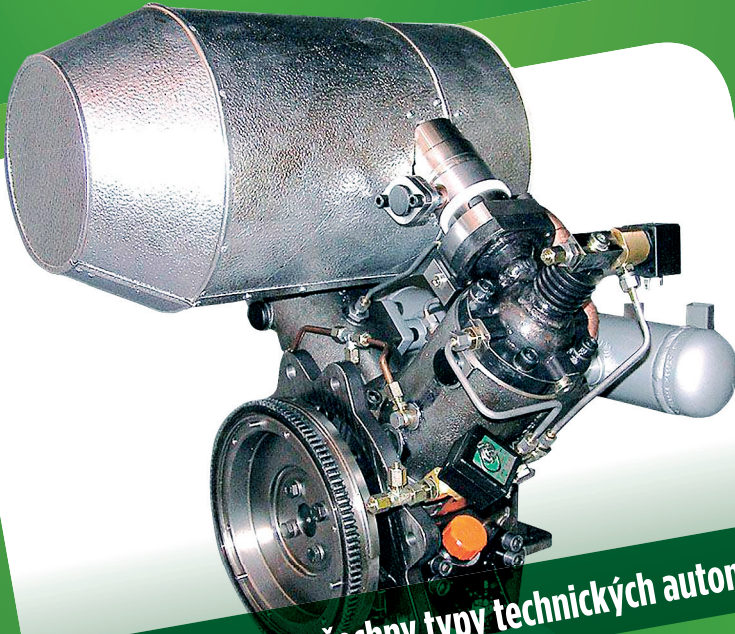


Jan Hromádko

# Speciální spalovací motory a alternativní pohony



Komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol



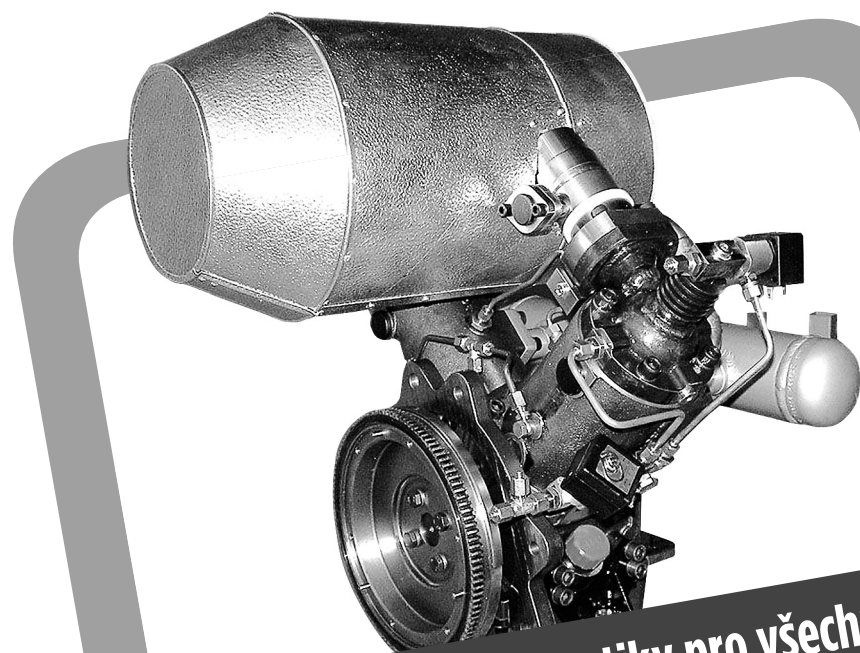
- spalovací turbína, Stirlingův a Wankelův motor, parní motor
- elektromobily
- hybridní pohony
- plynná paliva a biopaliva
- analýza a budoucnost alternativních pohonů





Jan Hromádko

# **Speciální spalovací motory** a alternativní pohony



**Komplexní přehled problematiky pro všechny typy  
technických automobilních škol**

Grada Publishing a.s.

### **Upozornění pro čtenáře a uživatele této knihy**

Všechna práva vyhrazena. Žádná část této tištěné či elektronické knihy nesmí být reprodukována a šířena v papírové, elektronické či jiné podobě bez předchozího písemného souhlasu nakladatele. Neoprávněné užití této knihy bude **trestně stíháno**.

**Ing. Jan Hromádko, Ph.D.**

# **Speciální spalovací motory a alternativní pohony**

**Komplexní přehled problematiky  
pro všechny typy technických automobilních škol**

---

TIRÁŽ TIŠTĚNÉ PUBLIKACE:

Vydala Grada Publishing, a.s.  
U Průhonu 22, Praha 7  
obchod@grada.cz, www.grada.cz  
tel.: +420 234 264 401, fax: +420 234 264 400  
jako svou 5002. publikaci  
Odpovědná redaktorka ing. Šárka Němečková  
Sazba Artedit, spol. s r. o.  
Počet stran 160  
První vydání, Praha 2012  
Vytiskly Tiskárny Havlíčkův Brod, a. s.

Recenzoval: Ing. Pavel Štěrba

© Grada Publishing, a.s., 2012  
Cover Design © Grada Publishing, a.s., 2012

*Názvy produktů, firem apod. použité v knize mohou být ochrannými známkami  
nebo registrovanými ochrannými známkami příslušných vlastníků.*

**ISBN 978-80-247-4455-1**

---

TIRÁŽ ELEKTRONICKÉ PUBLIKACE:

**ISBN 978-80-247-7079-6 (ve formátu PDF)**  
**ISBN 978-80-247-7080-2 (ve formátu EPUB)**

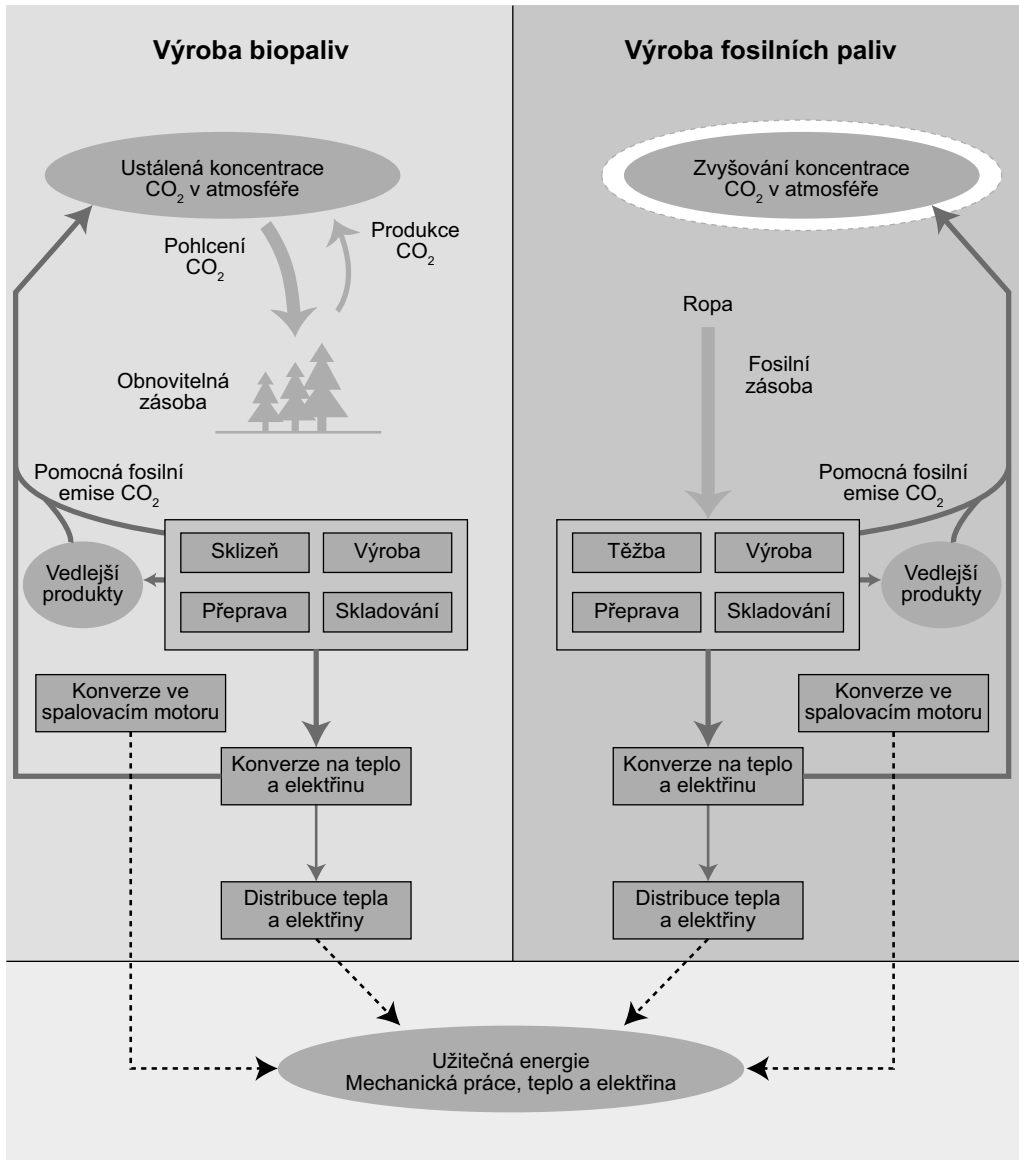
# Obsah

<b>Předmluva</b> .....	9
<b>1. Úvod</b> .....	11
1.1 Problematika produkce oxidu uhličitého .....	11
1.2 Spotřeba fosilních paliv .....	14
1.3 Produkce škodlivých emisí .....	16
<b>2. Spalovací motory speciální konstrukce</b> .....	19
2.1 Spalovací turbína .....	19
2.1.1 <i>P-V diagram a tepelná účinnost spalovací turbíny</i> .....	21
2.1.2 <i>Zvýšení účinnosti spalovací turbíny</i> .....	22
2.1.3 <i>Vozidla se spalovací turbínou</i> .....	23
2.2 Stirlingův motor .....	24
2.2.1 <i>Historický vývoj Stirlingova motoru</i> .....	25
2.2.2 <i>Princip funkce současného Stirlingova motoru</i> .....	26
2.2.3 <i>Modifikace Stirlingova motoru</i> .....	28
2.2.4 <i>Aplikace Stirlingova motoru</i> .....	28
2.2.5 <i>Stirlingův motor firmy Tedom</i> .....	31
2.2.6 <i>Výhody Stirlingova motoru</i> .....	32
2.3 Wankelův motor .....	33
2.3.1 <i>Historický vývoj Wankelova motoru</i> .....	34
2.3.2 <i>Rozbor problémů a výhod Wankelových motorů</i> .....	36
2.3.3 <i>Budoucnost Wankelova motoru</i> .....	37
2.4 Parní motor .....	37
2.4.1 <i>Historie parního motoru</i> .....	38
2.4.2 <i>Vývoj parního motoru ZEE (Zero Emission Engine)</i> .....	39
2.4.3 <i>Dosažené výsledky projektu ZEE</i> .....	42
<b>3. Elektrická vozidla na baterie</b> .....	47
3.1 Historický vývoj elektromobilů .....	47
3.2 Elektromotor .....	48
3.2.1 <i>Stejnoseměrný motor s cizím buzením</i> .....	48
3.2.2 <i>Asynchronní motor</i> .....	49
3.2.3 <i>Transversální motor</i> .....	50
3.2.4 <i>Řízený reluktanční motor</i> .....	50
3.2.5 <i>Stejnoseměrný motor bez kartáčů</i> .....	51
3.3 Bateriové systémy a energetické zásobníky .....	52
3.3.1 <i>Olovený akumulátor</i> .....	54
3.3.2 <i>Baterie Nikl-kadmium</i> .....	54
3.3.3 <i>Baterie Nikl-metalhydridová</i> .....	55
3.3.4 <i>Baterie lithium-iontová</i> .....	56
3.3.5 <i>Baterie vysokoteplotní</i> .....	56

3.4	Legendární elektrovozidlo GM EV1 .....	57
3.5	Současná elektrovozidla.....	59
<b>4.</b>	<b>Hybridní pohony automobilů.....</b>	<b>65</b>
4.1	Princip činnosti hybridního pohonu.....	67
4.2	Řešení hybridního pohonu u Toyota Prius.....	68
4.3	Hybridní autobus.....	73
4.4	Zásobníky energie.....	75
4.4.1	<i>Elektrický akumulátor – baterie</i> .....	76
4.4.2	<i>Vysoko energetický kondenzátor – superkondenzátor</i> .....	76
4.4.3	<i>Mechanický akumulátor energie</i> .....	78
4.4.4	<i>Hydrostatický akumulátor energie</i> .....	79
4.5	Hybridní pohon s lineárním spalovacím motorem.....	80
<b>5.</b>	<b>Elektrická vozidla s palivovými články.....</b>	<b>85</b>
5.1	Historický vývoj palivového článku .....	85
5.2	Funkce palivového článku .....	86
5.3	Typy palivových článků .....	88
5.3.1	<i>Palivové články s polymerní iontoměničovou membránou (PEMFC)</i> .....	89
5.3.2	<i>Palivové články s alkalickým elektrolytem (AFC)</i> .....	91
5.3.3	<i>Palivové články s kyselinou fosforečnou (PAFC)</i> .....	92
5.3.4	<i>Palivové články s uhličitanovou taveninou (MCFC)</i> .....	92
5.3.5	<i>Palivové články s pevným elektrolytem (SOFC)</i> .....	93
5.3.6	<i>Palivový článek pro přímou reakci methanolu (DMFC)</i> .....	94
5.4	Reformování paliva.....	95
5.5	Příklad vozidel s palivovými články.....	97
<b>6.</b>	<b>Vozidla na plynná paliva .....</b>	<b>101</b>
6.1	Historický vývoj využití plyných paliv v dopravě.....	101
6.2	Vozidla na LPG (Liquefied petroleum gas).....	105
6.3	Vozidla na zemní plyn.....	108
6.3.1	<i>Výhody zemního plynu</i> .....	109
6.3.2	<i>Nevýhody zemního plynu</i> .....	110
6.3.3	<i>Výroba a parametry automobilu s pohonem na zemní plyn</i> .....	111
6.3.4	<i>Plnicí stanice CNG</i> .....	112
6.3.5	<i>Přímý vstřík zemního plynu do válce</i> .....	114
6.3.6	<i>Zkapalněný zemní plyn (LNG – Liquefied Natural Gas)</i> .....	117
6.4	Ostatní plynná paliva .....	119
6.4.1	<i>Bioplyn</i> .....	119
6.4.2	<i>Vodík</i> .....	120
<b>7.</b>	<b>Biopaliva .....</b>	<b>129</b>
7.1	Historie využívání biopaliv.....	130
7.2	Legislativa pro oblast biopaliv .....	132
7.3	Výroba a charakteristika biopaliv .....	133
7.3.1	<i>Výroba a charakteristika bioethanolu</i> .....	134
7.3.2	<i>Výroba a charakteristika methylesteru řepkového oleje</i> .....	137

---

7.3.3 Výroba syntetické motorové nafty.....	139
<b>8. Analýza alternativních pohonů.....</b>	<b>141</b>
8.1 Well to Wheel analýza nejběžnějších alternativních pohonů a paliv .....	142
8.1.1 Základní postup tvorby Well to Wheel analýzy.....	142
8.1.2 Výsledky Well to Wheel analýzy pro nejpoužívanější paliva .....	143
<b>9. Budoucnost pohonu motorových vozidel.....</b>	<b>145</b>
9.1 Využití solární energie v automobilech.....	145
9.1.1 Princip činnosti fotovoltaických článků .....	146
9.1.2 Využití fotovoltaických článků u vozidel.....	147
9.2 Využití energie spalín a odpadního tepla spalovacího motoru.....	148
9.2.1 Turbokompodní systémy .....	149
9.2.2 Termoelektrický generátor.....	150
9.2.3 Turbosteamer.....	151
9.2.4 Exhaust Heat Recovery.....	152
<b>Použitá literatura .....</b>	<b>153</b>







# Předmluva

Knižní publikace je určena studentům vysokých, vyšších odborných a středních škol se zaměřením na automobilovou dopravu. Dále je publikace určena odborné veřejnosti a všem zájemcům o alternativní pohony motorových vozidel.

Publikace seznamuje čtenáře s motory speciální konstrukce jako je spalovací turbína, Stirlingův motor, Wankelův motor a parní motor. Kromě toho jsou uvedeny vozidla na elektrický pohon, hybridní vozidla a vozidla s palivovým článkem. Na tuto část navazuje kapitola zaměřená na problematiku využití plyných paliv ve vozidlech. V publikaci jsou také uvedeny alternativní paliva biologického původu a navazující problematika hodnocení jednotlivých alternativních pohonů. Závěrečná kapitola je zaměřena na budoucí možnosti získávání další energie ve vozidlech představovaná solární energií a energií odpadního tepla.

Autor by závěrem rád poděkoval svým spolupracovníkům z Katedry vozidel a pozemní dopravy a všem ostatním, kteří se nemalou měrou podíleli na vzniku této publikace.

V Praze 11. 5. 2012

Autor



# 1. Úvod

Automobilová doprava se stala fenoménem 20. a 21. století. Vynález automobilu a potažmo spalovacího motoru lze považovat za jeden z největších vynálezů, který ovlivnil vývoj moderní společnosti. S narůstajícím počtem automobilů však rychle rostou negativní aspekty spojené s provozem motorových vozidel, které vedou ke snaze nalézt alternativní možnosti pohonů motorových vozidel s menšími negativními aspekty. V současné době představuje největší problém produkce oxidu uhličitého a s tím spojená spotřeba fosilních paliv. Další významný problém je spojený s produkcí škodlivých emisí. Závažnost tohoto problému s rostoucím zdokonalováním konvenčních spalovacích motorů a zejména jejich systémů upravující výfukové plyny klesá. Dominantním důvodem proč tedy hledat alternativní možnosti provozu motorových vozidel zůstává produkce oxidu uhličitého a spotřeba fosilních paliv.

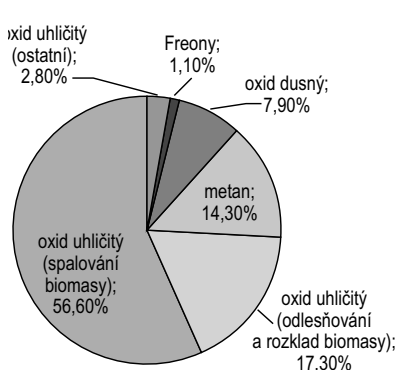
Mezi alternativní pohony vozidel lze zahrnout všechny koncepce pohonů lišící se od konvenčního způsobu pohonu. Z historického hlediska lze mezi první alternativní pohony zahrnout elektrovozidla, i když důvod jejich vyžívání byl odlišný. Vzhledem k jednoduché konstrukci elektrovozidel, lehké obsluze a nenáročného startování byly elektrovozidla na konci 19. století oblíbenější než vozidla s klasickým spalovacím motorem. V roce 1900 se v USA dokonce vyrobilo o třetinu více vozidel s elektrickým pohonem než vozidel se spalovacím motorem. Další směr v alternativních pohonech byl zaměřen spalovací motory speciální konstrukce. Mezi tyto motory je možné zahrnout spalovací turbínu, Stirlingův motor a Wankelův motor. V 90. letech minulého století se také objevuje snaha o renesanci parního motoru. Samostatnou kapitolu tvoří alternativní paliva v dnešní době představovaná převážně biopalivy. Tyto paliva jsou známá od začátku uvedení spalovacích motorů. Není tajemstvím, že první spalovací motory využívaly, jako zdroj energie, převážně plynná paliva. První použití biopaliv je spojeno s bioethanolem, který se ve 30. letech minulého století vyráběl téměř v každé větší vesnici. Vstupní zdroj biomasy tvořily přebytky z agrárního sektoru.

## 1.1 Problematika produkce oxidu uhličitého

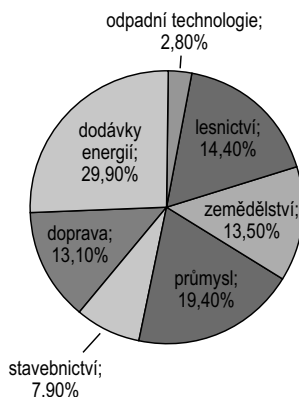
Koncentrace oxidu uhličitého se z období před začátkem průmyslové revoluce (přibližně polovina 18. století) zvýšila z původních 280 ppm na dnešních 387 ppm. Tento nárůst je zapříčiněn převážně spalováním fosilních paliv, odlesňováním, kácením pralesů, změnou využívání půdy (přeměnou pastvin na ornou půdu) a další lidskou činností. Kromě oxidu uhličitého se na skleníkovém efektu podílí i řada dalších plynů. Jejich koncentrace je výrazně nižší, za to jejich faktor vyjadřující násobnost účinku oproti oxidu uhličitému je vysoký. Koncentrace metanu vzrostla z původních 700 na nynějších 1800 ppb (par per bilion, koncentrace vyjadřující podíl v částech z jedné miliardy), koncentrace oxidu dusného z 270 na 320 ppb a koncentrace troposférického ozonu z 25 na 34 ppb. Ekvivalent vyjádřený v násobcích účinku daného plynu oproti oxidu uhličitému dosahuje u metanu hodnotu 23, u oxidu dusného 296 a u troposférického ozónu více jak 2000 [1].

Následující **obr. 1.1** znázorňuje podíl jednotlivých látek na skleníkovém efektu. Podíl jednotlivých látek je vyjádřen pomocí ekvivalentu vztaženého na oxid uhličitý. **Obr. 1.2** znázorňuje podíl jednotlivých lidských činností na skleníkovém efektu.

Proti klasické teorii škodlivosti oxidu uhličitého a jeho vlivu na skleníkový efekt vystupuje řada skeptiků, které podporuje řada výzkumných projektů, jež shodně uvádějí, že největší podíl na skleníkovém efektu má vodní pára a její schopnost vytvářet radiační clonu [2].



**Obr. 1.1** Podíl jednotlivých plynů na skleníkovém efektu



**Obr. 1.2** Podíl lidské činnosti na skleníkovém efektu

European Environment Agency ve své zprávě z roku 2010 uvádí, že produkce oxidu uhličitého ve většině odvětví lidské činnosti mírně klesla nebo zaznamenala stagnaci. Na rozdíl od toho dopravní sektor zaznamenal vysoký nárůst. V letech 1990–2007 doprava zaznamenala nárůst v produkci oxidu uhličitého o 28 % ve všech členských státech European Environment Agency. Doprava tak do budoucna představuje jednu z nejproblematictějších oblastí z pohledu produkce oxidu uhličitého [3].

Nejvýznamnější celosvětová snaha o snížení produkce oxidu uhličitého je představována Kjótským protokolem, který byl přijat v roce 1997 jako protokol k Rámcové úmluvě OSN o změně klimatu. V Kjótském protokolu se průmyslově vyspělé státy zavázaly ke snížení skleníkových plynů o 5,2 % v kontrolním období 2008–2012 ve srovnání se stavem v roce 1990.

Úhrnné redukce emisí o 5,2 % mělo být dosaženo diferencovaným snížením, které je uvedeno v dodatku protokolu. Procentuální změna produkce skleníkových plynů pro jednotlivé státy úmluvy je uvedena v **tab. 1**.

Redukce skleníkových plynů se týkala šesti nejpodstatnějších, oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ), metanu ( $\text{CH}_4$ ), oxidu dusného ( $\text{N}_2\text{O}$ ), hydrogenovaných fluorovodíku (HFCs), polyfluorovodíku (PFCs) a fluoridu sírového ( $\text{SF}_6$ ), vyjádřených ve formě ekvivalentu  $\text{CO}_2$  (tzv. uhlíkový ekvivalent) antropogenních emisí.

Kromě emisí skleníkových plynů bere Protokol v úvahu i jejich propady, tj. absorpci vyvolanou změnami ve využívání krajiny (zalesňování, péče o lesní porosty, resp. odlesňování).

Součástí Protokolu jsou tzv. flexibilní mechanismy, které umožňují průmyslovým státům, aby snížily emise na území jiného státu nebo odkoupily od jiného státu právo vypouštět skleníkové plyny. Jsou jimi: obchodování s emisemi (Emission Trading, ET), společně zavaděná opatření (Joint Implementation, JI), mechanismus čistého rozvoje (Clean Development Mechanism, CDM).

Českou republikou byl Protokol podepsán 23. 11. 1998 na základě usnesení vlády č. 669/1998 a ratifikován 15. 11. 2001 (č. 81/2005 Sb. m. s.). Protokol má ke dni 6. 11. 2009 celkem 190 smluvních stran. Země přílohy I Úmluvy se na celkových emisích podílejí 63,7% [4].

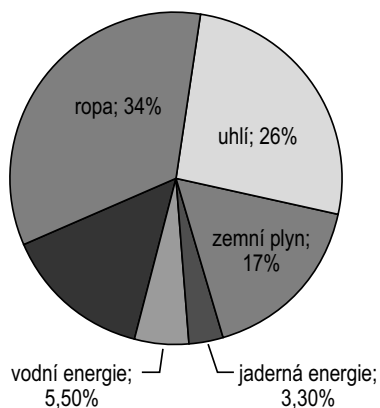
**Tab. 1** Procentuální změna produkce skleníkových plynů pro jednotlivé státy úmluvy

Austrálie	108	Monako	92
Belgie	92	Německo	92
Bulharsko	92	Nizozemsko	92
Česká republika	92	Norsko	101
Dánsko	92	Nový Zéland	100
Estonsko	92	Polsko	94
Evropské společenství	92	Portugalsko	92
Finsko	92	Rakousko	92
Francie	92	Rumunsko	92
Chorvatsko	95	Ruská federace	100
Irsko	92	Řecko	92
Island	110	Slovensko	92
Itálie	92	Slovinsko	92
Japonsko	94	Spojené království Velké Británie a Severního Irska	92
Kanada	94		
Lichtenštejnsko	92	Spojené státy americké	93
Litva	92	Španělsko	92
Lotyšsko	92	Švédsko	92
Lucembursko	92	Švýcarsko	92
Maďarsko	94	Ukrajina	100

Základní problém Kjótského protokolu byl spojený s odmítnutím ratifikace smlouvy Spojenými státy americkými. Kjótský protokol i přesto vyšel v platnost (podmínkou byla ratifikace alespoň 55 státy a tolika státy, aby jejich podíl na skleníkových plynech dosahoval alespoň 55% produkce států Dodatku I) zejména po ratifikaci Ruskou federací. Kjótský protokol, přes odmítnutí některými státy nesplnil dosažení cíle snížení produkce skleníkových plynů o 5,2% s rokem 1990, přesto jej lze považovat za úspěšný projekt.

V současné době vrcholí snahy na přípravě nástupce Kjótského protokolu. Zatím poslední jednání ohledně nového protokolu byla uskutečněna na klimatologickém kongresu v jihoafrickém Durbanu. Nový protokol by měl zahrnovat i produkci skleníkových plynů z rychle rostoucích ekonomik, jako jsou Čína a Indie. K připravovanému protokolu by se měly připojit i Spojené státy americké. Platnost nového protokolu je plánovaná na rok 2015.

## 1.2 Spotřeba fosilních paliv



Možnost brzkého vyčerpání zásob fosilních paliv představuje jeden z hlavních důvodů proč podporovat alternativní pohony. Mezi nejdůležitější fosilní paliva patří ropa, zemní plyn a uhlí. Tyto paliva tvoří největší zdroje pokrývající spotřebu energie. Podíl jednotlivých zdrojů energie je uveden na *obr. 1.3*.

**Obr. 1.3** Podíl jednotlivých zdrojů energie na celosvětové spotřebě energie

### Ropa

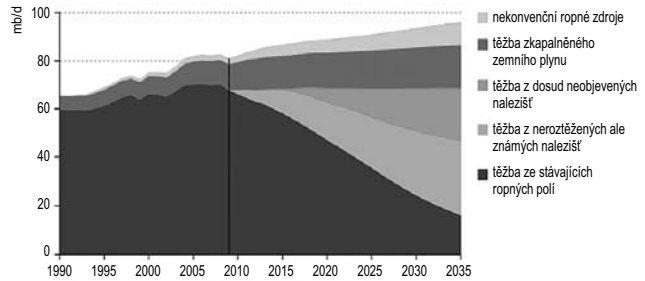
V současné době představuje ropa největší zdroj energie, který se využívá ve většině odvětví lidské společnosti. Ropa vznikla anaerobní fermentací odumřelých bakterií a řas přibližně v juruském období.

Mezi základní technologické charakteristiky ropy patří hustota stanovená při teplotě 20 °C a při normálním atmosférickém tlaku. V závislosti na obsahu rozpuštěných látek se pohybuje v rozmezí od 0,6–0,85 g/cm<sup>3</sup> pro lehké ropy, 0,85–0,93 g/cm<sup>3</sup> pro středně těžké až 0,93–1,05 a víc g/cm<sup>3</sup> pro velmi těžké ropy. Pro měření objemu ropy se používá míry 1 barel = 42 amerických galonů = 35 britských galonů = 158,97 litrů. Jeden barel ropy tak v závislosti na druhu ropy váží od 96,972 kg do 166,92 kg. Množství ropy se také někdy udává v tunách, jedna tuna ropy tak odpovídá přibližně 6–10,32 barelům.

Přibližnou představu o složení ropy dávají následující hmotnostní podíly, uhlík 84–87 %, vodík 11–14 %, kyslík až 1 %, síra až 4 %, dusík až 1 %.

Bez ohledu na nové objevy je jasné, že fosilní paliva nejsou nevyčerpatelná a také, že zejména ropa se spotřebovává mnohem větší rychlostí, než s jakou se v přírodě vytváří. Poptávka po ropě neustále roste nehledě na její vyšší ceny. Zvýšená poptávka je způsobena zejména vzestupem ekonomiky v rozvojových zemích. Zvyšující se poptávka po ropě vede ke zmenšení její zásoby. Výhlídky však nejsou tak chmurné, jak se může zdát. Někteří odborníci odhadli, že ověřené zásoby ropy reprezentují jen jednu třetinu skutečných zásob skrytých pod zemí. Pomocí nových technologií bude možné podstatně zvýšit odhad zásob, které lze ekonomicky těžít. Počátkem 90. let tohoto století američtí vědci vyvinuli techniku zvanou „chemické zaplavování“, která umožňuje získávat ropu z existujících nalezišť. Tato technika spočívá ve vyplavení ropy z hornin použitím chemikálie podobné saponátu. Používání této techniky bylo v minulosti omezeno pro vysokou cenu této chemikálie. Vědci ale nyní tvrdí, že našli levný proces, který využívá vedlejších produktů vznikajících při výrobě papíru. Vědci se domnívají, že díky této technice se mohou zvýšit potenciální zásoby USA téměř šestinásobně. Také podzemními výbuchy lze zvýšit hranici, která určuje množství ropy vyčerpatelné z vrtnu. Podzemními výbuchy se totiž rozvolňuje hornina, jejíž dutinky jsou naplněny ropou, a ta může lépe téci k čerpacímu vrtnu. Ostatní zdroje ropy zahrnují asfaltové písky, což jsou horniny nasycené lepkavou ropou. Získávání ropy z těchto písků je

však velmi nákladné. Jiným zdrojem ropy je skupina hornin zvaná břidlice, které jsou bohaté na látku zvanou kerogen, z níž lze získávat volnou ropu. Odhad světové produkce ropy z různých nalezišť je uveden na **obr. 1.4**. Podle International Energy Agency lze ropná naleziště rozdělit na nekonvenční ropné zdroje; těžbu zkvapalného zemního plynu; těžbu z dosud neobjevených nalezišť; těžbu z neroztěžených ale známých nalezišť; těžbu ze stávajících ropných polí.



**Obr. 1.4** Odhad světové produkce ropy z různých nalezišť [5]

## Uhlí

Uhlí je druhým nejvýznamnějším zdrojem energie. Jedná se o hořlavou horninu vzniklou v průběhu desítek až stovek miliónů let složitými anaerobními procesy. Většina světových zásob uhlí se začala tvořit v období karbonu, geologické epoše, která začala před 360 milióny let a skončila před 286 milióny let. Původce uhlí tvoří převážně stromové přesličky, plavuně, kapradiny, u hnědého uhlí pak také jehličnaté a listnaté stromy, které se pozvolným uhelnatěním v močálech přeměňovaly na uhelnatou horninu.

Uhlí lze rozdělit na:

- Lignit – také označovaný jako hnědé uhlí, je to nejméně kvalitní druh uhlí. Užívá se výhradně pro výrobu elektřiny nebo výrobu technologického tepla. Leštěné bylo využíváno jako ozdobný kámen od doby železné. Je třetihorního původu.
- Hnědé uhlí – používá se k vytápění domácností nebo k výrobě tepla a elektřiny
- Hnědo-černé – jeho vlastnosti spadají mezi hnědé a černé uhlí. Využívá se pro výrobu elektřiny, tepla a chemickou výrobu
- Černé uhlí – má vysokou hustotu, jeho barva je obvykle černá až hnědočerná. Uhlí je prvohorního a druhohorního původu. Vzniká rozkladem a prouhelňováním vyhynulých stromových plavin, které se propadly do bažin (období perm).
- Antracit – jde o nejkvalitnější uhlí, používá se na vytápění a k výrobě chemikálií.

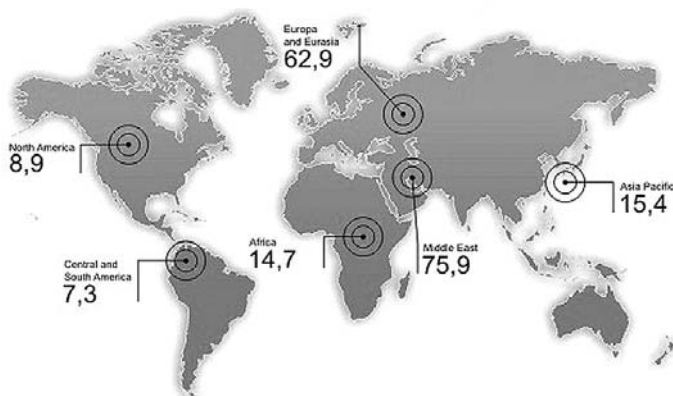
Jak je uvedeno výše převážné využití uhlí je v současné době spojeno s výrobou elektrické energie, případně tepla. V období druhé světové války tvořilo uhlí základ výroby kapalných uhlovodíkových paliv jako je automobilový benzín a motorová nafta. Nejčastější technologický proces využívaný pro tuto výrobu je označován za Fischer-Tropschovu syntézu. Tato technologie se opět vrací do popředí zájmu odborné veřejnosti zejména z důvodů využití této technologie k výrobě biopaliv II. generace. Výroba kapalných paliv z uhlí je v současné době ekonomicky nevýhodná a její opětovné využití nelze očekávat.

## Zemní plyn

Zemní plyn je nejméně zastoupeným zdrojem fosilních paliv. Jeho hlavní složkou je metan (obvykle přes 90 %) a etan (1–6 %). Nachází se v podzemí buď samostatně, společně s ropou nebo černým uhlím. Díky vysokému obsahu metanu vzniká při jeho spalování méně oxidu uhličitého než při spalování ropy nebo uhlí. O vzniku zemního plynu existuje více teorií. Jelikož se zemní plyn vyskytuje velice často spolu s ropou nebo s uhlím, přiklání se teorie jeho vzniku nejčastěji

k tomu, že se postupně uvolňoval při vzniku uhlí nebo ropy jako důsledek postupného rozkladu organického materiálu. Podle teorií preferujících organický původ zemního plynu byly tedy na začátku vzniku zemních plynů rostlinné a živočišné zbytky. Druhá teorie předpokládá vznik zemního plynu řadou chemických reakcí z anorganických látek.

Zásoby zemního plynu se odhadují přibližně na 200 let. Z fosilních paliv tato zásoba představuje nejdelší dobu. U ropy se zásoby odhadují na 50–100 let u uhlí na 100–150 let. Prokázané zásoby zemního plynu podle jednotlivých kontinentů jsou uvedeny na **obr. 1.5**.



**Obr. 1.5** Prokázané zásoby zemního plynu v jednotlivých světových regionech (v bilio-nech m<sup>3</sup>) [6]

## 1.3 Produkce škodlivých emisí

Produkce škodlivých emisí je dalším důvodem, který vede k hledání nových alternativních způsobů pohonu vozidel. Mezi základní škodliviny vypouštěné motorovými vozidly patří oxid uhelnatý CO, nespálené uhlovodíky HC, oxidy dusíku NO<sub>x</sub> a pevné částice PM. Základní charakteristika jednotlivých škodlivých emisí je uvedena níže.

### Oxid uhelnatý (carbon monoxide)

Pro lidský organizmus je jedovatý. S krevním barvivem vytváří velmi pevný karboxyhemoglobin (200krát raději se váže na hemoglobin než kyslík) [7], který omezuje přenos kyslíku z plic do krevního oběhu. Tím jsou jednotlivé orgány poškozovány nedostatkem kyslíku, i když by tento byl obsažen ve vdechovaném vzduchu v dostatečném množství. Oxid uhelnatý se dále podílí na vzniku fotochemického (letního) smogu. Celková roční emise CO z antropogenních zdrojů je řádově srovnatelná s přírodními emisemi [7] a [8].

### Oxidy dusíku (nitrogen oxide)

Přímá škodlivost oxidu dusnatého na živý organizmus je vcelku nízká. Při dalším pobytu v atmosféře dochází k jeho oxidaci na oxid dusičitý, jehož škodlivost je klasifikována jako závažnější. Při vdechování se na stěnách sliznice tvoří kyselina dusičná (HNO<sub>3</sub>). Dýchací soustava reaguje na vdechování HNO<sub>3</sub> jako na začínající hoření a automaticky přivírá přístup vzduchu do plic. Důsledkem toho je pocit dušení a nucení ke kašli. Tento nežádoucí jev nastává již při velmi nízkých koncentracích, resp. při krátkých expozičních dobách [9].



Oxidy dusíku se významně podílejí na tvorbě letního smogu. Spolupodílejí se též na tvorbě kyselých dešťů.

### **Nespálené uhlovodíky (hydrocarbon)**

Nespálenými uhlovodíky jsou směsi různých skupin uhlovodíků, které vstupují jako palivo do oxidačního procesu nebo vznikají v průběhu spalování paliva ve válci motoru. Nejmenší škodlivost obvykle mají některé původní skupiny uhlovodíkového paliva, větší škodlivost (někdy až extrémní) vykazují potom ty druhy uhlovodíků, které vznikají jako meziprodukty oxidace původní uhlovodíkové molekuly, u kterých vlivem různých okolností proběhne cyklus oxidačních reakcí pouze z části (např. účinkem ochlazení v blízkosti stěn válce). Některé meziprodukty oxidačních reakcí patří do skupiny rakovinotvorných látek a jejich škodlivost je potom navíc mimořádná ve spojení s další výfukovou škodlivinou, pevnými částicemi (nespálené uhlovodíky se zachycují na povrchu částic a vdechováním se tak dostávají do lidského organismu velmi nebezpečné látky) [10].

Z plyných škodlivin se z celé škály nespálených či částečně zoxidovaných uhlovodíků považují za nejnebezpečnější polycyklické aromatické uhlovodíky (PAH), jejichž škodlivost je zesílena zmíněnou vazbou na povrch emitovaných pevných částic. Nejznámější polycyklický aromatický uhlovodík je benzo[a]pyren, u něhož byly karcinogenní účinky prokázány nejdříve. Mezi polycyklické aromatické uhlovodíky emitované spalovacími motory patří také benz[a]anthracen, benzo[b]fluoranthén, benzo[j]fluoranthén, benzo[k]fluoranthén a dibenzo[a,h]anthracen [11].

Škodlivost jednotlivých polycyklických aromatických uhlovodíků je různá. Pro porovnání souhrnné škodlivosti všech složek PAH se používá přepočítání škodlivosti na nejznámější sloučeninu benzo[a]pyren [12]. S rostoucími znalostmi o škodlivosti polycyklických aromatických uhlovodíků lze očekávat, že se do budoucna stanou samostatnou položkou legislativně omezených škodlivin [11], [12] a [13].

### **Oxidy síry (sulphur oxide)**

Jsou produkovány především vznětovými motory. Podíl emisí oxidů síry, plynoucích ze spalovacích motorů, je na celkovou produkci zanedbatelný. Protože obsah síry v motorové naftě neustále klesá, klesají i emise plynoucí ze spalovacích motorů.

### **Pevné částice (particulate matter)**

Vznikají převážně u vznětových motorů. Obsahují primární uhlík, organický uhlík a malé množství sulfátu, dusíku, vody a další neidentifikovatelné složky. Obsah základního uhlíku se blíží k 75 %. Nicméně složení je závislé na typu motoru a na dodatečných zařízeních, např. filtru pevných částic. Jádro částic se skládá z pevného uhlíku a popele. Organické a sulfátové směsi a další prvky jsou sorbované na povrch jádra během koagulace, adsorpce a kondenzace částic.

Krátkodobá expozice může způsobit podráždění oka, jícnu, průdušek, neurofyziologické symptomy, např. nucení ke zvracení a dýchací potíže (dušnost). Chronická expozice může způsobit zánět a histopatologické změny v plicích. Odhad takzvané referenční koncentrace, která nezpůsobuje rakovinotvorný efekt po dlouhou dobu expozice, je  $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  [14].

Částice v ovzduší se nacházejí v různých velikostech. Velké částice jsou odstraněny například polykáním nebo jsou zachyceny v horních cestách dýchacích. Menší částice, zvláště pod  $0,1 \mu\text{m}$ , mohou dosáhnout povrchu plic. Tyto částice mohou být odstraněny při čištění plicních sklípků, ale mohou být také unášeny do lymfatického systému a možná dále až do krve. Nejmenší částice

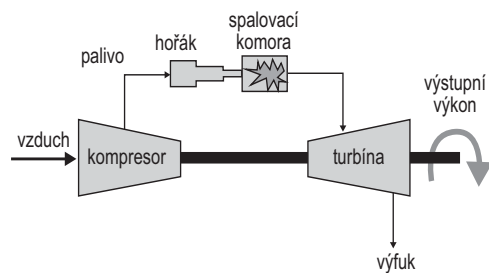
o velikosti 1 nm mohou hrát důležitou roli v toxicitě okolních částic. Pevné částice jsou velmi malé částice co do velikosti, většina částic je menších než 1  $\mu\text{m}$  a více než 90 % může být ultra malých < 0,1  $\mu\text{m}$ . V některých případech se vyskytují částice menší než 50 nm. Částice mají velký povrch, který může adsorbovat různorodé směsi, které mohou být toxické, mutagenní a karcinogenní, např. benzo[a]pyren [15].

# Spalovací motory speciální konstrukce

V této kapitole budou probrány čtyři nejznámější spalovací motory speciální konstrukce. První je spalovací turbína, následuje Stirlingův motor, pokračuje Wankelův motor a speciální parní motor.

## 2.1 Spalovací turbína

Princip práce je patrný ze schématu na **obr. 2.1**. Po dosažení startovacích otáček, v okamžiku kdy již kompresor dodává dostatečné množství vzduchu, je soustavou trysek rozprášeno do spalovací komory palivo a současně zapnuty zapalovací svíčky, které směs paliva se vzduchem zažehnou. Hoření směsi paliva se vzduchem probíhá ve spalovací komoře prakticky za konstantního tlaku. Spaliny jsou vedeny do rozváděcího ústrojí turbíny, kde v důsledku expanze dochází k nárůstu rychlosti proudu plynů a současně je proud spalín vhodně usměrnován na lopatky rotoru turbíny. Tato turbína je spojena hřídelí s kompresorem, který dodává do spalovací komory vzduch pod požadovaným tlakem. Tlak vyvinutý kompresorem zajistí průtok vzduchu a spalín spalovací komorou a dále pak turbínou.



**Obr. 2.1** Princip práce spalovací turbíny [16]

Pokud budeme odebírat výkon pro pohon vozidla z hřídele turbíny, bude docházet při nárůstu zatížení k poklesu otáček rotoru, a tedy i otáček kompresoru, což povede ke snížení tlaku a množství vzduchu dodávaného do spalovací komory. Točivý moment vyvíjený turbínou poklesne (**obr. 2.2**). Z tohoto důvodu se u vozidlových turbín používá dvouhřídelové uspořádání (výstupní turbína se skládá ze dvou turbín), kde výkon potřebný pro pohon vozidla je odebírán z hřídele samostatné turbíny. V tomto případě je první turbína dimenzována pouze pro pohon kompresoru a spaliny z jejího výstupu jsou vedeny na vstup druhé turbíny.

Při nárůstu zatížení druhé turbíny dochází taktéž k poklesu jejích otáček. Avšak otáčky první turbíny se nemění a kompresor poháněný touto turbínou dodává do spalovací komory stále stejné množství vzduchu. Při stejném množství paliva dodávaného do spalovací komory je i energie přiváděná na lopatky druhé turbíny stejná. V důsledku snížení otáček rotoru druhé turbíny se síla od proudu plynů působící na lopatky rotoru turbíny zvyšuje, a tím roste i točivý moment vyvíjený druhou turbínou. Čím větší je pokles otáček, tím větší je i nárůst točivého momentu (**obr. 2.3**).

Takovýto průběh točivého momentu je pro vozidlový motor velmi výhodný, protože při podstatně lepší akceleraci vozidla umožňuje snížení počtu převodových stupňů. U dvouhřídelových