyrábějí destilací ropy. O konstrukci moderního benzinového motoru se zasloužili Nikolaus August Otto a Eduard Langen, kteří zdokonalili Lenoirův plynový motor. Tento motor se také označuje jako zážehový, protože směs paliva se vzduchem je ve válci zapalována elektrickou jiskrou. Se vznětovým motorem jako první přišel Němec Rudolf Diesel. Dieslův motor pracoval na principu samovznícení těžko odpařitelného paliva, kterým byl petrolej a později nafta ve stlačeném vzduchu válce motoru. Největším problémem bylo v tehdejší době vstřikování. Oproti zážehovým motorům, kde je palivo nasáváno do válce motoru společně se vzduchem, musí být u vznětového motoru palivo vstřikováno pod vysokým tlakem do stlačeného vzduchu ve spalovacím prostoru motoru. Právě z důvodu vysokého vstřikovacího tlaku byl vznětový motor aplikován do automobilu až o 20 let později. [2]

1.1 PARNÍ POHON

Historie motorových vozidel sahá do 18. století. Převrat ve vývoji způsobil vynález parního stroje. Největší zásluhu na vzniku parního stroje má skotský mechanik J. Watt, který získal patent na parní stroj a podílel se také na jeho zdokonalování. Zavedl také novou jednotku výkonu – horse power (HP), která odpovídá 0,735 kW. Díky této jednotce dokázal porovnat výkon stroje s výkonem zvířete. [2] Velkým přínosem bylo snížení potřebného počtu členů k obsluze stroje. Nevýhodou zase vysoká hmotnost a nízká účinnost, která se pohybovala kolem 10 %. [3]

První parní automobil (parostroj) je připisován francouzskému mechanikovi a vojákovi Nikolasi Josephu Cugnotovi. V roce 1769 sestrojil tříkolové vozidlo, které bylo poháněné svislým dvouválcovým motorem. Stroj, který nebyl vybaven brzdami, dosahoval rychlosti až 4 km/h a na jedno naplnění kotle ujel necelý kilometr. Z důvodu velkých a těžkých parních vozidel se musela přizpůsobit i konstrukce vozovky. Jako nejlepší řešení se osvědčila kolejová doprava.



Obr. 1 Parní vůz Cugnot [2]

1.2 ELEKTRICKÝ POHON

O první náznak elektromobilu se v roce 1835 zasloužil nizozemský chemik Sibrandus Stratingh. Jednalo se ovšem pouze o zmenšený model, který neměl praktické využití. Velkým průlomem pro elektrická vozidla byl v roce 1859 vynález olověné baterie, která se dala znovu nabít a opakovaně používat. Zároveň disponovala větší kapacitou, což vedlo k delšímu dojezdu. [4] Jeden z prvních použitelných elektromobilů byl sestaven roku 1884 vynálezcem Thomasem Parkerem, který se mimo jiné zabýval také elektrifikací londýnského metra. [5]

Na začátku 20. století jezdilo po světě skoro 30 000 elektromobilů. Stále ale měly mnoho nedostatků, jako jsou těžké baterie, nízká rychlost, která se pohybovala okolo 30 km/h, dlouhá doba nabíjení a krátký dojezd dosahující 70 km. U většiny můžeme podobné problémy pozorovat i v dnešní době. [5]

I přes výše zmíněné problémy byly elektromobily na přelomu 19. a 20. století velmi oblíbené. Jedním z důvodů jsou také rekordy, které bořily v maximální rychlosti. V roce 1899 Belgičan Jenatzy překonal rychlost 100 km/h se svým vozem Jamais Contente a tím vyzdvihnul popularitu elektromobilů. Ovšem s neúspěšným plánem přišel William C. Whitney, který chtěl v USA zelektrifikovat taxíky. Projevila se poruchovost baterií, která nahrávala příznivcům spalovacích motorů. Další ránou pro elektromobily bylo nalezení nových ložisek ropy, které vedlo ke zlevnění pohonných hmot. Posledním faktorem, který definitivně překlátil jazýčky vah ve prospěch spalovacích motorů, bylo zavedení sériové výroby finančně dostupného Modelu T od Henry Forda, čímž začala převládat výroba vozidel poháněných spalovacím motorem. Změna nastala až v 80. letech 20. století, kdy se lidé začali zajímat o škodlivé látky z výfukových plynů a v roce 1992 přišlo první omezení množství výfukových plynů. Elektromobily znovu dostaly šanci a svoji výrobu si zachovaly dodnes, už kvůli stálému zájmu lidstva o životní prostředí. [4]



Obr. 2 Ford Model T [5]

1.3 POHON SPALOVACÍM MOTOREM

Vývoji funkčního spalovacího motoru předcházelo mnoho neúspěšných pokusů s různými druhy paliva. Zpočátku se Francouz Jean Hautefeuille v roce 1678 pokoušel vyvinout motor spalující střelný prach. Spalování sice probíhalo, ale nebylo prakticky využitelné. Jako úspěšnější palivo vypadal svítíplýn, se kterým se začalo experimentovat na konci 18. století. V roce 1859 získal Belgičan Lenoir patent na dvojčinný, dvoudobý motor spalující svítíplýn, jehož plány prodal Nikolausovi Ottovi, který jej dále zdokonaloval a v roce 1879 vyrobil první čtyřdobý motor. Velkým přínosem pro vývoj spalovacího motoru bylo použití kapalného paliva z důvodu vysoké koncentrace energie. S použitím benzínu jako paliva jako první přišel Otto se svým společníkem Langenem. Proto se dodnes můžeme setkat s označením Otto-motor jako výraz pro zážehové motory. [2]

S historií vznětového motoru je pevně svázáno jméno Rudolf Diesel, který se na univerzitě v Mnichově zabýval termodynamikou. Je známo, že Carnotův cyklus dosahuje největší účinnosti a pracovní oběh vznětového motoru se mu velmi blíží. Problémem vznětového motoru byly vysoké vstřikovací tlaky a přesné dávkování paliva vstřikovaného do stlačeného vzduchu ve spalovacím prostoru. Jako první použité palivo pro vznětový motor, také označován jako Diesel-motor, byl petrolej. V roce 1897 představil Rudolf Diesel svůj motor s výkonem 13,1 kW a nízkou měrnou spotřebou, z čehož vyplývala účinnost až 26,2 %. [2]

První automobil se spalovacím motorem vyrobený na území České republiky byl v roce 1897 NW Präsident, přímý předchůdce dnešní Tatry. Automobil o výkonu 6 koní a spotřebě 15 l/100 km, dosahoval maximální rychlosti až 30 km/h. [5]

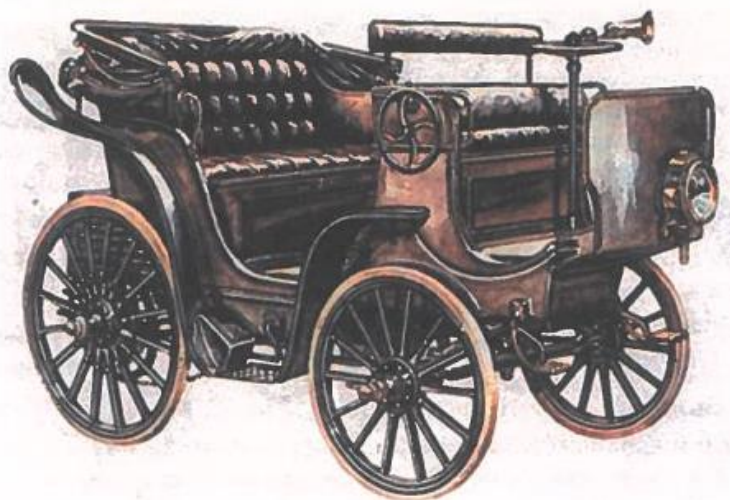
Postupem času přišlo několik vylepšení automobilů z hlediska zvýšení efektivity, snížení spotřeby a emisí, zlepšení jízdních vlastností a také zavádění opatření, které vedly ke zvýšení bezpečnosti cestujících. Například v roce 1959 použila automobilka Volvo první tříbodový pás ve svých vozech Volvo P120 a PV544. V roce 1965 se objevil automobil Jensen FF, který byl jako první s pohonem všech kol. V roce 1975 byl do vozů Cadillac poprvé namontován katalyzátor, který je důležitým prvkem pro snižování škodlivých látek ve výfukových plynech. [5]

1.4 HYBRIDNÍ POHON

Jako první nápad hybridního pohonu, se kterým lidstvo přišlo, byla kombinace parního pohonu s koňským. Zasloužil se o to Ferdinand Verbiest ve druhé polovině 17. století, ovšem dodnes není známo, zda se tento stroj skutečně vyráběl, či zůstal jenom plánem. Už potvrzený hybridní pohon přišel, když v roce 1889 William Patton získal patent na kombinaci spalovacího motoru a elektromotoru. [6]

První hybridní automobil, který byl kombinací elektromotoru a spalovacího motoru, sestrojil konstruktér Ferdinand Porsche na začátku 20. století. Automobil vážil 4 tuny, z toho 1,8 tuny zaujímaly jenom baterie. Olověné články baterie o kapacitě 21,6 kWh byly dobíjeny čtyřválcovým motorem o objemu 5,5 l a výkonu 18 kW. Vozidlo však nebylo vybaveno rekuperací energie při brždění, s tou přišel jako první Erich Graichen v roce 1931 se svým hybridním vozidlem poháněným kombinací elektrického pohonu a spalovacího motoru spalující kyslíkovodíkový plyn. [6] Na našem území se problematikou hybridního pohonu zabýval František Křížík, který postavil až 4 elektromobily a minimálně jeden z nich byl s hybridním pohonem. [7]

Ve světě zpočátku převládala dominance elektrického pohonu nad spalovacím motorem, ovšem nevydržela moc dlouho a prioritní pohon začínal být spalovací motor. V 70. a 80. letech 20. století se velké automobilky znovu začínají zabývat hybridním pohonem z důvodu přicházejícího zprůsnění emisních norem. Hybridní pohon využívá výhody jednotlivých koncepcí a tím účinně snižuje spotřebu paliva a množství škodlivin ve výfukových plynech. [8]



Obr. 3 Elektromobil Františka Křížíka [7]

2 AUTOMOBILY SE SPALOVACÍM MOTOREM

Spalovací motor je tepelný stroj, který přeměňuje chemickou energii uloženou v palivu na mechanickou práci. Lze je dělit na zážehové a vznětové motory, podle toho, jaké palivo a jakým způsobem spalují. Pro automobily se běžně používají pístové spalovací motory, které mění přímočarý pohyb pístu ve válci na rotační pohyb klikové hřídele. Další rozdělení motorů je podle počtu otáček potřebných k vykonání jednoho pracovního cyklu. Dvoudobý motor vykoná celý pracovní cyklus za jednu otáčku, čtyřdobý motor potřebuje otáčky dvě. [9]

2.1 AUTOMOBILY SE ZÁŽEHOVÝM MOTOREM

U zážehových motorů se používají lehce odpařitelná paliva, která se vzduchem tvoří zápalnou směs. Zážeh se provádí ve spalovacím prostoru pomocí jiskry, která přeskočí mezi elektrodami zapalovací svíčky a zapálí stlačenou směs. Ideální spalování probíhá při stechiometrickém poměru 14,8 kg vzduchu a 1 kg paliva. Na tomto poměru je silně závislá spotřeba paliva, výkon a množství jednotlivých emisních složek. Kompresní poměr ε je omezen teplotou vznícení směsi a jeho maximální hodnoty dosahují 11,5. Tlak na konci komprese se pohybuje od 0,8 do 1,5 MPa a teplota od 400 do 600 °C. [10]

2.1.1 PALIVA PRO ZÁŽEHOVÝ MOTOR

U zážehových motorů se používají paliva kapalná a plynná. Z kapalných to mohou být benzin, benzol nebo methanol. U plyných paliv se využívá zemní plyn, či propan-butan. Nejčastěji používaným palivem je benzin, který se vyrábí destilací ropy. [10]

Požadavky na motorová paliva

- Schopnost tvořit se vzduchem zápalnou směs
- Vysoká výhřevnost (u benzínu se pohybuje okolo 44 MJ/kg)
- Nízká cena
- Korozivzdornost
- Chemická stálost [11]

Oktanové číslo

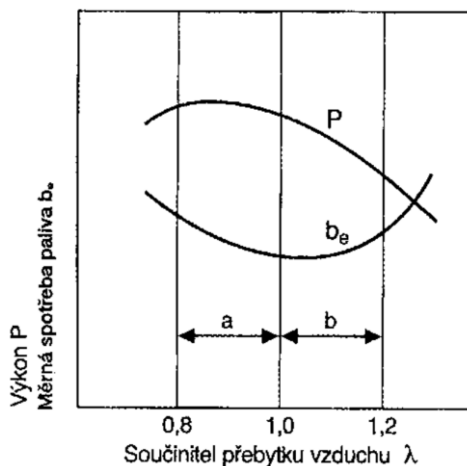
Důležitým parametrem benzínu je oktanové číslo, které udává odolnost paliva proti klepání. Tento jev je také označován jako klepání, vznikající lokálním vzplanutím směsi paliva se vzduchem. Oktanové číslo se určuje pomocí směsi n-heptanu a izooktanu. Jestliže motor začne klepat při provozu na benzin ve stejném okamžiku, jako při provozu na směs 95 % izooktanu a 5 % n-heptanu, pak je jeho oktanové číslo 95. [10]

2.1.2 PŘÍPRAVA ZÁPALNÉ SMĚSI

U zážehových motorů se při kompresním zdvihu palivová směs v motoru zahřívá na teplotu 400 až 500 °C. Tato teplota je nižší než teplota samovznícení, proto je potřeba zážeh provést jiskrou. Pro určení poměru mezi množstvím přivedeného vzduchu k teoretickému množství vzduchu, které je 14,8 kg, byl zaveden součinitel přebytku vzduchu λ . Na základě tohoto součinitele rozdělujeme směs na bohatou a chudou. [10]

$$\lambda = \frac{\text{množství přiváděného vzduchu [kg]}}{\text{teoretická potřeba vzduchu [kg]}} \quad (1)$$

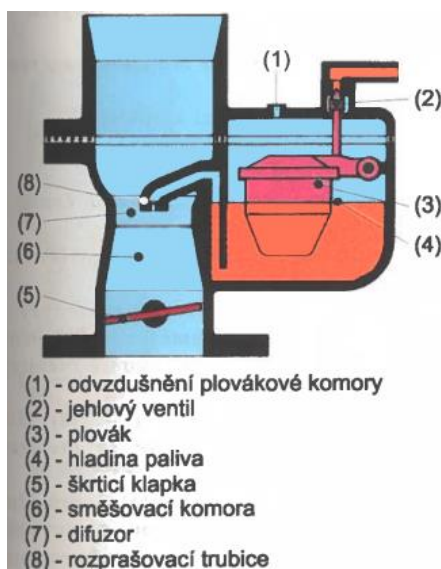
Bohatá směs vzniká, když je nedostatek vzduchu, tedy $\lambda < 1$. Nejvyššího výkonu je dosahováno při směsi $\lambda = 0,85$ až $0,95$. Při přebytku vzduchu, tedy $\lambda > 1$, vzniká chudá směs. Při těchto hodnotách se snižuje spotřeba paliva ale také výkon. Pokud je $\lambda > 1,3$, směs není možné zapálit jiskrou. [10]



Obr. 4 Závislost výkonu a měrné spotřeby na součiniteli přebytku vzduchu [10]

KARBURÁTOR

Hlavní funkcí karburátoru je dosáhnout jemného rozprášení paliva do nasávaného proudu vzduchu a tím připravit zápalnou směs. Palivo se do plovákové komory karburátoru přivádí pomocí podávacího čerpadla. V této komoře se také nachází plovák, který ovládá jehlový ventil tak, aby hladina paliva v plovákové komoře byla pořád stejná. Tvorba směsi benzínu a vzduchu probíhá v difuzoru, kde se díky jeho zúžení zrychluje tok vzduchu a přes trysku z plovákové komory je zde vysáváno palivo vzniklým podtlakem. Připravená směs je do spalovacího prostoru korigována pomocí škrtkové klapky podle zatížení motoru. Při startování je motor studený, a to způsobuje kondenzaci paliva na chladných místech. Z toho důvodu musí být směs bohatá ($\lambda = 0,3$). Při běžné jízdě se připravuje mírně chudá směs ($\lambda=1,1$) z důvodu nízké spotřeby paliva. [12]



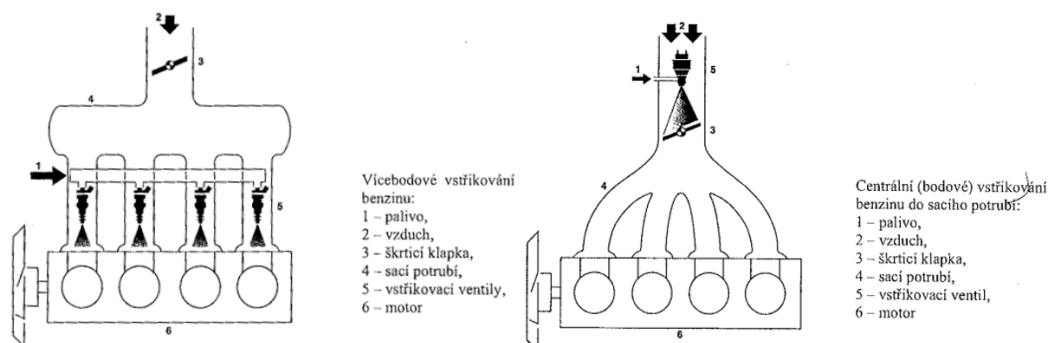
Obr. 5 Jednoduchý karburátor [12]

VSTŘIKOVÁNÍ

Od karburátorů se postupem času ustupovalo hned z několika důvodů. Jedním z největších je nižší měrná spotřeba paliva a vyšší měrný výkon při použití vstříkovačích zařízení, protože karburátor neumožňuje dokonalou přípravu směsi v celém provozním spektru otáček motoru. Vstříkování přineslo lepší regulaci vstříkovaného množství paliva a také rovnoměrnější rozdělení směsi do jednotlivých válců. Dalším faktorem byl tlak na snižování škodlivin ve výfukových plynech. Vstříkování se dělí na přímé a nepřímé, podle způsobu a místa promísení paliva se vzduchem. Zpočátku se používalo nepřímé vstříkování, poté ho vystřídalo vstříkování přímé a v současné době se využívá kombinace obou způsobů, která přináší benefity jednotlivých vstříkování. [1]

NEPŘÍMÉ VSTŘIKOVÁNÍ

U nepřímého vstříkování se palivo vstříkuje do sacího potrubí. Smísí se se vzduchem a do spalovacího prostoru už jde připravená směs. Výhodou je čištění sacích kanálů a dobré promíchání paliva se vzduchem ještě před sacím ventilem. Nepřímé vstříkování se rozděluje na centrální a vícebodové. U centrálního vstříkování se palivo vstříkuje do společné části sacího potrubí před škrticí klapkou, kde vytváří směs se vzduchem. Následně směs putuje do jednotlivých sacích potrubí. U vícebodového vstříkování je u každého válce jeden vstříkovač ventil. Ten palivo vstříkne do sacího potrubí, těsně před sací ventil. [10]

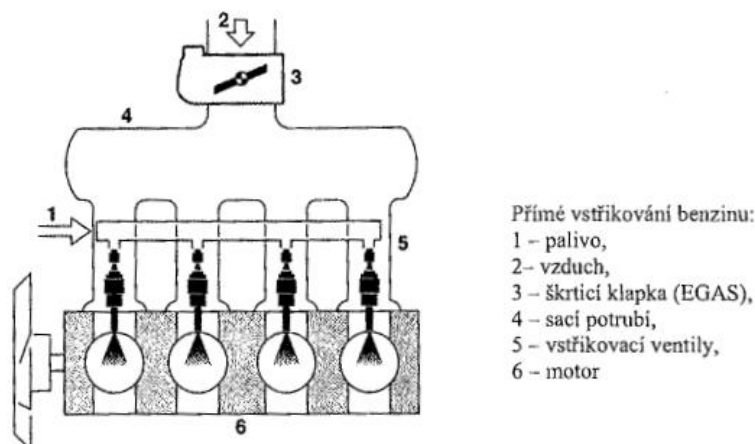


Obr. 6 Nepřímé vícebodové (vlevo) a centrální (vpravo) vstříkování [9]

PŘÍMÉ VSTŘIKOVÁNÍ

Při přímém vstříkování prochází sacím kanálem jenom vzduch a palivo je vstříkováno tryskou přímo do prostoru válce. Je tedy mnohem méně času na promísení směsi paliva se vzduchem, z toho důvodu musí být palivo vstříkováno pod větším tlakem než u nepřímého vstříku. Během provozu se musí docílit střídání mezi režimem vrstvené směsi a homogenní směsi. Při vrstveném plnění, které nastává při nízkém zatížení, dochází vlivem tvarování dna pístu k nasměrování proudu nasávaného vzduchu do spalovacího prostoru v hlavě válců, kde se nachází i zapalovací svíčka. Vstříknutím paliva do proudu vznikne v okolí zapalovací svíčky lokálně zapalitelná směs, zbytek prostoru vyplňuje směs chudá, nezapalitelná svíčkou, která je zapálena postupujícím plamenem. Při vyšším zatížení toto proudění zaniká a vzniká homogenní směs v celém objemu. Přímé vstříkování ve vysoké zátěži přináší velké výhody ve spotřebě paliva díky přesnému množství vstříknutého paliva v daný časový úsek přímo do válce motoru, kde ochlazuje spalovací prostor tím, že se odpařuje, což potlačuje vznik klepání. Nevýhody nastávají v režimu nízkého zatížení, kdy je problém s emisemi NO_x a uspořené palivo se

spotřebuje na regeneraci zásobníkového katalyzátoru NO_x . Dále nejsou čištěny sací kanály a také dochází k ředění oleje. [13]



Obr. 7 Přímé vstřikování benzínu [9]

DNEŠNÍ SITUACE

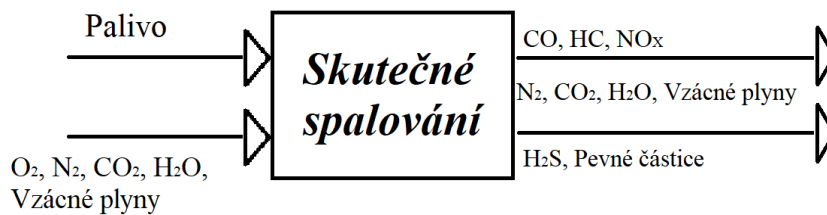
Moderní automobily se zážehovým motorem využívají kombinaci přímého a nepřímého vstřikování. Jedná se vždy o homogenní směs, vrstvená se již nepoužívá z důvodu emisí NO_x . V případě nízkého zatížení motoru je použito nepřímé vstřikování a v režimu vysokého zatížení motoru se aplikuje přímé vstřikování. Provoz motoru při kombinaci obou způsobů vstřikování vede ke snížení emisí a zároveň k čištění sacích ventilů a kanálů od zanášení karbonem. [14]

2.1.3 SPALOVÁNÍ

Ideálním spalováním nevznikají žádné jedovaté plyny. Vzniká pouze voda a oxid uhličitý, který není sám o sobě jedovatý, ale jeho nadprodukce zhoršuje vliv skleníkového efektu, viz Obr. 8. Z výfuku může odcházet i kyslík, pokud byl v čerstvé směsi v přebytku. V případě reálných motorů však ideální spalování nenastává, hovoří se tedy o spalování skutečném. To počítá s reálnými plyny a vzniká při snižujícím se kompresním poměru, nadměrně bohatou směsí nebo také nerovnoměrnou teplotou ve spalovacím prostoru. Při skutečném spalování se objevují už zdraví škodlivé látky, jako jsou nespálené uhlovodíky (HC) nebo oxidy dusíku (NO_x), konkrétně oxid dusný (NO) a oxid dusičitý (NO_2), což je možné vidět na Obr. 9. [12]



Obr. 8 Schéma ideálního spalování [12]

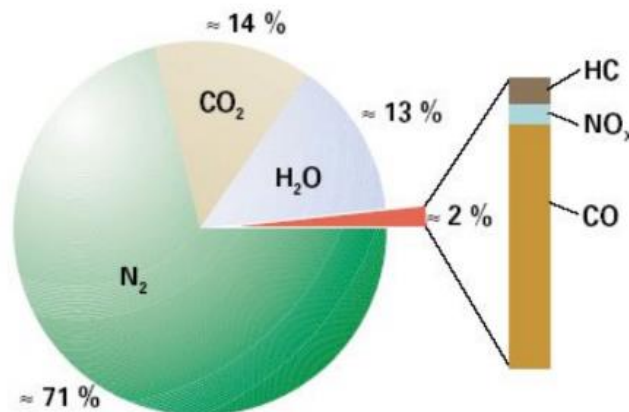


Obr. 9 Schéma skutečného spalování [12]

KLEPÁNÍ

Klepání, označované taktéž jako detonační spalování, nastává, pokud se směs paliva se vzduchem samovolně vznítí od horkého místa ve spalovacím prostoru dříve, než je zažehnuta jiskrou. Za normálního chodu motoru plamen šířící se směrem od svíčky postupuje rychlostí až 30 m/s. Pokud ovšem nastane klepání, plamen se začne šířit rychlostí několika stovek m/s. Klepání poškozuje motor, proto je potřeba ho co nejvíce eliminovat. Projevuje se klepavým chodem motoru a zmírnit ho můžeme ochlazováním horkých míst nebo palivem s vyšším oktanovým číslem nebo předstihem zážehu. [11]

2.1.4 PŘEHLED ŠKODLIVÝCH EMISNÍCH LÁTEK A EMISNÍ LIMITY



Obr. 10 Složení výfukových plynů u zážehových motorů [15]

OXID UHELNATÝ (CO)

Jedná se o bezbarvý plyn bez chuti a zápachu. Vzniká při nedokonalém spalování za nedostatku kyslíku ve směsi. Pro lidský organismus je toxický, váže se na hemoglobin a tím brání přenosu kyslíku z plic do krevního oběhu. Dále se také podílí na vzniku fotochemického smogu. V atmosféře oxiduje na oxid uhličitý. [15]

OXID UHLIČITÝ (CO₂)

Je to bezbarvý, stabilní plyn bez zápachu. Je produktem dokonalého spalování a vzniká slučováním uhlíku s kyslíkem. Je škodlivý pro lidský organismus pouze při vyšších koncentracích ve vzduchu (okolo 10 %). Jeho škodlivost spočívá v tom, že se jedná o skleníkový plyn. [16]

NESPÁLENÉ UHLOVODÍKY (HC)

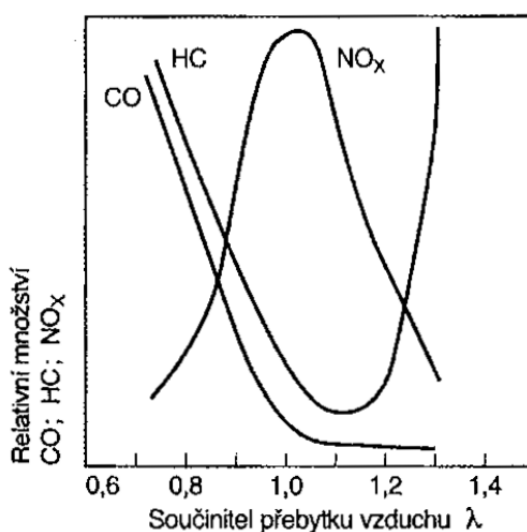
Vznikají při nedokonalém spalování. Nespálené uhlovodíky jsou částí paliva, u kterého byla předčasně zastavena oxidační reakce. Jsou to rakovinotvorné látky a mohou vykazovat až mimořádnou škodlivost ve spojení s pevnými částicemi. Vznikají při uhasínání plamene v chladnějších místech spalovacího prostoru, nejčastěji na stěnách válce. [15]

OXIDY DUSÍKU (NO_x)

Jedná se především o oxid dusný (NO) a oxid dusičitý (NO₂). Jsou to plyny, které se výrazně podílejí na tvorbě fotochemického smogu a kyselých dešťů. Vdechování NO₂ omezuje přísun kyslíku do plic a následně způsobuje dušení. Vznikají při vysokých tlacích a vysokých teplotách v oblasti chudé směsi. U zážehových motorů je koncentrace vyšší než u vznětových motorů, ovšem u zážehových je možné použít ke snížení množství NO_x trojčinný katalyzátor, který u vznětových motorů použít nelze. [15]

PEVNÉ ČÁSTICE (PM)

Pevné částice vznikají v místech s lokální bohatou směsí. Z toho vyplývá, že se vyskytují převážně u vznětových motorů, kde je kratší čas na homogenizaci paliva se vzduchem. U zážehových motorů je jejich množství asi třikrát menší z důvodu lepšího promísení směsi. Snižování množství pevných částic se provádí ve filtru pevných částic. Problém nastává, když se karcinogenní látky naváží na pevné částice, které je následně roznesou do lidského organismu. [15]



Obr. 11 Závislost součinitele přebytku vzduchu λ na množství emisí [10]

EMISNÍ LIMITY

V následující tabulce je maximální přípustná hodnota jednotlivých emisních škodlivin pro jednotlivé normy. Norma EURO 6 se od roku 2014 změnila, ovšem pouze ve způsobu měření, nikoliv v hodnotách škodlivin.

Tab. 1 Přehled emisních limitů pro zážehový motor [17]

Rok	Norma	CO [g/km]	NOx [g/km]	PČ [g/km]	HC [g/km]	HC + NOx [g/km]
1992	EURO 1	3,16	-	0,18	-	1,13
1996	EURO 2	2,2	-	0,08	-	0,5
2000	EURO 3	2,3	0,15	0,05	0,2	-
2005	EURO 4	1	0,08	0,025	0,1	-
2009	EURO 5	1	0,06	0,005	0,1	-
2014	EURO 6	1	0,06	0,005	0,1	-

2.1.5 OPATŘENÍ PRO SNIŽOVÁNÍ EMISÍ

KATALYZÁTOR

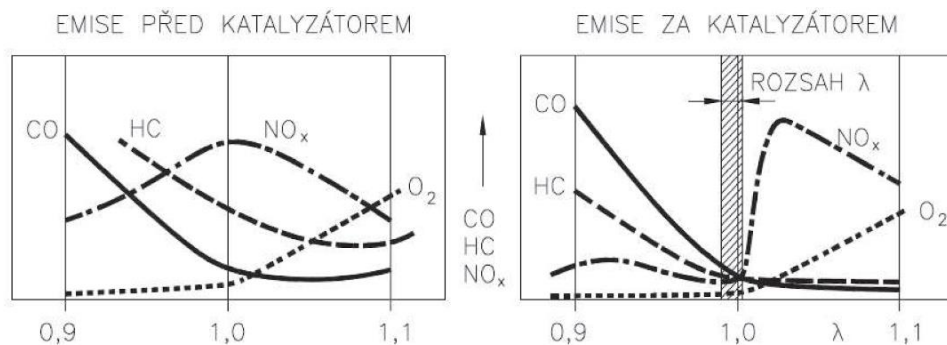
Katalyzátor je zařízení, které na základě chemicko-tepelné reakce snižuje množství škodlivin emisí ve výfukových plynech. Je umístěn těsně za motorem, z důvodu rychlejšího dosažení provozní teploty. Ta se pohybuje mezi 400 °C a 800 °C. Při teplotách nad 1000 °C dochází k přehřátí katalyzátoru a vyrazení z činnosti. V moderních autech se vyskytují tzv. předkatalyzátory, které čistí výfukové plyny, když katalyzátor ještě není dostatečně ohřátý. Důležitým prvkem pro účinné snižování škodlivin emisí je lambda sonda, která je umístěna ve výfukovém potrubí před katalyzátorem a měří množství zbytkového kyslíku ve výfukových plynech. Přeměna škodlivin CO, HC a NO_x na H₂O, CO₂ a N₂ je účinná pouze ve velmi úzkém rozmezí hodnoty součinitele přebytku vzduchu ($0,99 < \lambda < 1$). Lambda sonda zajišťuje zpětnou vazbu na složení výfukových plynů a tím může regulovat složení palivové směsi. U zážehových motorů se používá oxidační nebo oxidačně-redukční katalyzátor. [12]

OXIDAČNÍ (DVOJČINNÝ) KATALYZÁTOR

Pracuje s přebytkem vzduchu a přeměňuje oxid uhelnatý (CO) a nespálené uhlovodíky (HC) na oxid uhličitý (CO₂) a vodní páru (H₂O). Oxidy dusíku (NO_x) se tímto katalyzátorem prakticky nemění. U motorů se systémem vstřikování je potřebný kyslík dodáván v chudé zápalné směsi. Při použití karburátoru se potřebný vzduch přivádí před katalyzátor. [12]

OXIDAČNĚ-REDUKČNÍ (TROJČINNÝ) KATALYZÁTOR

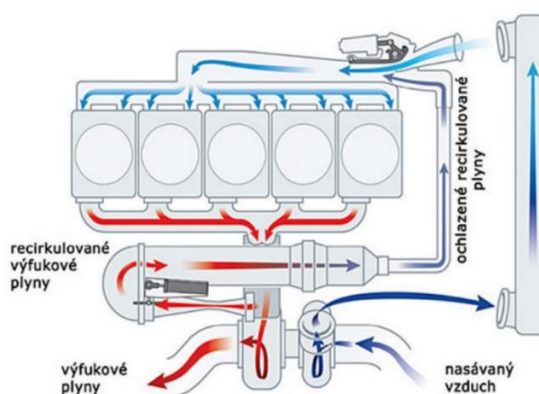
Tento katalyzátor, narozdíl od předešlého, snižuje množství všech tří škodlivých látek, a to s účinností až 95 %. Pro jeho správnou funkci je potřebný spolehlivý chod lambda regulace, bez které se jeho účinnost snižuje až na 50 %. [12]



Obr. 12 Množství emisí před a za trojčinným katalyzátorem [15]

RECIRKULACE VÝFUKOVÝCH PLYNŮ

Jednou z dalších možností, jak snížit množství emisí NO_x je recirkulace výfukových plynů. Část výfukových plynů se přivede zpátky do sacího potrubí. Výfukové plyny obsahují jen minimální množství kyslíku, proto se nezúčastňují spalování zápalné směsi a tím snižují teplotu ve spalovacím prostoru. Právě vysoká teplota je příčina tvorby NO_x . Aby horké výfukové plyny nesnižovali účinnost motoru, jsou chlazeny v chladiči. Při částečném zatížení může být v zážehovém motoru podíl výfukových plynů v sání až 20 %. Při překročení hranice podílu výfukových plynů a čerstvého vzduchu, dochází k nedokonalému spalování a nárůstu spotřeby paliva a množství uhlovodíků. [12]



Obr. 13 Recirkulace výfukových plynů [16]

FILTR PEVNÝCH ČÁSTIC

Úkolem filtru pevných částic je zachytávat škodlivé částice, které vznikají nedokonalým spálením špatně promíchané směsi ve spalovacím prostoru. Ačkoliv je množství pevných částic u zážehových motorů mnohem menší než u vznětových, jeho přítomnost je u většiny zážehových motorů nutná. Jakmile dochází k zanesení filtru, dochází k jeho regeneraci. Ta je řízena elektronicky a spočívá ve zvýšení teploty spalin a tím i dodatečnému spálení částic. U zážehových motorů je regenerace jednodušší oproti vznětovým motorům z důvodu vyšší teploty spalin. [18]

SYSTEM VYPÍNÁNÍ VÁLCŮ

Další důležitá inovace, která přináší úsporu paliva a snižuje množství emisí je systém vypínání válců. Tento systém je využíván v situacích, kdy je zatížení motoru nízké a není potřeba využívat celý objem motoru. Jedná se o např. o plynulou jízdu po dálnici nebo jízdu při nízkých rychlostech. Princip spočívá v uzavření ventilů určitých válců, tedy spalování probíhá jen v některých válcích. To s sebou nese i určité ztráty, protože všechny písty se stále pohybují, nicméně pozitivní efekt vypínání válců stále převažuje. [19]

2.1.6 SPOTŘEBA A ÚČINNOST

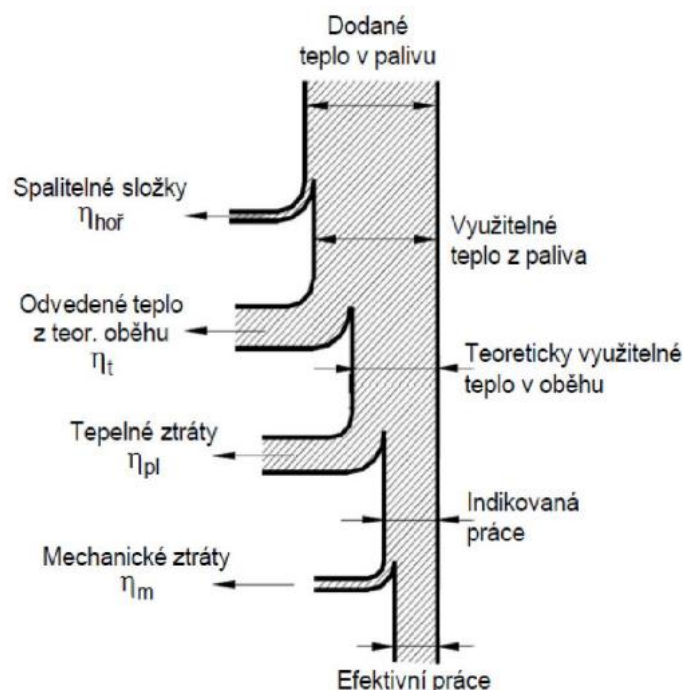
Spotřeba a s tím i spojená účinnost motoru závisí na mnoha faktorech, jako je konstrukce motoru, kvalita paliva, otáčky motoru, či zatížení motoru. Se snižující se spotřebou paliva, roste účinnost. Ta se může definovat jako poměr efektivní práce a energie, kterou přivádí palivo. Účinnost motoru je snižována ztrátami, které vznikají v průběhu celého procesu spalování viz Obr. 14. Z důvodu různých velikostí motorů a výkonů je zavedena měrná spotřeba paliva, díky které se můžou porovnávat, jakkoliv odlišné druhy motoru. Měrná spotřeba paliva se

udává jako spotřebovaná hmotnost paliva na jednotku výkonu za určitý čas a pro běžné zážehové motory se pohybuje mezi 220 až 340 g/kWh. [9]

$$m_p = \frac{M_p [kg/h]}{P [kW]}, \quad (2)$$

kde M_p je hodinová spotřeba a P je výkon motoru. Celková účinnost spalovacího motoru se poté může určit z vypočítané měrné spotřeby paliva m_p , efektivního výkonu P_e , který lze odebrat na hnacím hřídeli a spodní výhřevnosti paliva H_u , která se pro benzin udává 45 MJ/kg. V současné době se účinnost zážehového motoru pohybuje okolo 30 %. [9]

$$\eta = \frac{3600 * P_e}{m_p * H_u} \quad (3)$$



Obr. 14 Sankeyův diagram přeměny energie v palivu na efektivní práci [20]

2.2 AUTOMOBILY SE VZNĚTOVÝM MOTOREM

U automobilů se vznětovým motorem se vstřikované palivo do vzduchu ve válci motoru vznítí samovolně, vlivem nárůstu tlaku a teploty uvnitř válce. Oproti zážehovým motorům je směs u vznětových motorů řízena kvalitativně a ne kvantitativně. Znamená to, že pro vyšší výkon je do válce vstřikováno větší množství paliva, ale množství přiváděného vzduchu je pořád stejné. Vznětové motory pracují s velkým přebytkem vzduchu. [10] Kompresní poměr se pohybuje mezi 14 až 23 a teploty na konci kompresního zdvihu dosahují 900 °C. Běžné kompresní tlaky z vznětových motorů se nachází v rozmezí 1,9 až 3,4 MPa. [21]

2.2.1 PALIVA PRO VZNĚTOVÉ MOTORY

Pro automobily se vznětovými motory je nejběžnější palivo motorová nafta, která se vyrábí, stejně jako benzin, destilací ropy. Vzhledem k tomu, že se nafta zapaluje samočinně, požaduje se po ní snadné vznícení a optimální hodnota cetanového čísla. [10]

CETANOVÉ ČÍSLO

Podobně jako u oktanového čísla u zážehových motorů, udává cetanové číslo kvalitu spalování motorové nafty. Čím vyšší je cetanové číslo, tím se palivo snadněji vznítí. Příliš nízké cetanové číslo způsobuje nárůst tlaku ve spalovacím prostoru, zvyšuje spotřebu a snižuje výkon. K získání hodnoty cetanového čísla paliva se používá směs cetanu a 1-metylnaftalenu. Na zkušebním motoru se pozoruje, jak se chová dané palivo a porovnává se s chováním směsi cetanu a 1-metylnaftalenu. Objemové procentuální zastoupení cetanu udává cetanové číslo, které se v dnešní době pohybuje mezi 50 a 60. Minimální hodnota cetanového čísla pro naftu se udává 45. [10]

2.2.2 PŘÍPRAVA ZÁPALNÉ SMĚSI

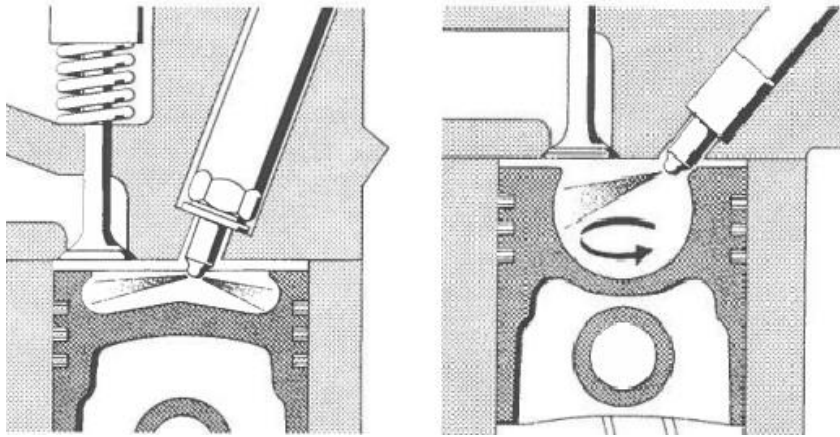
Narozdíl od zážehových motorů se u vznětových nevyskytuje škrtkací klapka a poměr vzduchu a paliva ve spalovacím prostoru je regulován pouze množstvím přiváděného paliva. Důležitou roli hraje také načasování vstřiku, vstřikovací tlak a směr vstřikování. Při správných podmínkách se dosahuje nízké spotřeby a emisí škodlivých látek. Kvůli nízké odpařitelnosti paliva, nelze využít vstřik paliva do sacího potrubí, jako tomu je u zážehových motorů s nepřímým vstřikováním. Palivo je tedy přivedeno přímo do prostoru válce kde se promísí se vzduchem, který se během kompresního zdvihu zahřeje až na teplotu 900 °C a směs se vznítí. Podle způsobu vstřikování rozlišujeme přímé a nepřímé vstřikování. [9]

VSTŘIKOVÁNÍ

Vstřikování paliva do vznětových motorů bylo už od vzniku těchto motorů velmi komplikované. Důležitým požadavkem pro správný chod motoru jsou vysoké tlaky a načasování vstřikování. V dnešní době je velmi rozšířený vstřikovací systém s tlakovým zásobníkem neboli Common Rail. Tento systém je složen z nízkotlakého a vysokotlakého okruhu. Do nízkotlakého okruhu patří palivová nádrž, filtr paliva a elektrické podávací čerpadlo. Vysokotlaká část se skládá z vysokotlakého čerpadla, zásobníku paliva a samotných vstřikovačů. Díky tomuto systému se palivo dokáže vstříknout do válce až tlakem 270 MPa. Common Rail také umožňuje měnit dávku vstříknutého paliva do spalovacího prostoru, která je určena řídicí jednotkou podle aktuální potřeby. [9]

PŘÍMÉ VSTŘIKOVÁNÍ

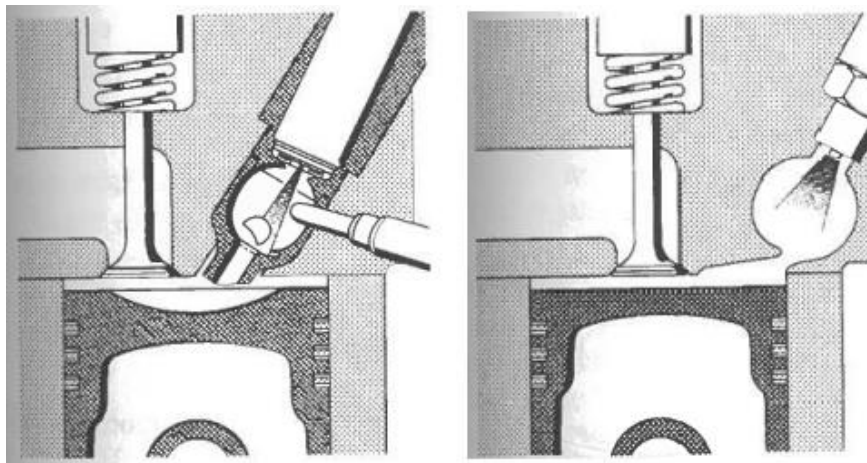
U vznětových motorů s přímým vstřikováním s neděleným spalovacím prostorem je spalovací prostor tvořen prohlubní ve dnu pístu. Palivo je vstřikováno do tohoto místa, kde se promísí s nasávaným vířícím vzduchem a následně se vznítí. Přímé vstřikování je úspornější na spotřebu paliva a umožňuje lepší startování motoru na nízkých teplot. V dnešní době jsou rozšířenější než motory s nepřímým vstřikováním, a to i díky moderním systémům, jako je Common rail. Vstřik je rozdělen na několik úseků, což způsobuje rozložení nárůstu tlaku ve válci v závislosti na čase, které vede ke snížení hluku a vibrací. [9]



Obr. 15 Přímé vstříkávání u vznětového motoru [9]

NEPŘÍMÉ VSTŘÍKOVÁNÍ

Spalovací prostor u motorů s nepřímým vstříkáváním je rozdělen na dvě části. První tvoří komůrka, kam je vstříkováno palivo a kde také začíná samotné hoření směsi. Komůrka je s hlavním spalovacím prostorem, který se nachází nad pístem, spojena kanálky. Podle konstrukce komůrky se vedlejší spalovací prostor může dělit na tlakovou nebo vírovou komůrku. Tlaková komůrka má v sobě nárazovou plošku, která rozdělí vstříknuté palivo a promísí ho se vzduchem. Ve vírové komůrce se během kompresního zdvihu vzduch rozvíří, kam se poté vstříkne palivo. Vznětové motory s nepřímým vstříkáváním se také označují jako motory s děleným spalovacím prostorem a v dnešní době se už nevyrobí z důvodu nižší účinnosti. [10]



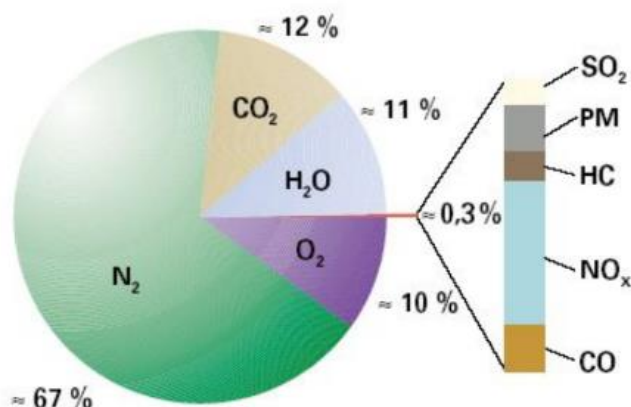
Obr. 16 Nepřímé vstříkávání s tlakovou komůrkou (vlevo) a s vírovou komůrkou (vpravo) [9]

2.2.3 EMISNÍ NORMY

Stejně jako u zážehových motorů, existují limity pro hodnoty množství vyprodukovaných emisních škodlivin i u vznětových motorů pro osobní automobily, viz Tab. 2. Škodlivé látky obsažené ve výfukových plynech jsou stejné jako u zážehových motorů, ale jejich koncentrace je jiná, jak je možné vidět na Obr. 17.

Tab. 2 Přehled emisních limitů pro vznětový motor [17]

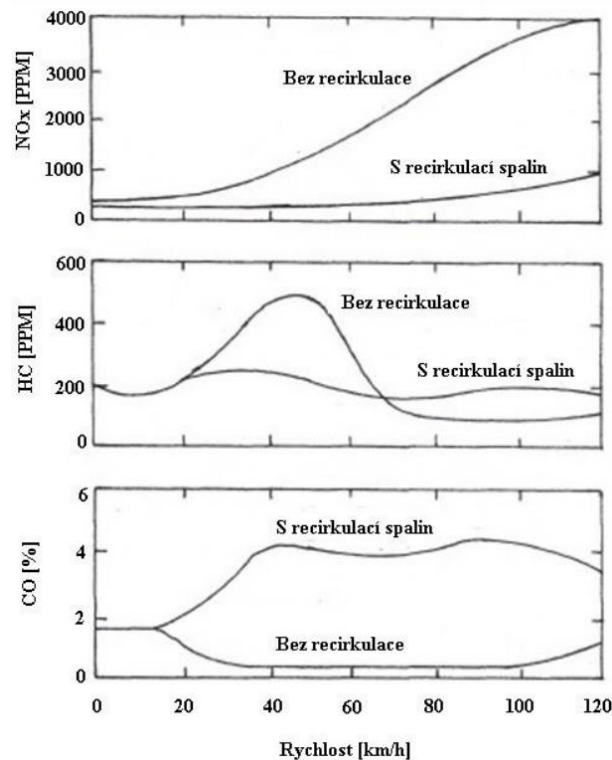
Rok	Norma	CO [g/km]	NOx [g/km]	PČ [g/km]	HC [g/km]	HC + NOx [g/km]
1992	EURO 1	3,16	-	0,18	-	1,13
1996	EURO 2	1	-	0,08	-	0,7
2000	EURO 3	0,64	0,5	0,05	0,2	0,56
2005	EURO 4	0,5	0,25	0,025	0,1	0,3
2009	EURO 5	0,5	0,18	0,005	0,1	0,23
2014	EURO 6	0,5	0,08	0,005	0,1	0,17



Obr. 17 Složení výfukových plynů u vznětových motorů [15]

2.2.4 OPATŘENÍ PRO SNIŽOVÁNÍ EMISÍ

Pro snižování množství emisí ve výfukových plynech se u vznětových motorů používají stejné nebo podobné systémy jako u zážehových motorů. U vznětových motorů ovšem není možné použít trojčinný katalyzátor, protože motor pracuje s výrazným přebytkem vzduchu. Využívají se oxidační katalyzátory, které snižují množství nespálených uhlovodíků a oxidu uhelnatého. Oxidy dusíku se redukuje například pomocí recirkulace výfukových plynů, jako tomu je u zážehových motorů nebo pomocí SCR katalyzátoru. Na Obr. 18 lze vidět, v jakém množství snižuje recirkulace výfukových plynů jednotlivé emisní složky. SCR katalyzátor pomocí chemické reakce přeměňuje oxidy dusíku na dusík a vodu. Nevýhodou je nutnost vstříkávání močoviny (AdBlue) před SCR katalyzátor a tím i potřeba mít nádrž na toto redukční činidlo, která je většinou na úkor palivové nádrže.



Obr. 18 Porovnání množství emisí s recirkulací výfukových plynů a bez ní [22]

2.2.5 SPOTŘEBA A ÚČINNOST

Stejně jako v kapitole 2.1.6 i u vznětových motorů závisí spotřeba a s tím i spjatá účinnost na konstrukci motoru, otáčkách a zatížení motoru a také kvalitě spalovaného paliva. Měrná spotřeba paliva u vznětových motorů se pohybuje mezi 180 a 280 g/kWh. Z toho vyplývá, že i účinnost vznětového motoru bude větší než u zážehového, konkrétně se jedná o hodnotu okolo 40 %. [9]

2.2.6 REPREZENTATIVNÍ PŘÍKLADY

Pro porovnání koncepcí automobilu se zážehovým motorem a vznětovým motorem je možné vybrat konkrétní automobily a určit jejich spotřebu a množství vyprodukovaných emisí. Jako zástupce automobilů se zážehovým motorem je vybrán osobní automobil Škoda Karoq s motorem, viz Obr. 19, o maximálním výkonu 81 kW, objemu válců 1,0 l, maximálním točivým momentu 200 Nm a minimální spotřebou 5,7 l/100 km. Škoda Auto [23] také udává, že minimální emise CO₂ jsou 130 g/km. Jako příklad automobilu se vznětovým motorem je použit osobní automobil Škoda Octavia s motorem, viz Obr. 19, o objemu válců 2,0 l, maximálním výkonu 85 kW, maximálním točivým momentu 300 Nm. Minimální spotřeba paliva je 4,1 l/100 km a minimální vyprodukované emise CO₂ jsou 107 g/km. [23] V dnešní době je limit CO₂ vypuštěného do ovzduší z výfukových plynů 95 g/km. Za každý překročený gram zaplatí automobilky 95 eur. Množství vyprodukovaných emisí se však počítá ze všech prodaných aut, tudíž elektromobily, které neprodukuje žádné lokální emise, toto číslo výrazně snižují.



Obr. 19 Motor 1,0 TSI 81kW (vlevo) a motor 2,0 TDI 85kW (vpravo) [23]

3 ELEKTROMOBILY

Elektromobily jsou v poslední době velmi oblíbeným způsobem dopravy. Nahrává jim také jejich ekologický provoz, protože neprodukují žádné lokální emise. V dnešní době je na ekologii kladen velký důraz, proto se už každý automobilový koncern zabývá výrobou a zdokonalováním elektromobilů. Je nutné podotknout, že ačkoliv nevypouští do ovzduší žádné škodlivé plyny, výrobou elektrické energie v elektrárnách se už emise produkují. Další jejich výhodou je nízká hlučnost při jízdě oproti hlučnějším automobilům se spalovacím motorem. Z finančního hlediska jsou i výhodnější na provoz. Pracují na principu akumulace elektrické energie v bateriích, která poté pohání elektromotor.

3.1 ELEKTROMOTORY

Elektromotor je točivý stroj, který je schopen přeměnit elektrickou energii na mechanickou práci. Dělí se na pohyblivou část – rotor a nepohyblivou část – stator. Vzduchová mezera mezi rotorem a státorem musí být co nejmenší, konkrétně se v praxi pohybuje v řádech desetin milimetrů. Otáčení rotoru je u většiny motorů způsobeno magnetickým polem, které vzniká na statoru vlivem přivedené elektrické energie. [24]

3.1.1 STEJNOSMĚRNÝ MOTOR

Stejnosemřné motory se dělí na motory se sériovým, cizím, derivačním a smíšeným buzením. Motor se sériovým buzením má nejjednodušší regulaci a je vhodný pro elektromobily. Jeho nevýhodou je, že nesmí pracovat bez zatěžovacího momentu, jinak hrozí poškození motoru. U motorů s cizím buzením je vinutí napájeno z cizího zdroje. Výhodou je snazší rekuperační brzdění a jednoduchá a plynulá regulace. Jejich maximální otáčky jsou 7000 min^{-1} , tudíž vyžadují víceúrovňovou převodovku. [24]



Obr. 20 Kartáčový stejnosměrný motor EC [25]

3.1.2 SYNCHRONNÍ MOTOR

Synchronní motory jsou napájené střídavým proudem, které hojně využívají sportovní elektromobily díky rychlému nástupu točivého momentu. Konstrukce těchto motorů může být s vinutím na rotoru nebo s použitím permanentních magnetů, které jsou v dnešní době

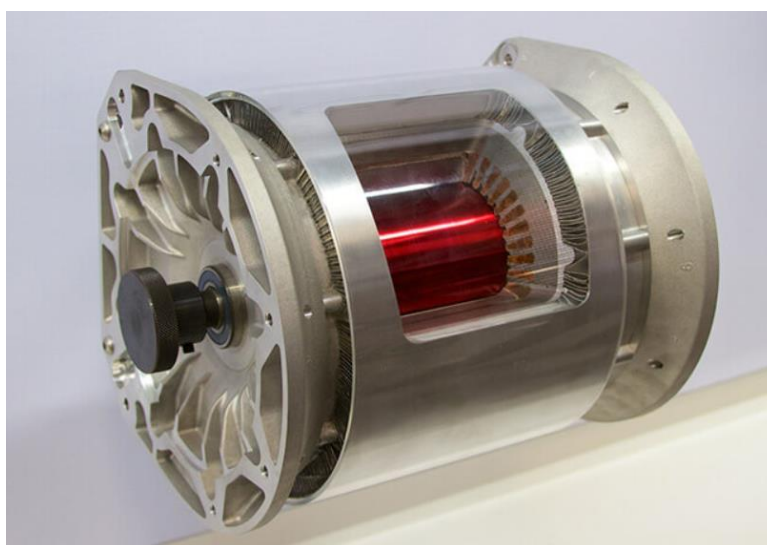
dominantnější. Oproti asynchronním motorům se rotor otáčí stejnou rychlostí jako magnetické pole. Mezi příklady vozidel, které používají synchronní motor s permanentními magnety jsou například Škoda Octavia iV, Porsche Taycan, či Audi e-tron GT. Speciálním příkladem je Škoda Enyaq iV s pohonem všech kol, který používá synchronní motor vzadu a asynchronní motor vpředu. [26]



Obr. 21 Synchronní motor Mitsubishi i-MiEV [27]

3.1.3 ASYNCHRONNÍ MOTOR

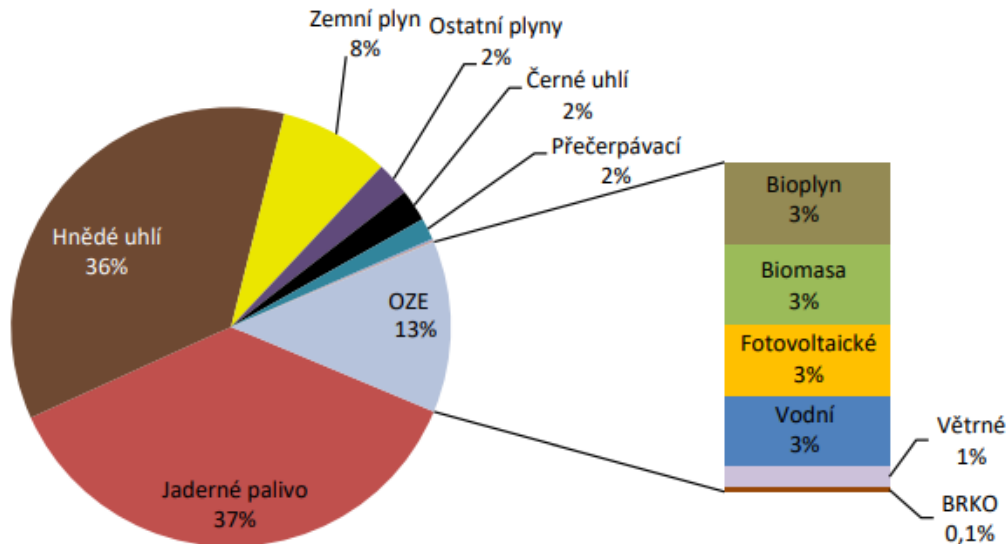
Střídavý asynchronní motor, též označován jako indukční motor se v dnešní době používá u větších elektromobilů díky své vysoké účinnosti při vyšších otáčkách a nižší ceně v porovnání se synchronním motorem. Vinutí na statoru je připojeno na zdroj napájení v elektromobilu a vytváří rotující magnetické pole. Tato rotace způsobuje indukci napětí v rotoru. Proud, který protéká rotorem zajišťuje silové působení mezi rotorem a státorem a tím roztáčí hřídel. Elektromobily používající asynchronní motory jsou Audi e-tron, Tesla Model S nebo Mercedes Benz EQC. [26]



Obr. 22 Asynchronní motor Tesla Model S [27]

3.2 VÝROBA ELEKTRICKÉ ENERGIE V ČR

Většina elektrické energie v ČR se vyrábí převážně v jaderných a uhelných elektrárnách. V roce 2020 se dle Energetického regulačního úřadu [28] vyrobilo 81 443 GWh elektrické energie, z toho bylo 37 % z jaderného paliva a 36 % z hnědého uhlí, viz Obr. 23.



Obr. 23 Podíl paliv na výrobě elektřiny [28]

Jak se uvádí u elektromobilů, neprodukují žádné emise. Ovšem během procesu výroby elektřiny, která je jako palivo pro elektromobily, emise vznikají. V Tab. 3 je znázorněno množství vyprodukovaných emisí v závislosti na hlavním palivu v elektrárnách, vztaženo na jednotku spotřeby u odběratele. V jaderných elektrárnách je množství emisí oproti ostatním zanedbatelné. [29]

Tab. 3 Množství emisí jednotlivých paliv v elektrárnách [29]

Typ elektrárny	Množství emisí [g/MWh]			CO ₂ [g/kWh]
	SO ₂	NO _x	CO	
Černouhelné	1360	1724	62,64	949,7
Hnědouhelné	1489	1333	164,8	1 061,6
Na zemní plyn	0,234	2841	956	497,7

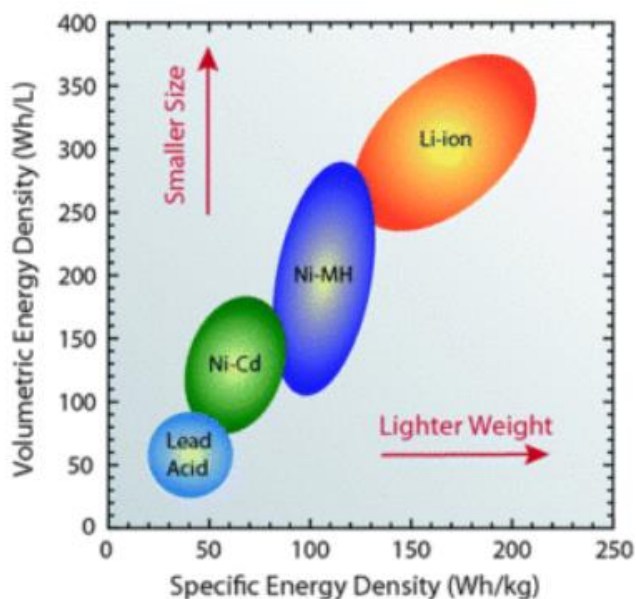
Pokud budeme uvažovat energetický mix v ČR, který udává poměr použitých paliv na výrobu elektrické energie, viz Obr. 23, a Tab. 3, můžeme spočítat průměrné množství jednotlivých emisí. To získáme vynásobením množství emisí a příslušného procentuálního zastoupení hlavního používaného paliva v elektrárnách, viz Tab. 4.

Tab. 4 Množství vyprodukovaných emisí na základě energetického mixu v ČR

	Množství emisí [g/MWh]			CO ₂ [g/kWh]
	SO ₂	NO _x	CO	
Energetický mix	563,3	741,6	137,1	441,0

3.3 AKUMULÁTORY

Akumulátory jsou nejtěžší a nejdražší zařízení v elektromobilu, které slouží k uchování energie. Nejčastěji se používají elektrochemické akumulátory, které mění elektrickou energii přivedenou ze zdroje na chemickou energii. Tento proces je vratný a akumulátor se může po vybití znovu nabít. Baterii tvoří bateriové články, které jsou uspořádány do bateriových modulů. Výhodou tvorby těchto modulů je lepší instalace jednotlivých modulů a v případě poruchy lze vyměnit pouze poškozený modul. Mezi důležité a sledované parametry akumulátorů je jejich kapacita, velikost, hmotnost ale i životnost, stárnutí a následná recyklace, což je v dnešní době velmi zmiňované téma. Jedním z vědeckých článků, které se zabývají recyklací baterií je Economics and Challenges of Li-Ion Battery Recycling from End-of-Life Vehicles, viz [30]. Kapacita baterie elektromobilu se udává v kWh a z toho vyplývající spotřeba kWh/100 km. [31]

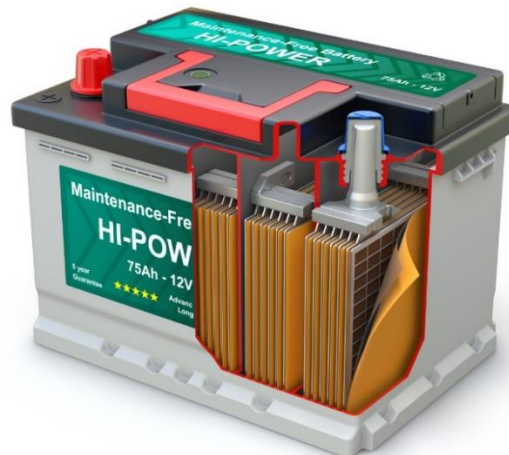


Obr. 24 Porovnání různých typů baterií z hlediska hustoty energie [32]

3.3.1 OLOVĚNÉ AKUMULÁTORY

Olověné akumulátory, které používaly elektromobily již na počátku 20. století, tvoří dvě elektrody a elektrolyt. Kladnou elektrodu pokrývá oxid olovičitý, u záporné elektrody se jedná o čisté olovo. Jako elektrolyt slouží kyselina sírová zředěná vodou. Nevýhodou olověných baterií je jejich pravidelná údržba. Při delší nečinnosti akumulátoru, který je i jen částečně vybitý, dochází k sulfataci na jeho elektrodách. Tento jev je nevratný a dochází ke snížení kapacity akumulátoru. Mezi další nevýhody patří nízká hustota energie (30–40 Wh/kg) a

životnost, která je 3 roky nebo 500–800 dobíjecích cyklů. Výhodou olověných baterií je nízká pořizovací cena a schopnost dodávat velké proudy. Olovo je toxický kov, a proto z ekologického pohledu nejsou olověné baterie vhodné. [7]



Obr. 25 Olověný akumulátor [33]

3.3.2 NIKL-KADMIOVÉ AKUMULÁTORY

Kladné elektrody těchto akumulátorů tvoří hydroxid hliníku a záporné hydroxid kademnatý. Elektrolyt je hydroxid draselný, který je zředěn destilovanou vodou. Nevýhodou je toxicita kadmia, které se nachází na záporné elektrodě. U nikel-kadmiových baterií dochází k paměťovému efektu, což znamená, že dochází ke snížení maximální kapacity baterie při opětovném nabíjení po částečném vybití. Na druhou stranu jim nevadí dlouhodobé úplné vybití a počet dobíjecích cyklů je přes 2000. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena a nízká hustota energie (40-60 Wh/kg). [7]

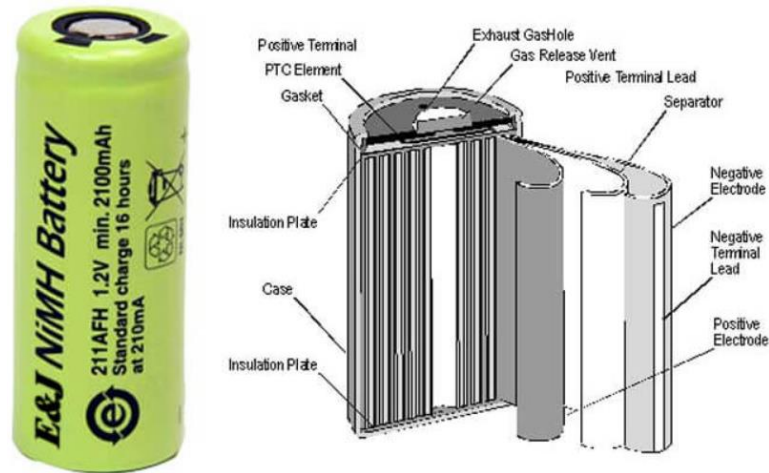


Obr. 26 Nikl-kadmiová baterie [34]

3.3.3 NIKL-METAL HYDRIDOVÉ AKUMULÁTORY

Oproti nikel-kadmiovým akumulátorům mají nikel-metal hydridové akumulátory více než dvojnásobnou kapacitu. Jsou také levnější a ekologičtější. Záporná elektroda je slitina lanthanu, kobaltu, manganu a hliníku. Kladnou elektrodu tvoří hydroxid nikelnatý. [24] Nevýhodou je

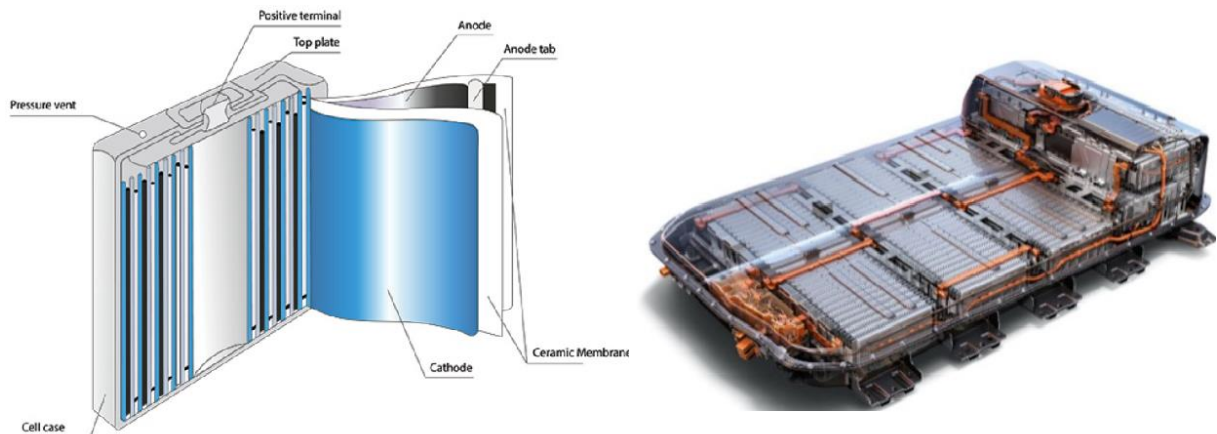
nižší hustota energie (30-80 Wh/kg) a nízká účinnost dobíjení. U nikl-metal hydridových baterií se projevuje paměťový efekt a jejich životnost se pohybuje okolo 1000 dobíjecích cyklů. [7]



Obr. 27 Nikl-metal hydridová baterie [34]

3.3.4 LITHIUM-IONTOVÉ AKUMULÁTORY

Lithiové ionty se pohybují mezi anodou a katodou. Lithium-iontové baterie mají velmi dobrý poměr energie na jednotku hmotnosti. Ačkoliv tyto baterie nemají paměťový efekt, projevuje se u nich stárnutí baterie, které může znamenat snížení kapacity až o 20 % za rok při teplotě 20 °C. S rostoucí teplotou roste i snižování kapacity. Nebezpečí u těchto baterií je, že v případě přehřátí může explodovat. Mají vysokou dobíjecí účinnost a hustotu energie (160 Wh/kg). [31]



Obr. 28 Průřez baterie a Lithium-iontová baterie z vozu Chevrolet Bolt EV [35] [36]

3.4 SPOTŘEBA A ÚČINNOST

Spotřeba elektromobilů se udává jako množství spotřebované elektrické energie na ujetou vzdálenost. Obvykle se jedná o kWh/100 km. Průměrná dnešní spotřeba u běžných elektromobilů se podle výrobců pohybuje mezi 15 až 23 kWh/100 km. Podle testů, které provádí německá skupina ACAD se zjistilo, že uváděná spotřeba výrobcí je nižší než skutečná.

V Tab. 5 lze vidět rozdíl udávané spotřeby a skutečné spotřeby na vybraných vozech. V průměru se jedná o rozdíl 4 kWh/100 km. [37]

Tab. 5 Porovnání skutečné a udávané spotřeby [37]

Vozidlo	Skutečná spotřeba [kWh/100 km]	Spotřeba udávaná výrobcem [kWh/100 km]	Rozdíl spotřeby [kWh/100 km]
Škoda Enyaq iV 80	21,9	16,7	5,2
Audi e-tron 55 quattro	25,8	23	2,8
Tesla Model Y Maximum Range AWD	21,2	16,9	4,3
Cupra Born e-Boost	21,2	15,5	5,7
Hyundai Kona Elektrik	16,7	14,7	2,0

Důležitým parametrem při sledování spotřeby, a tedy i účinnosti, je účinnost nabíjení. Při nabíjení vznikají ztráty a pro úplné nabití elektromobilu se spotřebuje větší množství energie, než je kapacita baterie. Účinnost nabíjení je podíl energie, kterou dostaneme (kapacita baterie) a spotřebované energie. V Tab. 6 jsou vypsány spotřebované energie, kapacity baterie a následně spočítána účinnost nabíjení pro stejná vozidla jako v Tab. 5. [37]

Tab. 6 Účinnosti nabíjení vybraných elektromobilů [37]

Vozidlo	Spotřebovaná energie [kWh]	Kapacita baterie [kWh]	Účinnost nabíjení [%]
Škoda Enyaq iV 80	86,9	77	88,6
Audi e-tron 55 quattro	94,3	83,6	88,7
Tesla Model Y Maximum Range AWD	88,6	79,0	89,2
Cupra Born e-Boost	62,6	58	92,7
Hyundai Kona Elektrik	72,8	64	87,9

3.5 REPREZENTATIVNÍ PŘÍKLAD

Jako reprezentativní příklad pro elektromobil byl zvolen vůz Škoda Enyaq iV s elektromotorem Clever iV 80, viz Obr. 29, o maximálním výkonu 150 kW a s maximálním točivým momentem 310 Nm. Elektromobil disponuje jednostupňovou převodovkou, baterií o kapacitě 77 kWh a minimální spotřebou 15,8 kWh/100 km. Vůz lze nabíjet jak stejnosměrným, tak střídavým proudem o výkonu 11 kW a využívá rekuperační brzdění, které zdatelně prodlužuje dojezd. [23]



Obr. 29 Elektromotor Clever iV 80 [23]

Elektromobil neprodukuje žádné lokální emise, ale z výše uvedených hodnot lze spočítat množství emisí vyprodukované elektrárnou na 100 km elektromobilu při průměrné spotřebě vozu a energetickém mixu v ČR. Výjimkou může být nabíjení z domácí fotovoltaické elektrárny, ovšem při cestování s elektromobilem na delší vzdálenosti není možné se nabíjení z jiných zdrojů vyhnout. Budeme počítat s hodnotou skutečné spotřeby naměřené v testech z Tab. 5 pro Škoda Enyaq iV, která je 21,9 kWh/100 km. Po vynásobení této hodnoty s jednotlivými emisemi dostaneme množství vyprodukovaných emisí pro výrobu elektřiny na 100 km tohoto vozu, viz Tab. 7.

Tab. 7 Emise vyprodukované elektrárnou pro Škoda Enyaq iV

	Množství vyprodukovaných emisí pro výrobu elektřiny [g/100 km]			
	SO ₂	NO _x	CO	CO ₂
Škoda Enyaq iV	12,336	16,241	3,002	9657,9

4 AUTOMOBILY S HYBRIDNÍM POHONEM

Hybridní pohon znamená kombinaci různých pohonných jednotek. Nejvíce používaná je kombinace spalovacího motoru a elektromotoru. Hybridní vozidlo poté využívá a kombinuje výhody jednotlivých pohonů. Spalovací motor má největší točivý moment při vysokých otáčkách, a naopak elektromotor vykazuje nejlepší vlastnosti z hlediska točivého momentu od nulových otáček. Díky této kombinaci se zvyšuje účinnost vozidla a tím se i snižuje spotřeba. Elektromotor také může pomáhat spalovacímu motoru při akceleraci, aby se dosáhlo co nejlepší účinnosti a co nejmenšího množství emisí. Právě nižší množství vyprodukovaných emisí je pro hybridní vozidla velkou výhodou a v dnešní době, když jsou emise velmi zmiňované téma, je jakýkoliv pokrok vítán. Dále hybridní vozidla využívají rekuperační brzdění, takže energie, která by se u vozidla poháněného jen spalovacím motorem přeměnila na odpadní teplo, se přes elektromotor, který slouží i jako generátor, vrátí do akumulátoru. Na Obr. 30 je možné vidět jeden z nejnovějších plug-in hybridů Toyota Prius. [7]



Obr. 30 Toyota Prius Plug-in hybrid [38]

4.1 TYPY HYBRIDNÍCH POHONŮ

Existují různé hybridní pohony, které se dělí podle stupně hybridizace. To znamená, že některé hybridní pohony využívají jeden pohon pouze jako pomocný a některé jsou schopny pracovat čistě se spalovacím motorem nebo čistě s elektromotorem.

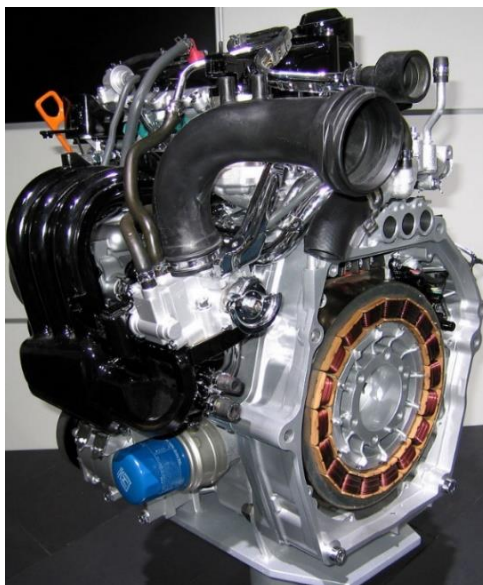
4.1.1 MICRO HYBRID

V této mikrohybridní technologii není použit žádný přídavný elektromotor ani akumulátor. Využívá se zde pouze 12V startovací akumulátor, který se dobíjí například rekuperačním brzděním. V tomto hybridu je aplikován systém start stop, který při městském provozu a častém brzdění částečně snižuje emise a množství spotřebovaného paliva. Jedná se o systém, který vypne motor vozidla při zastavení. Stejně jako dokáže sám vypnout motor, dokáže ho také sám zapnout. [7]

4.1.2 MILD HYBRID

Hybridy s touto technologií už v sobě mají umístěn vysokonapěťový akumulátor i elektromotor. Mild hybrid se dále dělí na sériovou a paralelní koncepci. U paralelní verze elektromotor pouze pomáhá spalovacímu motoru při akceleraci nebo rozjezdech a tím snižovat spotřebu i emise. Elektromotor není schopen pracovat sám, tudíž není možná jízda čistě v elektrickém režimu.

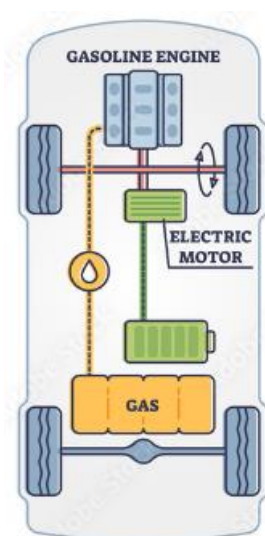
V sériové koncepci lze využít čistě energii z akumulátorů a jezdit v elektrickém režimu. Pro dobíjení akumulátoru využívá tento hybrid systém start stop, rekuperační brzdění, ale u některých typu je možné nabíjení ze sítě Plug-in hybrid. Příkladem paralelní koncepce mild hybrid je Honda Insight. Na místě setrvačnicku je umístěn elektromotor, viz Obr. 31. [7]



Obr. 31 Motor Honda Insight [7]

4.1.3 FULL HYBRID

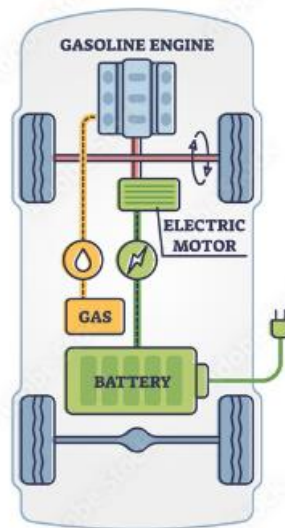
V této technologii už je možné vozidlo pohánět spalovacím motorem, elektromotorem nebo jejich kombinací. Full hybrid je vybaven akumulátory, které mají malou kapacitu a čistě v elektrickém režimu dokážou ujet pouze několik kilometrů. K dobíjení akumulátoru využívají spalovací motor a jsou vybaveny také systémem start stop, či rekuperačním brzděním. [39] Jako spalovací motor se může použít jak zážehový, tak vznětový. Jako elektrický pohon se používá převážně synchronní motor. [7]



Obr. 32 Schéma plně hybridního vozidla [40]

4.1.4 PLUG-IN HYBRID

Plug-in hybrid také obsahuje spalovací motor a elektromotor a je schopen tyto pohony využívat separátně i společně. Plug-in hybridy mají oproti full hybridům zdatně větší akumulátory a výkonnější elektromotory, proto pro jejich úplné dobíjení nestačí pouze rekuperační brzdění, ale je potřeba je dobíjet ze sítě 230 V nebo 380 V. Dojezdy na čistě elektrický pohon se pohybují v řádech desítek kilometrů. [7]



Obr. 33 Schéma plug-in hybridního vozidla [40]

4.2 REPREZENTATIVNÍ PŘÍKLAD

Jako příklad automobilu s hybridním pohonem byl zvolen plug-in hybrid Škoda Superb s motorem 1,4 TSI, maximálním výkonem 160 kW a maximálním točivým momentem 250 Nm, viz Obr. 34. Výrobce uvádí, že minimální spotřeba paliva je 1,0 l/100 km a minimální spotřeba elektrické energie 14,1 kWh/100 km. Emise CO₂ vyprodukované spálením paliva jsou od 23 g/km a lokální emise při provozu v elektrickém režimu jsou nulové. [23] Z výše uvedených údajů a z Tab. 5 lze dopočítat množství emisí vyprodukované elektrárnami pro minimální spotřebu tohoto vozu vynásobením těchto hodnot.

Tab. 8 Emise vyprodukované elektrárnou pro Škoda Superb plug-in hybrid

	Množství vyprodukovaných emisí pro vyrobení elektřiny [g/100 km]			
	SO ₂	NO _x	CO	CO ₂
Škoda Superb plug-in hybrid	7,943	10,457	1,933	6218,1

K výsledkům z čistě elektrického režimu je ještě potřeba přičíst hodnoty emisí od spalovacího motoru. Množství emisí CO₂ je podle výrobce 2300 g/100 km a ostatní škodlivé plyny se dají vypočítat z limitů pro vozidla se zážehovým motorem z Tab. 1. Ovšem tyto limity jsou pro čistě zážehové motory, proto se musí snížit na hodnotu, která zahrnuje spotřebu paliva

reprezentativního příkladu vozidla se zážehovým motorem (5,7 l/100 km) a spotřebu paliva hybridního vozidla (1,0 l/100 km). Po vynásobení podílu těchto hodnot a maximálních přípustných hodnot z Tab. 1 dostaneme maximální množství emisí přepočítané na spotřebu tohoto hybridu.

Tab. 9 Emise vyprodukované spalovacím motorem v Škoda Superb plug-in hybrid

	Množství emisí od spalovacího motoru [g/100 km]		
	NOx	CO	CO ₂
Škoda Superb plug-in hybrid	1,053	17,544	2300

Po sečtení hodnot z Tab. 8 a Tab. 9 dostaneme výsledné množství emisí vyprodukované za jízdu 100 km v Škoda Superb plug-in hybrid ze spalovacího motoru a elektrárny.

Tab. 10 Celkové množství vyprodukovaných emisí pro Škoda Superb plug-in hybrid

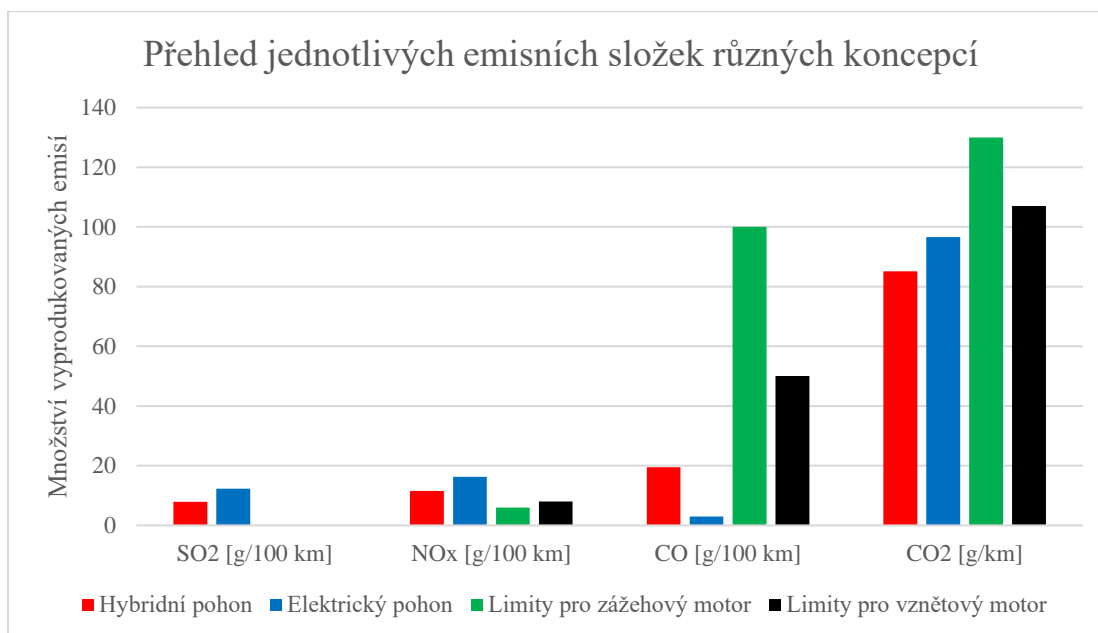
	Celkové množství jednotlivých emisí [g/100 km]		
	NOx	CO	CO ₂
Škoda Superb plug-in hybrid	11,51	19,477	8518,1



Obr. 34 Hybridní motor 1,4 TSI 160 kW [23]

5 POROVNÁNÍ REPREZENTATIVNÍCH PŘÍKLADŮ VOZIDEL Z HLEDISKA EMISÍ A SPOTŘEBY

Z výše uvedených tabulek lze porovnat množství jednotlivých vyprodukovaných emisních složek konkrétních příkladů pro různé koncepce pohonu, viz Graf 1. Reprezentativní příklady pro porovnání byly zvoleny tak, aby si byla vozidla co nejvíce podobná ze všech hledisek. Vzhledem k nedostatku informací o konkrétních vozidlech Škoda Karoq a Škoda Octavia jako příklady automobilu se zážehovým a vznětovým motorem, jsou u emisí, CO a NO_x uvedeny limitní hodnoty, které může vozidlo vyprodukovat. U emisí CO₂ jsou hodnoty uváděné přímo automobilkou Škoda Auto [23]. Je vidět, že množství vyprodukovaného oxidu uhličitého je největší u zážehového motoru, naopak nejmenší produkci má hybridní vozidlo. Zajímavostí je znázornění oxidů dusíku, kde je vidět, že restrikce omezující množství této látky u spalovacích motorů jsou tak přísné, že elektrárna vyprodukuje dvakrát větší množství na stejný dojezd vozidla.

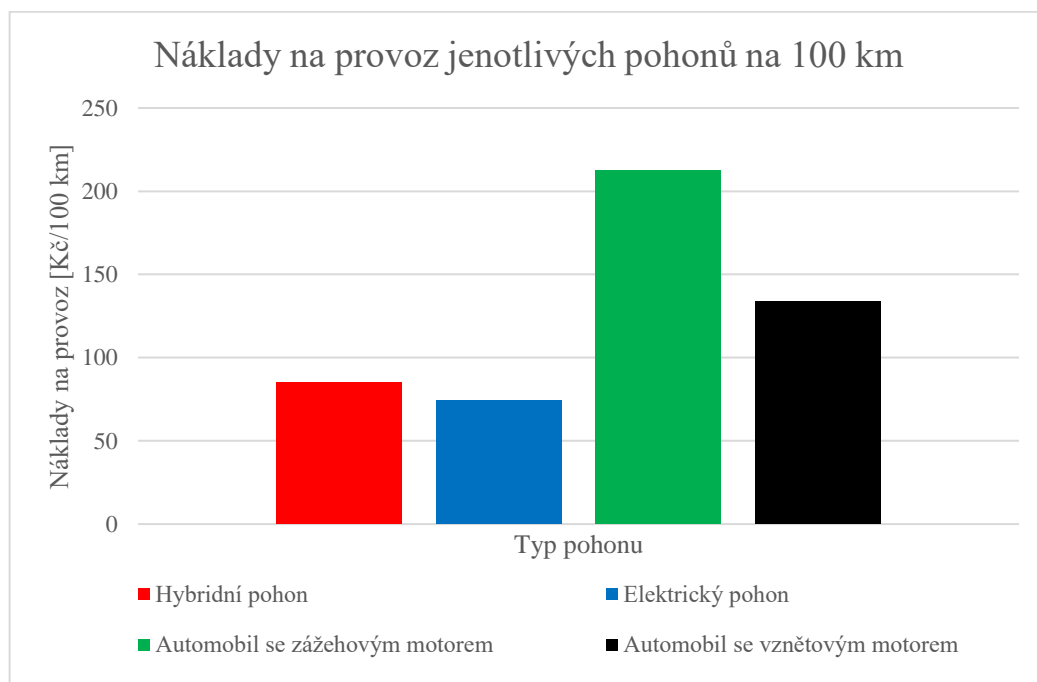


Graf 1 Přehled množství jednotlivých emisních složek různých koncepcí

Graf 2 znázorňuje finanční náklady na provoz různých koncepcí pohonu v Kč/100 km. Hodnoty jsou vypočítány podle ceny elektrické energie k 3.5.2023, která činí 3,4 Kč/kWh. Cena benzínu je brána 37,3 Kč/l a cena nafty 32,6 Kč/l. Vynásobením těchto cen spotřebou konkrétního vozidla, dostaneme hodnotu nákladů na 100 km jízdy vozidla. Je důležité zmínit také náklady na koupi jednotlivých vozidel. V Tab. 11 jsou znázorněny ceny všech reprezentativních příkladů.

Tab. 11 Přehled pořizovacích cen reprezentativních příkladů vozidel [23]

	Škoda Karoq	Škoda Octavia	Škoda Enyaq	Škoda superb plug-in hybrid
Pořizovací cena [Kč]	665 900	659 900	1 364 900	1 144 900



Graf 2 Náklady na provoz jednotlivých pohonů

ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce bylo porovnat provoz elektricky poháněných vozidel, hybridních vozidel a vozidel se spalovacím motorem. Byl popsán vznik jednotlivých složek emisí škodlivin produkovaných ze spalovacího motoru a zároveň vypsány limity emisí, které v současné době může automobil se spalovacím motorem vypouštět. Kvůli těmto limitům jsou zavedena různá opatření, která cílí na snižování množství škodlivin ve výfukových plynech. Nejúčinnější a v praxi nejpoužívanější jsou katalyzátory, filtry pevných částic, recirkulace spalin a systém vypínání válců. Všechna tato opatření jsou v této práci detailněji popsána.

Elektromobily přímé emise neprodukuje, ale výroba elektrické energie v některých elektrárnách už nezanedbatelné množství škodlivých látek přináší. Největší podíl na vzniku těchto látek mají hnědouhelné elektrárny, které tvoří 36 % všech elektráren v České republice. Dále jsou uvedeny hodnoty jednotlivých emisí vyprodukované energetickým mixem České republiky, který zahrnuje podíl všech typů elektráren. Ekologické i finanční výhody elektromobilu by se ovšem zvýšily, pokud by byl elektromobil nabíjen pouze z obnovitelných zdrojů, jako jsou třeba fotovoltaické panely, které mohou být umístěny na střeše rodinného domu.

Všechny zjištěné a vypočtené hodnoty emisí a spotřeby byly použity pro porovnání vybraných reprezentativních příkladů vozidel a výsledky byly graficky znázorněny. Ačkoliv elektromobilita zažívá velký nástup, také díky její šetrnosti vůči životnímu prostředí, výpočty ukazují, že množství oxidů dusíku vyprodukovaných elektrárnou pro provoz elektromobilu je dvakrát větší než limit pro automobily se zážehovým motorem. Naopak množství oxidu uhelnatého je znatelně menší při jízdě na elektřinu. Z hlediska oxidu uhličitého, který se často zmiňován kvůli svému přispívání ke skleníkovému efektu a tím i globálnímu oteplování, vychází elektromobilita mírně příznivěji. Nejméně oxidu uhličitého produkuje svojí jízdou hybridní vozidlo, které kombinuje výhody elektropohonu a spalovacího motoru.

Následně byly pomocí spotřeby a cen elektřiny a pohonných hmot vypočteny náklady na provoz jednotlivých koncepcí a uvedeny pořizovací ceny reprezentativních příkladů. Nejlevnější koncepce pro provoz je automobil s čistě elektrickým pohonem Škoda Enyaq, jehož provoz stojí 74,46 Kč/100 km, pokud bude nabíjen například doma nebo v práci za výše uvedenou cenu. Velký rozdíl by nastal, kdyby byl vůz nabíjen z rychlonabíjecích stanic, které si účtují násobně více Kč/kWh. O trochu lépe je na tom hybridní vozidlo Škoda Superb, které ujede 100 km za 85,24 Kč. Náklady na jízdu automobilů se spalovacím motorem už vycházejí podstatně hůř, konkrétně Škoda Octavia se vznětovým motorem 133,66 Kč/100 km a Škoda Karoq se zážehovým motorem vychází na 212,61 Kč/100 km. Zahrnout se také musí pořizovací cena, která je u elektromobilu největší, konkrétně 1 364 900 Kč. Naopak nejlevnější vozidla na pořízení jsou automobily se spalovacím motorem.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] PILÁRIK, Milan a Jiří PABST. *Automobily: pro obor vzdělání Automechanik*. 3., přeprac. vyd. Praha: Informatorium, 2014. ISBN 978-80-7333-104-7.
- [2] REMEK, Branko. *Automobil a spalovací motor: historický vývoj*. První. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-3538-2.
- [3] Historie automobilismu. In: *Auta ve škole* [online]. drh: dht, 2011 [cit. 2023-02-13]. Dostupné z: http://autaveskole.jaknahmyz.cz/historie_automobilismu
- [4] WAGENKNECHT, Martin. Historie elektromobilů. In: *Fdrive.cz* [online]. 24net s.r.o., 2016 [cit. 2023-04-05]. Dostupné z: <https://fdrive.cz/clanky/1-era-elektromobilu-185>
- [5] DROBNÝ, Josef. Historie pohonů vozidel. In: *Hydro-race* [online]. 2021 [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <https://hydro-race.eu/Historie-pohon%C5%AF-vozidel>
- [6] ČERMÁK, Ladislav a Marek TOMÍŠEK. Historie hybridního pohonu v různých dopravních prostředcích. In: *Fdrive.cz* [online]. 24net s.r.o., 2021 [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: <https://fdrive.cz/clanky/historie-hybridniho-pohonu-v-ruznych-dopravnich-prostredcich-7539>
- [7] FRYBERT, Jan, Ján LACKO, Petr MUDRÁK, Jan SLANINA a Martin TRAUTMAN. *Alternativní pohony*. Brno: Integrovaná střední škola automobilní, 2015, 125 stran : ilustrace (převážně barevné). ISBN 978-80-260-7548-6.
- [8] HORČÍK, Jan. Historie hybridních aut, 1. díl. In: *Hybrid* [online]. Chamanne s.r.o., 2007 [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <https://www.hybrid.cz/historie-hybridnich-aut-1-dil/>
- [9] VLK, František. *Vozidlové spalovací motory*. 1. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-238-8756-4.
- [10] VLK, František. *Paliva a maziva motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: Prof.Ing.František Vlk, DrSc, 2006, 376 s. : il. ISBN 80-239-6461-5.
- [11] ŠTĚTINA, Josef. Teorie spalovacích motorů: Paliva a spalování. In: *Termomechanika online* [online]. 2021 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://drive.google.com/file/d/1O0LJ5fKPmSVnvaFAx49ZUVTVq51YO0Og/view>
- [12] JAN, Zdeněk a Bronislav ŽDÁNSKÝ. *Automobily*. 2., aktualiz. vyd. Brno: Avid, 2008. ISBN 978-80-87143-08-7.
- [13] BROŽA, Petr a Marek LITZMAN. Přímý vstřík benzínu. In: *Autorevue* [online]. 2005 [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <https://www.autorevue.cz/primy-vstrik-benzinu-revoluce->

nebo-evoluce_2?fbclid=iwar1q9aj8llef dawuswlk yzm_ ynejyql8d8l ggw-q1nnyrlok-0w4qrp2guy

- [14] DUSIL, Tomáš. Vstřikování benzínu včera a dnes. In: *Auto.cz* [online]. 2017 [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/vstrikovani-benzinu-vcera-a-dnes-primy-nebo-neprimy-vstrik-a-co-treba-oba-102151>
- [15] ŠTĚTINA, Josef. Teorie spalovacích motorů: Emise výfukových plynů. In: *Termomechanika online* [online]. 2021 [cit. 2023-05-01]. Dostupné z: <https://drive.google.com/file/d/1O6HmLEr7sacglnSG3zeFxmMvsFk7sjJp/view>
- [16] Emise spalovacích motorů. In: *Slideplayer.cz* [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/1915312/>
- [17] Emisní normy a třídy automobilů tabulky. In: *Kralmotoru.cz* [online]. 2017 [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://kralmotoru.cz/media/emisni-normy-a-tridy-automobilu-tabulky>
- [18] MIHÁLIK, Miro. Filtry pevných částic se stěhují do benzinových motorů. In: *Autorevue* [online]. CZECH NEWS CENTER a.s, 2018 [cit. 2023-04-27]. Dostupné z: <https://www.autorevue.cz/filtry-pevnych-castic-se-stehuji-do-benzinovych-motoru-jsou-strasakem>
- [19] VAVERKA, Lukáš. Vypínání válců u benzinových motorů. In: *Autobible.euro* [online]. Internet Info, s.r.o., 2019 [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://autobible.euro.cz/clanky/vypinani-valcu-u-benzinovych-motoru-snizeni-spotreby/>
- [20] ŠTĚTINA, Josef. Teorie spalovacích motorů: Moment, výkon, účinnost. In: *Termomechanika online* [online]. 2021 [cit. 2023-05-06]. Dostupné z: <https://sites.google.com/vutbr.cz/termomechanika/doma/teorie-spalovac%C3%ADch-motor%C5%AF-qts>
- [21] Měření kompresních tlaků. In: *STROJE* [online]. 2014 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://matur-svoboda.estranky.cz/clanky/servis-a-opravy/mereni-kompresnich-tlaku.html>
- [22] HEISLER, Heinz. *Advanced engine technology*. Oxford, UK: Elsevier, 1995. ISBN 978-0-340-56822-4.
- [23] Škoda auto. In: *Škoda auto* [online]. Škoda Auto a.s., 2023 [cit. 2023-05-02]. Dostupné z: <https://www.skoda-auto.cz/>
- [24] VLK, František. *Alternativní pohony motorových vozidel*. 1. vydání. Brno: Prof.Ing.František Vlk,DrSc., nakladatelství a vydavatelství, 2004, 234 stran : černobílé ilustrace. ISBN 80-239-1602-5.

- [25] *Stejnoseměrné motory* [online]. Raveo s.r.o. [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <http://www.stejnosmerne-motory.cz/>
- [26] DITTRICH, Lukáš. Elektromotory – Synchronní vládné. In: *Automobil* [online]. 2022 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: https://www.automobilrevue.cz/rubriky/presunuto-na-trucker-cz-truck-bus/predstavujeme/elektromotory-synchronni-vladne_48530.html
- [27] Motor elektrického vozidla - druhy a princip činnosti. In: *HEVCars* [online]. 2017 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: <https://hev cars.com.ua/reviews/dvigatel-elektromobilya/>
- [28] *Energetický regulační úřad* [online]. Jihlava, 2020 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.eru.cz/>
- [29] Emise.cz. In: *Emisní faktory při výrobě elektrické energie v ČR* [online]. KONEKO marketing, spol. s r.o., 2020 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://emise.cz/>
- [30] STEWARD, Darlene, Ahmad MAYYAS a Margaret MANN. *Economics and Challenges of Li-Ion Battery Recycling from End-of-Life Vehicles* [online]. 8 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919305104>
- [31] Elektromobily a jejich baterie. In: *Evexpert.cz* [online]. EVEXPERT.CZ © 2022, 2022 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.evexpert.cz/eshop/znalostni-centrum/elektromobily-a-jejich-baterie>
- [32] LITHIUM-ION BATTERY. In: *CLEAN ENERGY INSTITUTE* [online]. 2020 [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.cei.washington.edu/education/science-of-solar/battery-technology/>
- [33] Jak funguje olověný akumulátor?. In: *Tzbinfo* [online]. Topinfo s.r.o., 2017 [cit. 2023-05-20]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/16090-jak-funguje-oloveny-akumulator>
- [34] TECHNOLOGY - EXL Battery. In: *EXL* [online]. E&J Technology Group Co.,Ltd. [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://exlbattery.com/technology/>
- [35] Types of Lithium Batteries: Lithium Cell Design. In: *OneCharge* [online]. [cit. 2023-05-21]. Dostupné z: <https://www.onecharge.biz/lithium-cell-design/>
- [36] DIOPAN, Václav. Co nahradí lithium? Hledá se náhrada pro baterie budoucnosti. In: *Hybrid.cz* [online]. Chamanne s.r.o., 2017 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://www.hybrid.cz/co-nahradi-lithium-hleda-se-nahrada-pro-baterie-budoucnosti/>
- [37] Elektroautos im Test: So hoch ist die Reichweite wirklich. In: *ACAD* [online]. 2023 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/tests/stromverbrauch-elektroautos-adac-test/>
- [38] MÁRA, Ondřej. Nová Toyota Prius oficiálně: V Evropě jen jako plug-in hybrid s výrazně lepšími bateriemi. In: *Auto.cz* [online]. CZECH NEWS CENTER a.s., 2022 [cit. 2023-05-19].

Dostupné z: <https://www.auto.cz/nova-toyota-prius-oficialne-v-evrope-jen-jako-plug-in-hybrid-s-vyrazne-lepsi-baterii-146553>

- [39] Full hybrid vs plug-in hybrid vs mild hybrid: Which is best for you?. In: *Leasing.com* [online]. 2021 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://leasing.com/guides/hybrid-vs-plug-in-hybrid-vs-mild-hybrid/>
- [40] Types of electric vehicles. In: *Stock.adobe* [online]. [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://stock.adobe.com/cz/images/types-of-electric-vehicles-with-labeled-battery-and-motor-outline-diagram-educational-scheme-with-hybrid-plug-in-and-electricity-car-power-supply-vector-illustration-compared-model-differences/431936580>

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

CO_2	[-]	Oxid uhličitý
HC	[-]	Nespálené uhlovodíky
H_u	[MJ/kg]	Výhřevnost paliva
M_p	[kg/h]	Hodinová spotřeba paliva
m_p	[kg/kWh]	Měrná spotřeba paliva
N_2	[-]	Dusík
NO	[-]	Oxid dusný
NO_2	[-]	Oxid dusičitý
NO_x	[-]	Oxidy dusíku
P	[kW]	Výkon motoru
P_e	[kW]	Efektivní výkon
PM	[-]	Pevné částice
SCR	[-]	Selective catalytic reduction (Selektivní katalytická redukce)
η	[-]	Účinnost
λ	[-]	Součinitel přebytku vzduchu