



Energetická analýza pozemní dopravy

Jiří First



ČESKÉ
VYSOKÉ
UČENÍ
TECHNICKÉ
V PRAZE

— FAKULTA DOPRAVNÍ —

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ



ENERGETICKÁ ANALÝZA POZEMNÍ DOPRAVY
Systémy přeměny energií

Jiří First

2014

Energetická analýza pozemní dopravy
Systémy přeměny energií

Autor:	Ing. Jiří First
Spoluautoři:	Ing. Dmitry Rozhdestvenskiy, Ing. Josef Mík, Ing. Jonáš Jirků
Recenze:	Ing. Martin Molcar
Vydavatel:	České vysoké učení technické v Praze
Zpracovala:	Fakulta dopravní, Ústav dopravních prostředků
Kontaktní adresa:	Fakulta dopravní, Ústav dopravních prostředků, Konviktská 20, Praha 1, 110 00
Telefon:	224 355 091, 730 193 914
Grafická úprava:	Jan Válek
Obraz na obalu:	J.M.W. Turner – Rain, Steam and Speed – The Great Western Railway (1844)
Pořadí vydání:	1.
Rok vydání:	2014
ISBN:	978-80-01-05664-6

Abstrakt:

Publikace Energetická analýza pozemní dopravy – systémy přeměny energie, seznamuje zájemce s aktuálním problémem dopravy, energetickou náročností tohoto oboru.

Téma je rozděleno do třech hlavních skupin.

V první skupině jsou vysvětleny fyzikální vlastnosti energie, jakožto nezbytné schopnosti vykonávat dopravu. Je zde dále statisticky poukázáno na dosavadní rozvoj dopravy v souvislostech extenzivního a intenzivního pojetí v ČR i ve světě.

V druhé části jsou vyjádřeny systémy, které energii využívají. Pozornost je věnována zejména faktorům na straně dopravních prostředků, jízdním odporům. Vysvětlen je způsob absorpce energie.

Třetí skupina popisuje systémy, které jsou využívány k přeměně energií na kinetickou, nezbytnou pro dopravu. Popsány jsou zde konstrukce a činnosti motorů, používaných jak v historii, tak v současnosti.

Pozornost je soustředěna na hlavní požadavky – účinnost přeměny, ekologickou zátěž a bezpečnost.

Abstract:

The work Energetic Analysis of Surface Transport – Systems of Energy Transformation aims to present the reader the current transportation issue which is the energy demands of this field. The topic is divided into three main areas.

The first area covers physical properties of energy as these are the key provisions to transport.

Moreover, there are remarks on statistics of recent transportation development in the context of intensive and extensive approach within the Czech republic and worldwide.

The second area covers systems that use the energy. The focus is placed on vehicle side, the rolling resistance. The energy absorption principle is explained.

The third area describes the systems to change energy to kinetic, necessary for transportation. The construction principles and engine operation in history and at present are described in this part.

Main focus is placed on transformation efficiency, ecologic load and safety above all.

1. Obsah

Seznam použitých symbolů, veličin a fyzikálních jednotek	7
Seznam použitých zkratek	10
1. Energie	13
1.1. Základní informace	13
1.2. Energie – jednotky	14
1.3. Energie – vztahy	14
1.4. Energie – druhy, formy, podoby	15
2. Energie – civilizace – doprava	16
2.1. Vývoj dopravy	16
2.2. Vývoj energetické náročnosti	17
2.3. Energetická náročnost dopravy v České republice	19
3. Druhy dopravy	21
3.1. Prostředí pro dopravu	21
3.2. Tratě pro dopravu	21
3.3. Způsob pohybu dopravních prostředků	22
3.4. Prostředky pro dopravu	22
4. Kinetická energie	22
4.1. Kinetická energie přírodní	22
4.2. Energie a systémy přeměn na kinetickou	24
5. Potřeba energie	25
6. Jízdní odpory automobilu a motocyklu	25
7. Vztah jízdních odporů k výkonu motoru a k energii	26
8. Hodnota jízdních odporů	27
8.1. Odpor vnitřního tření	27
8.2. Odpor valení	27
8.3. Odpor vzduchu	29
8.4. Odpor stoupání	31
8.5. Odpor zrychlení (setrvačnost)	32
9. Celkové jízdní odpory	33
10. Příklad výpočtu energetické náročnosti	35
11. Systémy přeměny energie na kinetickou v dopravních prostředcích	37
11.1. Spalovací motor	38
11.1.1. Motor s vnitřním spalováním a přímočarým pohybem pístu	38
11.1.2. Exhalace spalovacího motoru	48
11.1.3. Motor s vnitřním spalováním a nelineárním pohybem pístu	61
11.1.4. Spalovací motor s nepřerušovaným (kontinuálním) hořením	84

11.2.	Elektromotor	88
11.2.1.	Základní pojmy a legislativa spojená s elektroenergií v dopravě	88
11.2.2.	Elektromotor – princip činnosti.....	91
11.2.3.	Elektromotor – parametry	92
11.2.4.	Elektromotor – konstrukce.....	92
11.2.5.	Porovnání účinnosti elektromotoru a spalovacího motoru	96
11.2.6.	Energetická analýza elektromotoru	97
11.3.	Parní motor	100
11.3.1.	Historie	100
11.3.2.	Druhy parních motorů.....	100
11.3.3.	Princip činnosti	102
11.3.4.	Parametry (indikované) parního motoru	104
11.3.5.	Parní motor IAV GmbH.....	105
11.4.	Kompresní motor	108
11.4.1.	Kompresní motory rotační a reaktivní	113
12.	Použitá literatura a internetové zdroje	115

Seznam použitých symbolů, veličin a fyzikálních jednotek

a_t	měrná technická práce kompresoru [J.kg^{-1}]
A	ampér (jednotka el. proudu)
A	užitečná práce (Stirlingův motor)
A_{sp}	práce motoru na spojce [%]
B	magnetická indukce [T]
bar	bar (jednotka tlaku)
c	rychlost světla [m.s^{-1}]
c_p	tepelná kapacita při stálém tlaku [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
C	spotřeba el. energie [Wh/km]
C	uhlík
c_x	součinitel odporu vzduchu [-]
c_v	měrná tepelná kapacita [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
$^{\circ}\text{C}$	Celsiův stupeň (jednotka teploty)
cal	kalorie (jednotka energie)
CO	oxid uhelnatý
CO ₂	oxid uhličitý
$\cos \phi$	účinník
D	ujetá dráha [km]
daN	dekanewton
dU	změna vnitřní energie termodynamické soustavy
E	energie [J], [W.s], [kWh]
E	energie potřebná k nabití akumulátoru [Wh]
E_K	kinetická energie [J]
E_P	potenciální energie [J]
E_S	statická energie [J]
eV	elektronvolt (jednotka energie)
f, f_k	součinitel valivého odporu [-]
F	síla (Lorentzova) [N]
F_c	celková síla [N]
F_K	hnací síla [N]
G	tíha vozidla [N]
h	hodina (jednotka času)
h	výška [m]
H	vodík
H	obsah vodíku [%]
H_u, H_u	dolní výhřevnost paliva
He	helium
HC	uhlovodíky
H ₂ O	voda
i	měrná entalpie [$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$]
i	poměr pracovních komor a těsnících vrcholů pístu
i_0	entalpie vody na vstupu do kotle [J.kg^{-1}]
i_1	entalpie páry na výstupu z kotle [J.kg^{-1}]
I	el. proud [A]
I_s	statorový proud [A]
J	joule (jednotka práce a energie)
J	polarita hlavního pólu (jih)
J_K	moment setrvačnosti rotujících částí [kg.m^2]
K	kelvin (jednotka termodynamické teploty)
kg	kilogram (jednotka hmotnosti)

kWh	kilowatthodina (jednotka energie)
l	délka [m]
L_t	teoretická spotřeba vzduchu [kg.kg^{-1}]
m	hmotnost tělesa [kg]
M	celková hmotnost [kg]
$\dot{m}$	hmotnostní výkonnost kompresoru [kg.s^{-1}]
m	metr (jednotka délky)
m_e, m_{pe}	měrná spotřeba paliva [kg.kWh^{-1}]
M_c	molová hmotnost uhlíku [kg.mol^{-1}]
M_H	molová hmotnost vodíku [kg.mol^{-1}]
M_K	točivý moment kola [N.m]
M_N	molová hmotnost dusíku [kg.mol^{-1}]
M_O	molová hmotnost kyslíku [kg.mol^{-1}]
M_p	hmotnost spotřebovaného paliva (vzduchu) [kg]
M_t	točivý moment motoru, moment síly na výstupním hřídeli [N.m]
min	minuta (jednotka času)
n	otáčky motoru, klikového hřídele [s^{-1}], [min^{-1}]
N	dusík
N	newton (jednotka síly)
NO_x	oxidy dusíku
O	kyslík
O_c	celkový odpor vozidla [N]
$O_f (R_R)$	odpor valení ($R = \text{rolling}$) [N]
O_i	jízdní odpor [N]
$O_s (R_a)$	odpor stoupání [N]
O_t	teoretická spotřeba kyslíku pro shoření 1 kg paliva [kg.kg^{-1}]
$O_v (R_A)$	odpor vzduchu ($A = \text{air}$) [N]
$O_z (R_a)$	odpor zrychlení ($a = \text{acceleration}$) [N]
O_{zp}	odpor zrychlení vozidla [N]
O_{Zr}	odpor zrychlení rotujících částí vozidla [N]
p	tlak [Pa]
p_1	tlak v sacím potrubí [Pa]
p_2	tlak za kompresorem [Pa]
p_i	střední indikovaný tlak [daN/cm^2]
p_z	tlak v zásobníku [Pa]
P, P_2, P_k	výkon [W]
P_{1W}	činný příkon [W]
P_c	celkový příkon [W]
P_e, P_{ef}	efektivní výkon [W]
P_{ef}	výkon motoru na brzdě [W]
P_i	indikovaný výkon [W]
P_m	výkon motoru [W]
P_o	ideální (teoretický) výkon [W]
Pa	Pascal (jednotka tlaku)
Q	teplo [J]
Q_D	teplo sdělené pracovnímu plynu v ohříváku [%]
Q_{Od}	teplo odvedené z pracovního plynu v chladiči [%]
Q_{reg}	množství tepla regenerovaného v regenerátoru [J.kg^{-1}_{pal}]
Q_s	spalné teplo [J.kg^{-1}]
Q_{spal}	teplo uvolněné při spalování paliva [%]
$Q_{spal-tuv}$	teplo ze spalín využitě pro ohřev vody nebo vytápění [%]
Q_v	výhřevnost [J.kg^{-1}]

Q_{v-tuv}	teplo odvedené z jednotky (možno využít pro ohřev teplé užitkové vody) [%]
Q_{vz}	teplo spotřebované na přehřev spalovacího vzduchu
r	měrná plynová konstanta [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
r	střední poloměr svazku vinutí na rotoru [m]
r_d	dynamický poloměr kol [m]
r_k	poloměr rotujících částí [m]
R	efektivní poloměr (rotoru) [m]
rad	radián (jednotka rovinného úhlu)
s	sekunda (jednotka času)
s	skluz
S	entropie plynu [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
S	polarita hlavního pólu (sever)
S	síra
S	stoupání [%]
S_x	čelní plocha vozidla [m^2]
t	čas [s]
T	termodynamická teplota [K]
T_1	teplota nasávaného vzduchu [K]
T_z	teplota vzduchu v zásobníku [K]
t_{mp}	tuna měrného paliva (jednotka energie)
t_s	střední teplota pracovního plynu na studené hranici regenerátoru (Stirling)
t_T	střední teplota pracovního plynu na teplé hranici regenerátoru (Stirling)
U	napětí, jmenovité napětí [V]
U	vnitřní energie [J]
v	rychlost tělesa (vzduchu) [$m \cdot s^{-1}$], [$km \cdot h^{-1}$]
v_{max}	maximální dosažitelná rychlost [$m \cdot s^{-1}$], [$km \cdot h^{-1}$]
V	objem [m^3]
V_{K1}	škodlivý prostor klikové skříně [m^3]
V_{K2}	kompresní prostor válce [m^3]
V_n	pracovní objem jedné komory [m^3]
V_z	zdvihový objem [m^3]
V_z	objem zásobníku [m^3]
V_α	změna objemu pracovního válce nad pístem [m^3]
W	obsah vody [%]
W	práce [J]
W	watt (jednotka výkonu)
W_i	práce indikovaná [J]
$W_{už}$	práce užitečná [J]
W_z	práce ztrátová [J]
$\ddot{x}$	urychlení vozidla ve směru jízdy
$Z_{1,2,3,4,5}$	ztráty sáláním do okolí, ztráty způsobené chlazením bloku motoru apod.
Z_k	komínová ztráta – teplo spalín odvedené do komína [%]
Z_K	svislá reakce kola
α	úhel stoupání, úhel natočení klikového hřídele
α_p	otevření přepouštěcího kanálu
α_s	otevření sacího kanálu
α_v	otevření výfukového kanálu
δ_{max}	úhel výkyvu pístu
ε	kompresní poměr
ϕ_n	pružnost motoru
η	účinnost (přeměny, mechanismů) [%], [-]
η_c	celková účinnost [%], [-]

η_e	efektivní účinnost, též celková [%], [-]
η_{ef}	účinnost expanze vzduchu po vstřiku ze zásobníku [%], [-]
$\eta_{el\text{mot}}$	účinnost elektromotoru [%]
η_i	indikovaná účinnost [%]
η_i	účinnost stlačení vzduchu do zásobníku [%]
η_i	účinnost izotermické změny [-]
η_K	účinnost kotle [%]
η_m	mechanická účinnost [%], [-]
η_t	účinnost motoru termická [%]
η_{t1}	účinnost stlačení atm. vzduchu v prvním válci [%]
η_T	účinnost spalovací turbíny [%]
κ	Poissonova konstanta
λ	součinitel přebytku vzduchu [-]
μ_c	podíl uhlíku ve sloučenině (palivu) [%]
μ_H	podíl vodíku ve sloučenině (palivu) [%]
μ_s	podíl síry ve sloučenině (palivu) [%]
μ_o	podíl kyslíku ve sloučenině (palivu) [%]
Θ	poměr střední teploty plynu v motoru ku maximu této teploty
ρ	hustota $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
τ	čas [s]
$\ddot{\varphi}$	urychlení rotujících částí vozidla
Φ_n	pružnost motoru [-]
ω	úhlová rychlost rotoru $[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$

Seznam použitých zkratk

atm.	atmosférický
CNG	Compressed Natural Gas
ČR	Česká republika
DÚ	dolní úvrať
EHK	Evropská hospodářská komise
el.	elektrický
EU	Evropská unie
EURO	emisní norma stanovující limitní hodnoty výfukových exhalací
GmbH	společnost s ručením omezeným v Německu
HÚ	horní úvrať
IAD	individuální automobilová doprava
IAV	Ingeniergesellschaft Auto und Verkehr
LPG	Liquefied Petroleum Gas
max.	maximální
MDI	firma Motor Development International
min.	minimální
OHC	Over Head Camshaft (typ ventilového rozvodu pístového motoru)
PM	pevné částice (particulate matter)
R	regenerátor (Stirlingův motor)
SS	studená strana (válec (Stirlingova motoru)
S.S.	hranice spalovacího systému (Stirlingův motor)
TS	teplá strana (válec Stirlingova motoru)
USA	Spojené státy americké
ÚVMV	Ústav pro výzkum motorových vozidel

WTW	Well to Wheels (analýza energetické náročnosti)
ZEE	Zero Emission Engine

Úvod

Doprava je atributem lidské činnosti od jednoduchého pohybu (chůze) až po komplikovanou činnost za pomoci různých prostředků. Je vykonávána nepřetržitě v čase i prostoru. Ke každému pohybu je nezbytná energie. Pohybová (kinetická) energie je v dopravě získána přeměnou jiných druhů energií. To se děje za různých podmínek, které jsou civilizačně i společensky sledovány. V následujících odstavcích je analyzována energetická náročnost dopravy v několika souvislostech.

Jimi jsou:

- účinnost přeměny (ekonomika),
- ekologická a hygienická zátěž,
- bezpečnost.

Studium problému předpokládá určité znalosti z fyziky, chemie i matematiky. Pro zjednodušení je látka z těchto oborů místně zopakována.

V celé historii dopravy byly hledány a vyvíjeny nové systémy, které měly obor zdokonalit. Vývoj se zpočátku soustředil na rychlosti a kapacity dopravních prostředků. Často se tak dělo bez ohledu na bezpečnost a ekologickou nebo civilizační zátěž. Takový rozvoj je považován za extenzivní a je evidentní, že nemůže dále pokračovat. Věda se tedy soustředí na intenzivní rozvoj oboru. V rámci tohoto programu jsou hledány a vyvíjeny systémy s vysokou účinností přeměny energií, systémy ekologické a bezpečné.

Za počátek motorizované dopravy je označován konec devatenáctého století, i když ojedinělé případy jsou dokumentovány již dříve. Rozvoj oboru ve dvacátém století je už popsán statistikami celkem podrobně. Důležité je připomenout, že za zhruba 130 let masového využívání systémů přeměny energie – motorů, byly již vícekrát učiněny pokusy o zásadní změnu koncepce. Dominantní postavení získal spalovací motor. To však neznamená, že ostatní byly zapomenuty. S periodou, která zhruba kopíruje generaci lidskou, přicházejí nové generace elektromotorů, parních, teplovzdušných nebo kompresních motorů. Jsou zdokonalovány akumulace energie a jsou objevovány nové druhy paliv.

Tato publikace může přispět v oboru informacemi o systémech, kterých se přeměny energií týkají.

1. Energie

1.1. Základní informace

Definice: Energie je schopnost hmoty konat práci. Je tedy mírou pohybu, což je pro dopravu důležité.

Původ slova je v řeckém slově ENERGEIA = činnost, aktivita.

V izolované soustavě (např. na Zemi) nevzniká, ani nelze spotřebovat. Lze jen převádět (přeměnit)

Jednotlivé formy energie lze navzájem převádět bez omezení s výjimkou převodu tepelné energie. Tato skutečnost má zásadní význam pro studium účinnosti spalovacích, teplovzdušných a kompresních motorů.

S energií souvisí 3 termodynamické věty (zákony), z nichž 1. a 2. jsou pro dopravu významné.

První termodynamický zákon – zákon o zachování energie. „Celkové množství energie izolované soustavy zůstává zachováno“.

Matematický zápis vypadá takto:

$$dU = \partial Q + \partial W, \text{ kde} \quad (1.1)$$

dU	změna vnitřní energie termodynamické soustavy
∂Q	teplo
∂W	práce

Vztaženo k tepelným agregátům, motorům, lze zákon interpretovat také v úpravě:

$$W = \Delta U - Q \quad (1.2)$$

Chceme-li, aby soustava konala mechanickou práci W , musíme vnitřní energii U odebrat teplo Q .

Pozn.: Z prvního termodynamického zákona rovněž plyne, že neexistuje žádná tepelná soustava, která by konala práci, aniž by potřebovala energii (perpetuum mobile).

Druhý termodynamický zákon – zákon o vzrůstu entropie

Volně interpretováno: „Teplo samovolně nepřechází z tělesa chladnějšího na teplé, ale naopak.“ Stroj, který pracuje tak, že přijímá teplo Q_1 a teplo Q_2 je z něj odváděno ($Q_2 < Q_1$), může konat práci.

$$W = Q_1 - Q_2 \quad (1.3)$$

Třetí termodynamický zákon – zákon o nulové absolutní teplotě

V pozemní dopravě nenachází uplatnění.

1.2. Energie – jednotky

Obecně se energie označuje E . Jde o skalární fyzikální veličinu (nemá směr).

Základní jednotkou je joule. Pojmenování je podle anglického fyzika jménem James Prescott Joule (1818-1889).

Definice joule: Práce síly 1 N na dráze 1 m; $J = N.m$

Další jednotky užívané pro energii:

- elektronvolt $eV = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$,
- kilowatthodina $kWh = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$,
- tuna měrného paliva $t_{mp} = 2,931 \cdot 10^{10} \text{ J}$,
- kalorie $cal = 4,185 \text{ J}$.

1.3. Energie – vztahy

Rozeznáváme dvojí pojetí E .

- Newtonova fyzika. V naprosté většině energetických analýz v pozemní dopravě vystačíme s tímto pojetím.
- Obecná teorie relativity (Einstein). Okrajově nachází uplatnění např. ve vodní dopravě, při energetické analýze atomové ponorky. Očekává se uplatnění masové v delší budoucnosti. Podle obecné teorie relativity přísluší každému tělesu (každé hmotě) energie podle vztahu:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = mc^2 + \frac{1}{2}mv^2 + \frac{3}{8}m\left(\frac{v^4}{c^2}\right) + \dots, \text{ kde} \quad (1.4)$$

m	hmotnost tělesa [kg],
c	rychlost světla [m.s^{-1}],
v	rychlost tělesa [m.s^{-1}],
mc^2	klidová (vazební) energie tělesa [J],
$\frac{1}{2}mv^2$	kinetická energie tělesa [J].

Pravá strana rovnice je nekonečná řada upravená pomocí Taylorova rozvoje. Prvý člen pravé strany představuje tzv. „vazební energii“. Jeho hodnota je $9 \cdot 10^{16} \text{ J}$ pro každý jeden kg hmoty, tj. $25 \cdot 10^9 \text{ kWh}$. Lze ji uvolnit několika způsoby (štěpením, fúzí nebo tříštěním jádra atomu).

Pro dopravu má dosud nepodstatný význam (jaderné ponorky – z uvolněné energie je využito teplo pro ohřev páry a výrobu elektrické energie, která je znovu přeměněna na kinetickou).

Druhý člen pravé strany představuje kinetickou energii hmoty. Protože v dopravě užíváme inertoní soustavu Země (považujeme Zemi za pevnou základnu a vše vztahujeme k ní), bude tento druh energie pro další výklad zásadní. Další členy pravé strany (nekonečná řada) nebudeme pro jejich velmi nízkou hodnotu uvažovat.

1.4. Energie – druhy, formy, podoby

Pro dopravu je zásadní E_K – kinetická energie. Všechny ostatní druhy a formy energií musí být k vykonávání dopravy přeměněny na tuto:

$$E_K = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.5)$$

Kinetická energie je tedy jednou polovinou součinu celkové hmotnosti dopravního prostředku a kvadrátu jeho rychlosti. Pokud se dopravní prostředek nepohybuje, má energii polohovou (též potenciální, statickou), pro kterou rovněž platí vztah:

$$E_S = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1.6)$$

Energetika existuje jako samostatný obor fyziky. V názvosloví oboru je používáno více vyjádření pro druhy energie. S ohledem na dopravu můžeme připomenout nejméně dva typy rozdělení.

Energie podle mechanismu působení

- mechanická
 - kinetická (pohybová)
 - potenciální (polohová)
 - gravitační
 - pružinová
 - tlaková
- elektrická
- magnetická
- záření / vlnění
- vnitřní (paliva: tepelná, jaderná, chemická)

Energie podle zdroje nebo systému přeměny

- helioenergie (sluneční, solární)
- hydroenergie (vodní, gravitační)
- aeroenergie (vzduch, vítr, ...)
- geotermální (sopečná činnost)
- muskulární (svalová)
- světelná (laser)
- parní
- palivová (hoření), chemická

Jiné výrazy pro energie

- translační (pohyb planet)
- slapová (příliv, odliv)
- termální (teplo Země)
- geomagnetická (póly Země)
- gyroenergie (setrvačnick)

Z uvedených druhů energií a jejich rozdělení vyplývají následující úvahy, respektive otázky:

a) Které druhy energií lze pro dopravu využívat bez přeměny? Jinými slovy: které z uvedených druhů mají přímo kinetickou energii využitelnou pro dopravu? Zde jsou příklady některých.

- Hydroenergie – např. tekoucí řeka je využívána pro splývání vorů
- Aeroenergie – proud vzduchu a plachetní pohon
- Gravitační – spádová doprava lanovek nebo výtahů (pro opakování děje je nezbytné umístění dopravních prostředků do výchozí polohy za cenu vynaložení jiné energie)
- Muskulární – chůze, běh, doprava pomocí zvířecí síly. Zařazení této energie do skupiny kinetických energií je sporadické, lidské nebo zvířecí tělo je systémem (agregátem) přeměny. Na kinetickou je v něm přeměněna chemická energie potravin.

b) Které druhy energií je nutno na kinetickou přeměnit a kolikrát?

c) Jaké existují systémy (agregáty) přeměn energií na kinetickou?

d) S jakou účinností systémy přeměn pracují?

e) S jakou bezpečností a s jakým vlivem na ekologii systémy přeměn pracují?

f) Jaká je obnovitelnost zdrojů energií?

Na tyto otázky hledáme a někdy nalézáme odpovědi v následujících odstavcích.

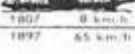
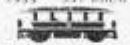
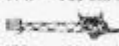
2. Energie – civilizace – doprava

2.1. Vývoj dopravy

Prvotně byla doprava uskutečňována člověkem prostřednictvím muskulární (svalové) energie. Chůze nebo běh člověka spočívají ze střídavého pohybu jeho nohou. K jejich vyzdvižení je nezbytné překonávat odpor nejméně rovnající se tíze zdvihané části těla. Stejně tak je tomu u zvířat, které člověk později zotročil pro dopravu. Za zmínku stojí, že doprava svalovou energií nejen zvířecí, ale i lidskou je vykonávána stále, i když mnohdy už zprostředkovatelně (cyklistika, koňské kočáry, jízda na koni, ...).

V historii dopravy, v průběhu mnoha let, došlo ke dvěma zásadním zlomům, které znamenaly nejen řádové zrychlení dopravy, ale také změny v energetické náročnosti. Těmito zlomy byl vynález kola a vynález agregátu přeměny energie – motoru. Zatímco před vynálezem kola byla doprava uskutečňována kráčením nebo smykem, odvalování přineslo několikanásobné zrychlení. Přestože odpor valení (jak bude dále uvedeno) je nižší, než odpor smýkání (tření), nedošlo ke snížení absolutní energetické náročnosti, protože zrychlením (viz vztah pro kinetickou energii, kde vliv rychlosti je exponenciální) se zvýšila. Podobný vliv měl i vynález motoru. Motor je systémem pracujícím s určitou účinností, která je vždy menší než 100 %. Jak bude později dokázáno energetickou analýzou, nebývá v současné dopravě pracováno s celkovou účinností systému přeměn energií na kinetickou vyšší než 50 %.

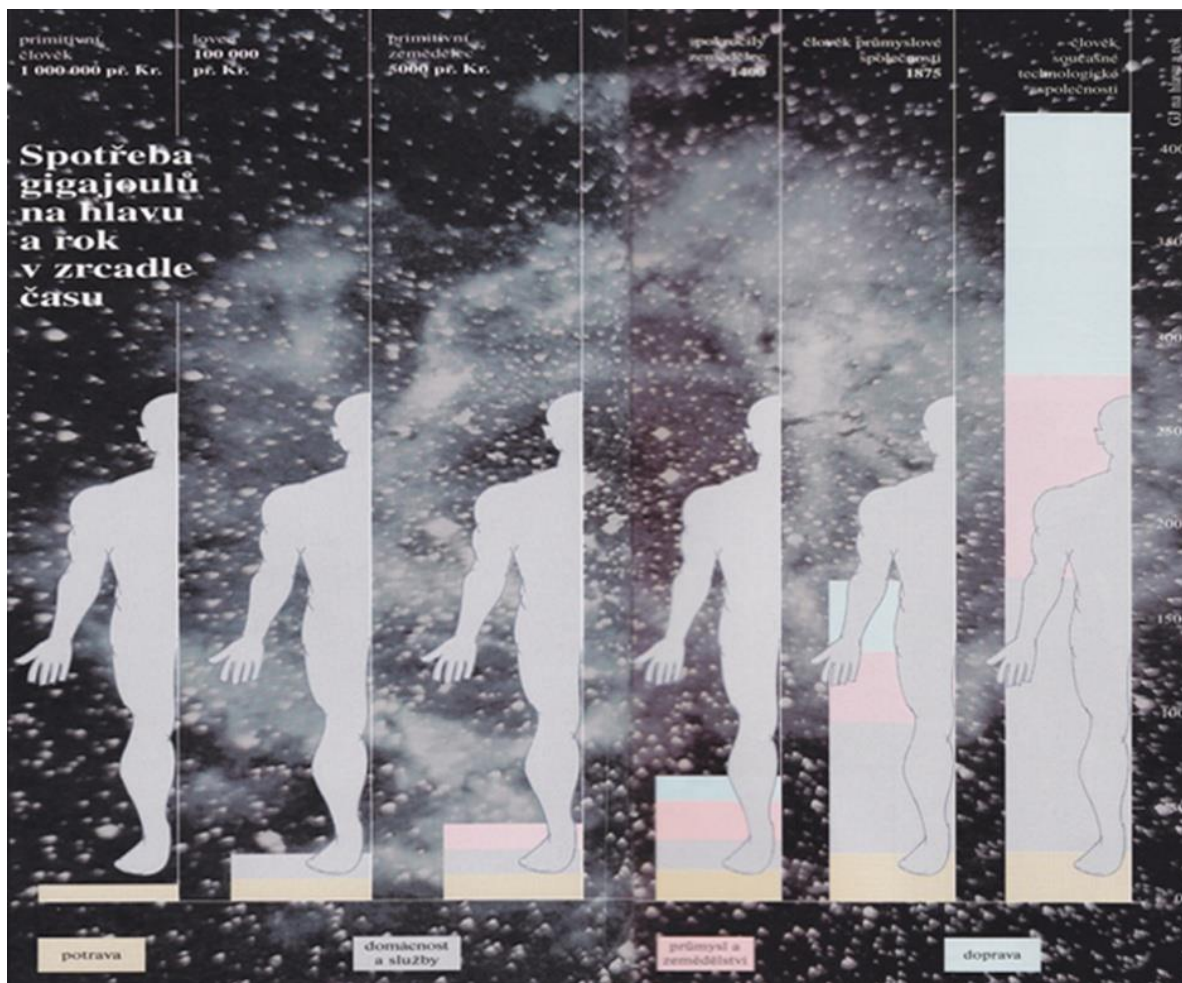
Na *obr. 2-1* je zobrazen vývoj dopravy v historii tak, jak byl zpřehledněn v roce 1980. V tabulce jsou uvedeny jen nejužívanější dopravní prostředky a jen nejběžnější pohonné jednotky. V průběhu celé historie byly navrhovány další alternativní pohony, alternativní paliva a také alternativní akumulátory energie. Tato snaha trvá stále.

typ energie	pohonná jednotka	dopravní prostředek letopočet a rychlost			
muskulární		 5 km/h	 4 km/h	 15 km/h	
muskulární		 1840 15 km/h  3 km/h		 1900 6 km/h	
aeroenergie		 1600 30 km/h	 5 km/h	 25 km/h	 60 km/h
pára		 1902 120 km/h  1770 4 km/h	 1900 24 km/h  1807 8 km/h	 1919 204 km/h  1825 45 km/h	 1852 70 km/h
elektromotor		 1880 6 km/h  1880 6 km/h	 1897 65 km/h  1880 5 km/h	 1955 311 km/h  1879 6 km/h	 1884 23 km/h
spalovací motor		 1957 634 km/h  1885 10 km/h	 1959 69 km/h  1903 24 km/h	 1930 230 km/h  1920 100 km/h	 1947 255 km/h  1906 50 km/h
turbína		 1970 1007 km/h	 1963 247 km/h	 1960 250 km/h	 1959 2388 km/h  1939 850 km/h

Obr. 2-1: Historický přehled parametrů dopravy [1]

2.2. Vývoj energetické náročnosti

S rozvojem civilizace se člověk a jeho způsob života, stávají největším spotřebičem energie. Tato skutečnost je graficky znázorněna na obr. 2-2.



Obr. 2-2: Energetická náročnost podle času a spotřebiče [2]

Graf představuje energetickou náročnost člověka v průběhu času. Na ose x je čas (letopočet), na ose y je energetická náročnost v GJ na osobu a rok. Celková náročnost je rozdělena do pásem, nejvyšší pásmo představuje energetický nárok dopravy. Je logické, že nárok není stejný v různých regionech ani v různých společenských vrstvách. Nejvyšší je v USA, následuje Evropa a nejnižší je v Africe. Asie zaznamenává největší index nárůstu.

Ze statistiky dále vyplývá:

- Průměrná energetická náročnost na dopravu představuje v současnosti cca 140 GJ (140 miliard joule) na člověka a rok. Hovoříme-li o energetickém nároku dopravy, nejedná se pouze o potřebu pro pohyb dopravních prostředků, ale o energii potřebnou k uskutečnění dopravy.
- Je to cca 1/3 celkové energetické náročnosti a zaznamenala největší nárůst za posledních sto let.
- Přepočteno na palivo pro dopravu je to cca 4 375 litrů benzínu, nebo 6 363 litrů etanolu na člověka a rok.

Aniž bychom prováděli jakékoliv extrapolace vývoje, je evidentní, že takovou energetickou zátěž nemůže civilizace dlouho vydržet. Extenzivní rozvoj je nezbytné změnit v rozvoj intenzivní, trend v potřebě energie je nezbytné zvrátit. Doprava zahrnuje 3 faktory, které mají vliv na energetickou potřebu. Spatřovány jsou ve třech oborech dopravy:

Faktory na straně dopravních prostředků

- Jízdní odpory,
- účinnost přeměny energií na kinetickou,
- rekuperace energie,
- kombinace systémů.

Faktory na straně dopravní infrastruktury

- Jízdní odpory (stoupání, kvalita vozovek, ...),
- plynulost dopravy,
- dopravní zařízení a přechodové stavy.

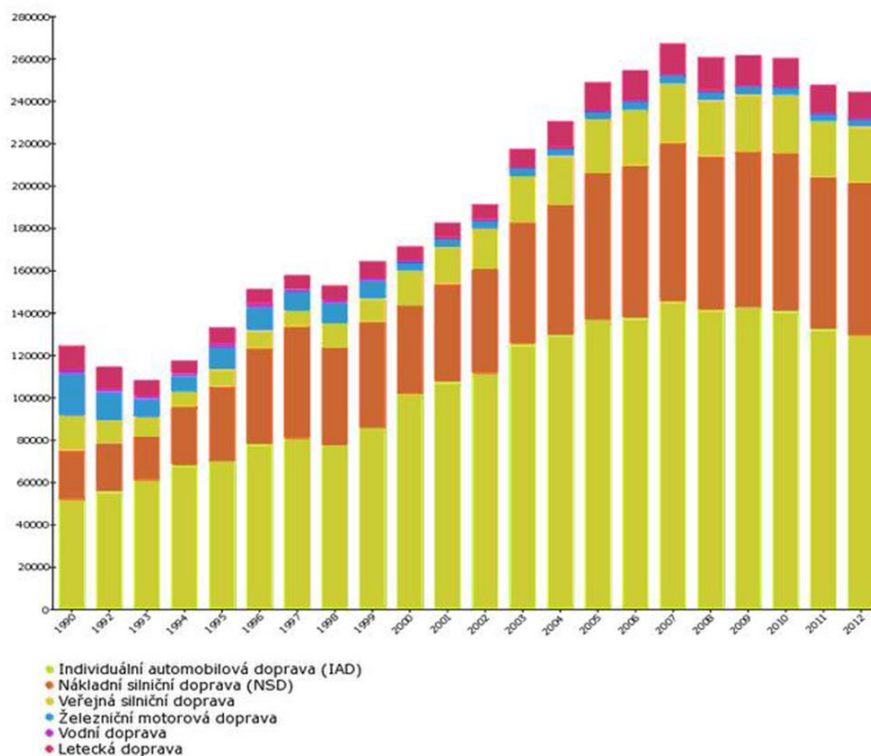
Faktory na straně řízení a na straně sociální

- Logistika (organizace),
- dopravní právo,
- úroveň znalostí a zkušeností (osvěta),
- bezpečnost.

Vyjmenované faktory jsou konjunktní a mohou tedy působit společně. Kromě těchto existuje ještě řada jiných faktorů, jejichž působení není plně v rukou člověka (např. počasí). Následující odstavce se zabývají jen faktory první skupiny.

2.3. Energetická náročnost dopravy v České republice

Energetická náročnost je společensky vysoce sledovaný parametr. Statistiky jsou zpracovávány z více hledisek. Pro náš obor má význam statistika uvedená v následujícím grafu.

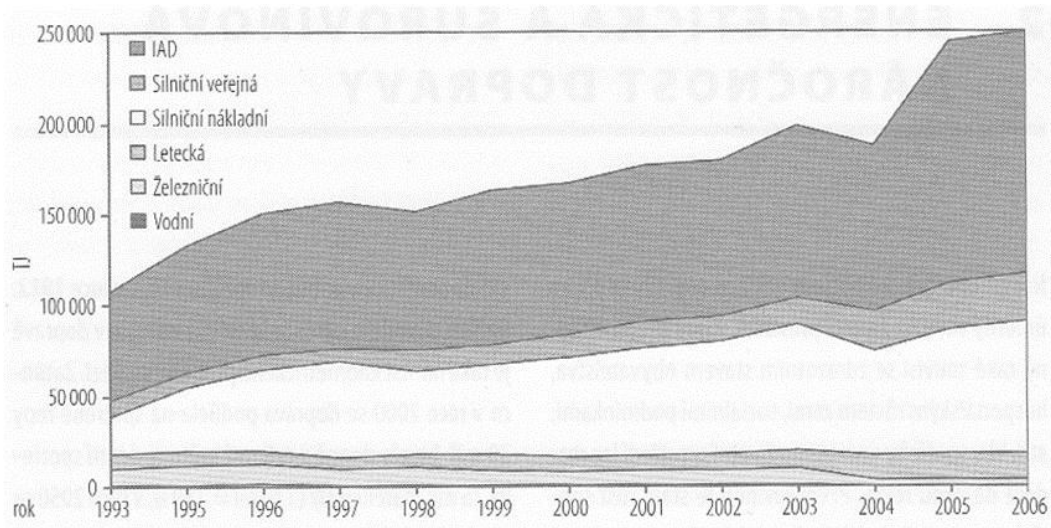


Graf 2-1: Energetická náročnost dopravy [3]

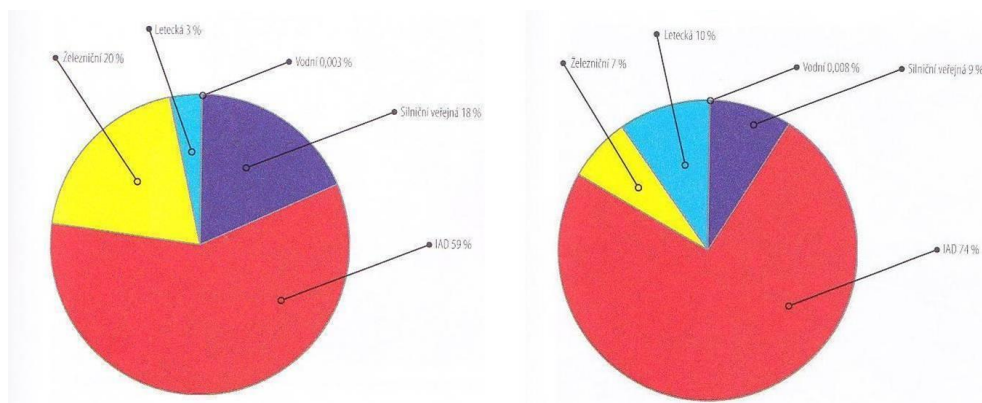
Z grafu vyplývá:

- Jednotky spotřeby na ose y jsou v terajoulech (10^{12}).
- Největším „spotřebičem“ energie je individuální automobilová doprava (IAD).
- V období 1993-2008 vzrostla spotřeba o více než 140 %, od té doby mírně klesá.
- Z grafu nelze určit, zda k poklesu dochází v důsledku snížení dopravních výkonů, nebo v důsledku intenzivního řešení techniky.

Na následujících grafech je zobrazena struktura spotřeby v dopravě podle druhu dopravy a struktura konečné spotřeby společnosti.



Graf 2-2: Energetická náročnost dopravy, ČR [4]



Graf 2-3: Porovnání dělby dopravy v ČR v letech 1990 a 2005 [4]

Z různých statistik následně vyplývá:

- Porovnány jsou „osobokilometry“ (dopravní výkony).
- Výrazný je nárůst IAD na úkor železniční a veřejné silniční, proto bude nadále věnována největší pozornost této.
- V ostatních zemích EU je trend velmi podobný.
- V USA představuje IAD v současnosti cca 88 %.
- V nákladní dopravě jsou trendy různé, podle polohy zemí. Přímořské země mají vysoký podíl námořní nákladní dopravy (cca 40 %), to ovšem neznamená, že by absolutní hodnota silniční byla v porovnání s vnitrozemím nižší. Ve vnitrozemí převládá silniční (cca 83 %). Letecká nákladní představuje jen nepatrný podíl.

- ČR je svojí polohou ve středu Evropy zatížena dopravou silně. Je výhodné pro průmysl a obchod zde budovat centrální sklady a překladiště. To zatěžuje region jak energeticky, tak ekologicky.
- Začleněním do EU ztrácí postupně regionální sledování význam.

3. Druhy dopravy

Doprava jako nedílná součást lidské činnosti je vykonávána za mnoha různých podmínek. V průběhu jejího rozvoje jak technického, tak sociálního bylo nezbytné tuto činnost strukturovat. To znamená, že začala být dělena a zařazována do skupin podle mnoha různých kritérií. Takovéto dělení mělo několik významů, z nichž kritérium energetické náročnosti nebylo tím nejdůležitějším. Původně toto dělení mělo pravděpodobně význam právní a sociální. Pravidla provozu musela být odlišná jak pro různá prostředí (země, voda, vzduch), tak pro různý dopravní prostředek. Při energetické analýze se však zařazení do různých skupin hodí zejména pro posouzení jízdních odporů. Na *obr. 3-1* je patrné základní dělení podle různých kritérií, z nichž první je prostředí.

Prostředí	Trat'	Způsob	Prostředek	Pohon (energie)
Pevnina	silnice	krok	bicykl	muskulární motor?
	terén	kolo	motocykl	
	železn.	smyk	automobil	
	kombi	bezkont.	saně	
			vznášedlo	vzduch
			vlak (tramvaj)	magnet
Voda	vnitro	povrchová	loď	aeroenergie
	moře	podpovrchová	ponorka	motor?
		bezkontaktní	vznášedlo	hydroenergie
Vzduch	vzduch	vzduch	x	x

Obr. 3-1: Základní dělení dopravy

3.1. Prostředí pro dopravu

Základní dělení dopravy podle prostředí (pevnina, voda, vzduch, vesmír) naznačuje také, jakým způsobem bude doprava vykonávána a to dále určuje její energetické nároky. Logicky je očekáváno, že největší podíl energie připadne na pozemní dopravu. Hlavním důvodem je to, že zákazníci dopravy – lidé, žijí na zemi a požadují, aby dopravní možnosti sahaly co nejbližší k jejich pobytu. Pokud budeme zkoumat náklady na dopravu jako celek, můžeme dojít také k nízkým nákladům vodní, nebo vzdušné dopravy v důsledku absence dopravní infrastruktury. Budování silniční sítě, oproti zajištění splavnosti toků, budování přístavů a letišť, může být dražší. To však není předmětem této publikace. Za zmínku ještě stojí, že některé dopravní prostředky jsou technicky schopné prostředí kombinovat. Existují obojživelné automobily a také vývoj „trimediálních“ prostředků, které kombinují pohyb na pevnině, ve vodě, ve vzduchu. Zatím nejsou hromadně rozšířeny.

3.2. Tratě pro dopravu

Tratě a systémy, na kterých je doprava vykonávána, jsme zvyklí označit jako dopravní infrastrukturu. Na energetické náročnosti se podílejí významně. Jak bude dále uvedeno, mají významnou roli ve velikosti odporů, které dopravní prostředky překonávají.

3.3. Způsob pohybu dopravních prostředků

Od nejjednoduššího způsobu pohybu, ke kterému postačí jen svalová energie a který nevyžaduje žádný prostředek – kroku, až po let vesmírem, bude způsob pohybu také významným činitelem energetické náročnosti. V této souvislosti stojí za zmínku, že historický přechod dopravy od kroku nebo smyku k odvalování, který se datuje vynálezem kola, usnadnil dopravu ve smyslu intenzity, a také ve smyslu úspory *měrné* spotřeby energie.

3.4. Prostředky pro dopravu

Rozmanitost dopravních prostředků se na energetické náročnosti podílí zásadním způsobem. Od primitivních, kterými může být např. bicykl (ale v jistém smyslu i brusle, nebo koloběžka), až po velmi složité, jsou zařízeními pro uskutečnění nebo usnadnění pohybu a zpravidla také zařízeními pro přeměnu energie na kinetickou.

V dalším textu publikace bude soustředěna pozornost na energetickou analýzu silničních dopravních prostředků s důrazem na automobil a motocykl. Teorie jsou aplikovatelné i na ostatní dopravní prostředky s jistými omezeními, nebo úpravami. Důvody jsou evidentní. Podle statistik bylo v roce 2010 ve světě evidováno 1,015 miliard automobilů. Odhadováno je, že počet motocyklů a mopedů se blíží nebo překračuje 1 miliardu.

Další statistiky naznačují, že počet těchto vozidel se může do roku 2050 zvýšit 3x. V takovém případě bude moci každý dospělý obyvatel planety Země „nastartovat a jet“. Nedojde-li k intenzivnímu rozvoji energetické náročnosti, může to vést k vyčerpání energetických zdrojů, nebo k takovému nárůstu cen energií, že se tyto stanou pro část populace nedostupné.

4. Kinetická energie

4.1. Kinetická energie přírodní

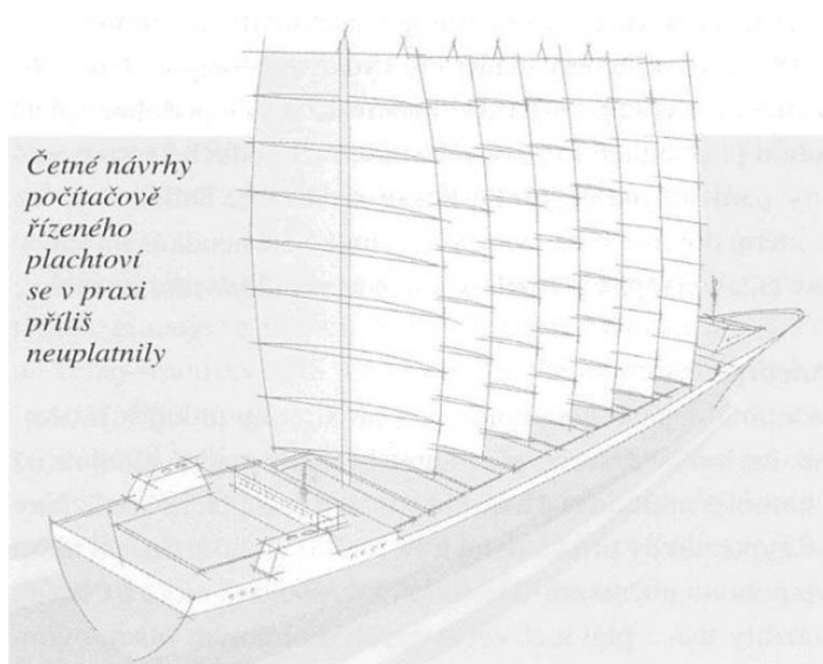
Některé dopravní prostředky mohou využívat pohybovou energii vyskytující se v přírodě již v této podobě. V silniční dopravě k tomu téměř nedochází, i když v historii se vyskytuje několik případů. Z přírodních energií jsou v dopravě využívány:

- Aeroenergie – E_K větru
- Hydroenergie – E_K vodního toku
- Gravitační energie – E_K zemské přitažlivosti

Pozn.: Také ostatní přírodní energie mohou být v podobě EK využitelné pro dopravu, ale již zprostředkovaně, například k výrobě elektrické energie (slapová).

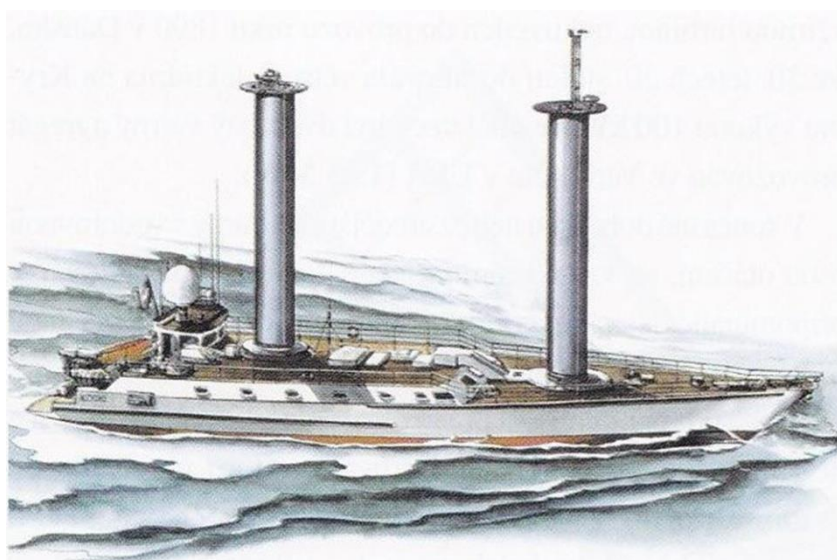
Aeroenergie

Příklady přímého využití aeroenergie v dopravě:



*Četné návrhy
počítačově
řízeného
plachtoví
se v praxi
příliš
neuplatnily*

Obr. 4-1: Příklad přeměny aeroenergie na kinetickou v dopravě – plachetní lodě [2]

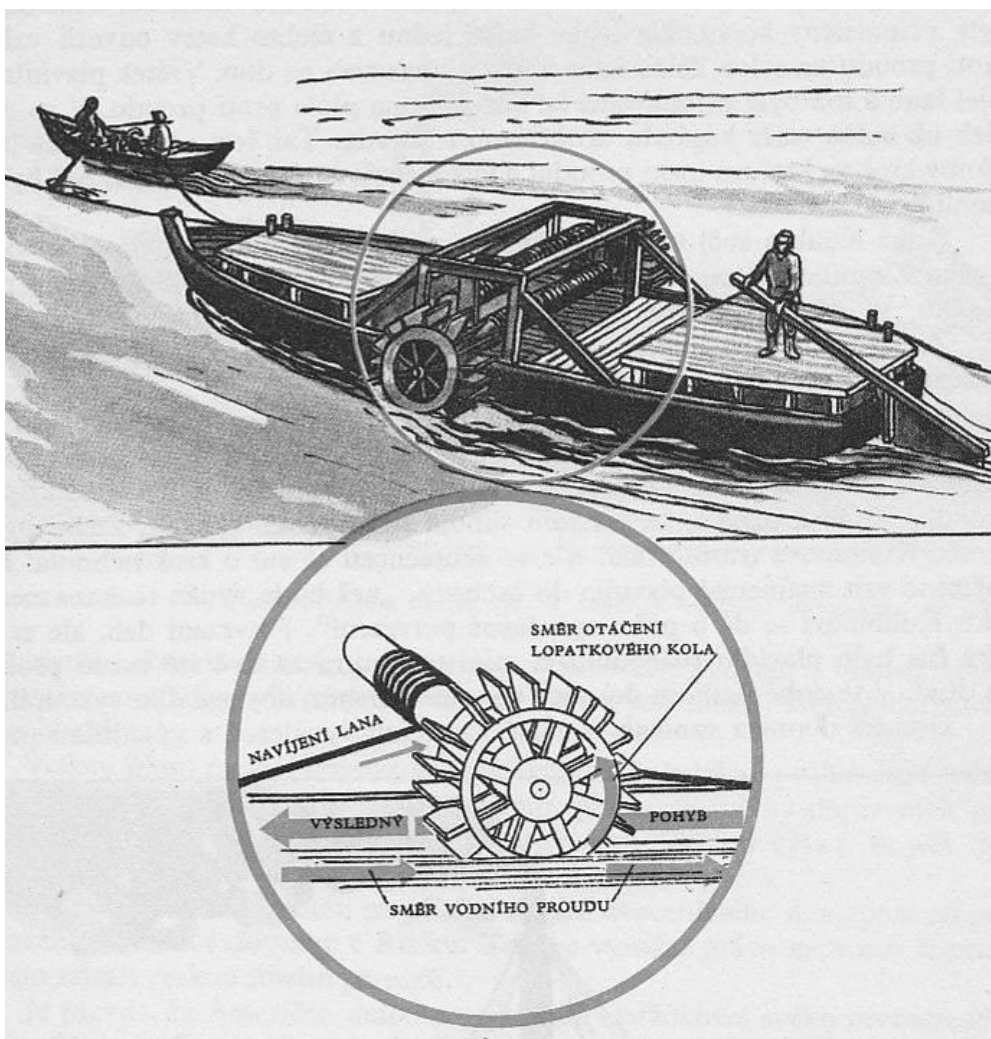


Obr. 4-2: Příklad přeměny aeroenergie na kinetickou v dopravě – Flettnerův motor [2]

Kinetická energie proudění vzduchu v důsledku teplotních rozdílů atmosféry je využívána zejména v letecké a vodní dopravě.

Hydroenergie

Proudění vody v říčních tocích je v podstatě energie gravitační. Proudění mořské vody může být energií slapovou (příliv a odliv) nebo rovněž gravitační, ale i přeměněnou aeroenergií (vlny). Ve vodní dopravě je využívána často, i když její masivní využití je obtížné. Splývání lodí nebo vozů je pomalé pro současnou dopravu. V historii bylo zaznamenáno rovněž několik utopických projektů.



Obr. 4-3: Příklad přeměny aeroenergie na kinetickou v dopravě – utopické projekty [5]

Gravitační energie

Potenciální (polohová E_p) energie hmoty na Zemi se po jejím uvolnění mění v kinetickou gravitační. Toto využívá několik projektů dopravních zařízení (tzv. spádová dopravní zařízení např. v lomu apod.) V silniční dopravě může tato energie být využita při rekuperaci (vrácení energie do systému). Princip vychází z myšlenky maření energie vozidel jedoucích v klesání. Využití však už není přímé, ale zprostředkované např. akumulací v setrvačnicku.

4.2. Energie a systémy přeměn na kinetickou

Kinetická energie nezbytná pro dopravu může být získána přeměnou energií jiného druhu. K přeměně dochází za následujících podmínek:

a) Proces přeměny je vždy ztrátový, to znamená, že získaná kinetická energie je v absolutní hodnotě vždy menší, než energie poskytnutá k přeměně.

Platí vztah:

$$E_1 > E_2 > E_i > \dots > E_K$$

b) Účinnost přeměny η vyjadřuje ztráty z procesu přeměny a jde o údaj.

- Číselný v intervalu $\langle 0,1 \rangle$,
- procentní [%].

c) K přeměně na EK může docházet ve více stupních, hovoříme pak o vícestupňové přeměně. Celková účinnost vícestupňové přeměny je součin účinnosti každého stupně. Platí:

$$\eta_c = \prod \eta_i \quad (4.1)$$

d) Konečným distributorem EK na kola nebo jiný prostředek pohybu automobilu nebo motocyklu je motor.

V zásadní převaze jde o motor spalovací (viz dále), elektromotor, nebo výjimečně parní či vzdušný (kompresní) motor. Výjimku tvoří systém s akumulovanou EK (gyropohon nebo pružina), kde mechanismus převodu na kola nenazýváme motorem.

e) Energie potřebná k přeměně může být dopravnímu prostředku doručena několika způsoby:

- Akumulací v zásobníku energie přímo ve vozidle (tzv. palubní energie). Příkladem jsou nádrže paliv, akumulátory el. energie, setrvačníky, tlakové nádoby, ...
- Kontinuální dodávkou. Tento způsob vyžaduje trvalé připojení vozidla ke zdroji energie. Příkladem jsou trolejbusy a tramvaje.
- Autosběrem z prostředí. Příkladem jsou solární automobily.

5. Potřeba energie

Energie dodaná dopravnímu prostředku je zčásti využita dvěma způsoby, a zčásti nevyužita. Využitá energie může být:

- 1) Přeměněna na kinetickou, která je dále využita pro pohon dopravního prostředku.
- 2) Využita infrastrukturou dopravního prostředku. Infrastrukturou se rozumí příslušenství, které zajišťuje řízení a provoz vozidla. Zatímco primitivní dopravní prostředky měly nároky na tento druh využití energie nulový, moderní prostředky jsou stále náročnější. Odhaduje se, že moderní automobily užívají energii k řízení systému a komfortu cestujících v rozmezí 3 – 10 %. Je-li dodaná energie využita ještě k funkci jiného zařízení (např. pohonu technologických výbav speciálních vozidel), může být rozmezí ještě širší.

Kinetická energie podle bodu 1) je cele využita na překonání jízdních odporů.

6. Jízdní odpory automobilu a motocyklu

Definováno je pět odporů, na jejichž překonání je E_K využita. Jsou to:

- odpor vnitřního tření – účinnost mechanismů η ,
- odpor valení $O_f (R_R)$,
- odpor vzduchu $O_v (R_A)$,
- odpor stoupání $O_s (R_\alpha)$,

- odpor proti zrychlení $O_z (R_a)$.

S výjimkou prvního odporu η jsou ostatní vyjádřeny jako síla [N]. Platí, že celkový odpor vozidla:

$$O_c = \frac{O_f + O_v + O_s + O_z}{\eta} \quad (6.1)$$

K jednotlivým odporům je možno připomenout:

Odpor vnitřního tření η <0;1> nebo [%] je také definován jako účinnost mechanismů pohonu dopravního prostředku. Je součinem účinnosti jednotlivých stavebních prvků konstrukce (např. u automobilu: motor, spojka, rychlostní skříň, hřídele a klouby, diferenciál a kola).

Odpor valení O_f vzniká deformací kola ve styku s tratí, po které se odvaluje. V případě pneumatiky jde o deformaci pneu.

Odpor vzduchu O_v je aerodynamický odpor vozidla. Je tedy relativní silou k prostředí. Vzniká obtokem vzduchu kolem karosérie a vířením rotujících kol. Může nabývat i záporných hodnot, pokud rychlost vzduchu ve směru jízdy je vyšší, než rychlost vozidla (vítr v zádech). Výsledný O_v je vektorovým součtem síly větru a odporu ve směru jízdy.

Odpor stoupání O_s je dán sklonem dráhy, po které se vozidlo pohybuje. V klesání nabývá záporné hodnoty. Je vektorovým součtem příčného a podélného sklonu dráhy. V rovině má nulovou hodnotu.

Odpor proti zrychlení (setrvačnosti) O_z je součtem odporů proti zrychlení vozidla ve směru jízdy a odporů rotujících hmot proti jejich roztáčení. Může při zpomalení nabývat záporných hodnot. Při rovnoměrném pohybu má nulovou hodnotu.

Podrobný výklad jízdních odporů a jejich výpočet je uveden samostatně.

7. Vztah jízdních odporů k výkonu motoru a k energii

Výkon motoru P_m [W] je veličina, která bývá u dopravních prostředků zajišťována různými metodami. Metody zjišťování a výpočty jsou uvedeny v odstavci popisujícím spalovací motor.

Chceme-li vyjádřit, jaká část výkonu P je spotřebována pro překonání kteréhokoliv jízdního odporu, postačí tento násobit rychlostí vozidla. Platí tedy:

$$P_{O_i} = O_i \cdot v, \text{ kde} \quad (7.1)$$

P	výkon [W],
O_i	jízdní odpor [N],
v	rychlost vozidla [m.s ⁻¹].

Chceme-li vyjádřit, jaká energie je vynaložena na překonání kteréhokoliv jízdního odporu, postačí výkon vynásobit časem působení. Platí tedy:

$$E_{O_i} = P_{O_i} \cdot t, \text{ kde} \quad (7.2)$$

E	energie [W.s], [kWh],
P	výkon [W],
t	čas [s].

Pro úplnost nutno připomenout, že $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$.

8. Hodnota jízdních odporů

8.1. Odpor vnitřního tření

Jak bylo již vysvětleno, jedná se o účinnost mechanismů agregátu přeměny energie na kinetickou a účinnost přenosu sil na mechanismy pohybu vozidla. Nejde tedy o účinnost samotné přeměny energií. Každý mechanismus pracuje s určitými ztrátami. Nejen mechanismy, ale i media (kapaliny a plyny) v pohybu musí překonávat odpor tření a několik dalších. Je tedy k jejich práci využita určitá energie, se kterou už dále nelze počítat pro pohyb dopravního prostředku. Účinnost je tedy poměr sledované veličiny na výstupu z mechanismu ku sledované veličině na vstupu do mechanismu.

Pozn.: Jako příklad může posloužit proces spalovacího motoru. Mezi jeho kinematickými dvojicemi jsou vazby posuvné (píst ve válci, ventily atd.), vazby rotační (klikový mechanismus, vačková hřídel) i vazby sférické (zvedátka a vahadla ventilů), proudí zde média plynná (sání směsi do válce, výfukové plyny) i kapalná (mazání). Vše se pohybuje s určitým třením. Žádná z konstrukčních částí není absolutně tuhá a dochází k jejich pružné deformaci a díky hysterezi materiálu i energetickým ztrátám.

Protože se jedná o rozsáhlý soubor účinností, jejichž výčet by nebyl nikdy úplný, označujeme součin těchto jako odpor vnitřního tření a vyjadřujeme je jediným číslem v intervalu $<0;1>$.

Pro automobil a motocykl, kde mechanismy představují nejčastěji tyto konstrukční části: motor, spojka, rychlostní skříň, klouby a hřídele, rozvodovka s diferenciálem a ložiska kol, je hodnota uváděna v intervalu od 0,8 až 0,98 (vysoká účinnost se zřejmě vztahuje k elektromobilům, kde několik mechanismů odpadá).

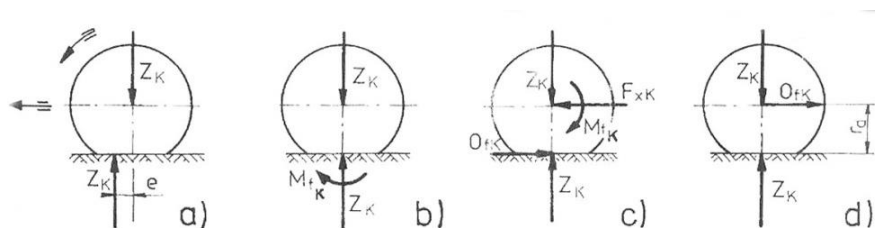
8.2. Odpor valení

Odpor valení O_f vzniká deformací kola a dráhy, po které se kolo odvaluje. Nejlépe je demonstrovatelný na pneumatice. V případě železničních vozidel má hodnotu nízkou.

Pneumatika se stýká s vozovkou v ploše (nikoli bodově). Za předpokladu tuhé vozovky se pneumatika deformuje. Energie potřebná k této deformaci a zpětné formaci je přeměněna na teplo a předána okolí. Plocha styku pneumatiky s vozovkou se nazývá stopa a při jízdě má nesymetrický tvar připomínající elipsu.

Pozn.: Záleží na konstrukci pneumatiky, diagonální a radiální pneu mají různé tvary stopy.

V důsledku této deformace nepůsobí svislá reakce kola Z_K v ose kola, ale je posunuta ve směru jízdy o rameno e tak, jak je patrné na obr. 8-1a), b), c) a d).



Obr. 8-1: Odpor valení O_f [6]

Tím vzniká moment $M_{fK} = Z_K \cdot e$, který působí proti otáčení kola (obr. 8-1b).

Pokud posuneme svislou reakci Z_K pod osu kola, získáme zpět momentovou rovnováhu zavedením vodorovné síly O_{fK} (obr. 8-1c), která působí na rameni r_d (dynamický poloměr kola). Posunem vodorovné síly do středu kola jsou eliminovány momenty a sílu O_{fK} [N] můžeme považovat za odpor valení (obr. 8-1d). Potom platí následující vztahy:

$$\text{Součinitel valivého odporu } f_K = \frac{e}{r_d} \quad (8.1)$$

$$\text{Odpor valení kola je } O_{fK} = Z_K \cdot \frac{e}{r_d} = Z_K \cdot f_K, \text{ kde} \quad (8.2)$$

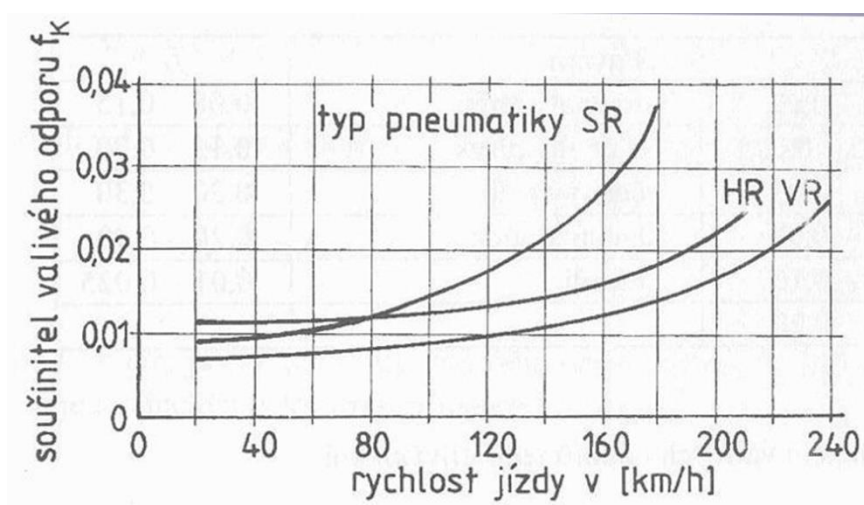
$$\text{Celkový odpor valení je } O_f = f \cdot \sum Z_{Ki} = f \cdot G \cdot \cos \alpha, \text{ kde} \quad (8.3)$$

G tíha vozidla [N]
 α úhel podélného sklonu vozovky

Součinitel valivého odporu f_K je závislý na více faktorech, resp. vlastnostech pneumatiky. Mění se s rychlostí vozidla, typem pneumatiky, huštěním pneumatiky, teplotou prostředí, poměrem odvalování – smýkání apod.

Povrch	f_K	Povrch	f_K
asfalt	0,01 – 0,02	travnatý terén	0,08 – 0,15
beton	0,015 – 0,025	hluboký písek	0,15 – 0,30
dlažba	0,02 – 0,03	čerstvý sníh	0,20 – 0,30
makadam	0,03 – 0,04	bahnitá půda	0,20 – 0,40
polní cesta – suchá	0,04 – 0,15	náledí	0,01 – 0,025
polní cesta – mokrá	0,08 – 0,20		

Tab. 8-1: Vybrané součinitele f_K v závislosti na povrchu vozovky



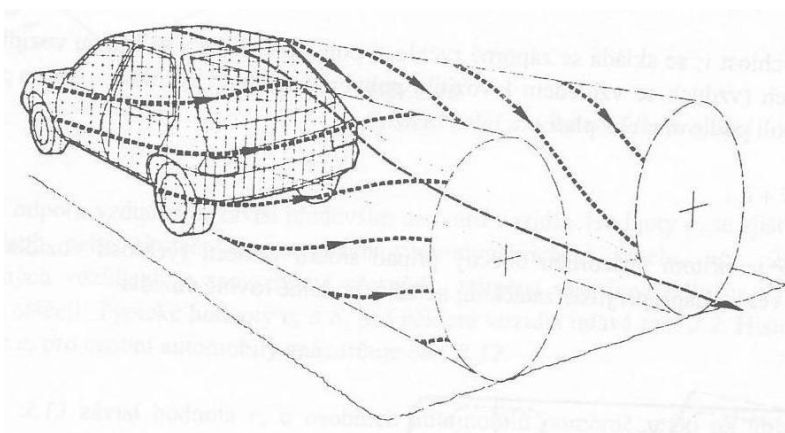
Graf 8-1: Závislost f_K na druhu pneumatiky a rychlosti vozidla

Pozn.: Vývoj pneumatik zaznamenává stálé změny jejich vlastností. Tak jsou vyvinuty pneumatiky, kde f_K není konstantní veličina, ale veličina, která se funkčně mění v různých závislostech. Ze závodních automobilů jsou známy změny f_K v závislosti na teplotě pneu.

8.3. Odpor vzduchu

Celkový odpor vzduchu O_v je součtem několika odporů, které vozidlo při jízdě v atmosféře překonává. Hlavní složkou je čelní odpor vozidla, dílčími složkami odpor vzduchu rotujících kol, odpor vzduchu vznikající průtokem chladicími a větracími systémy a jiné drobné nespecifikované odpory.

Pohybuje-li se vozidlo v atmosféře, je obtékáno vzduchem a jeho obtok je možno deltalizovat (rozdělit) do proudnic (lamel), jejichž pohyb kolem karosérie je možno zobrazit.



Obr. 8-2: Automobil s obtokem laminárním i turbulentním [6]

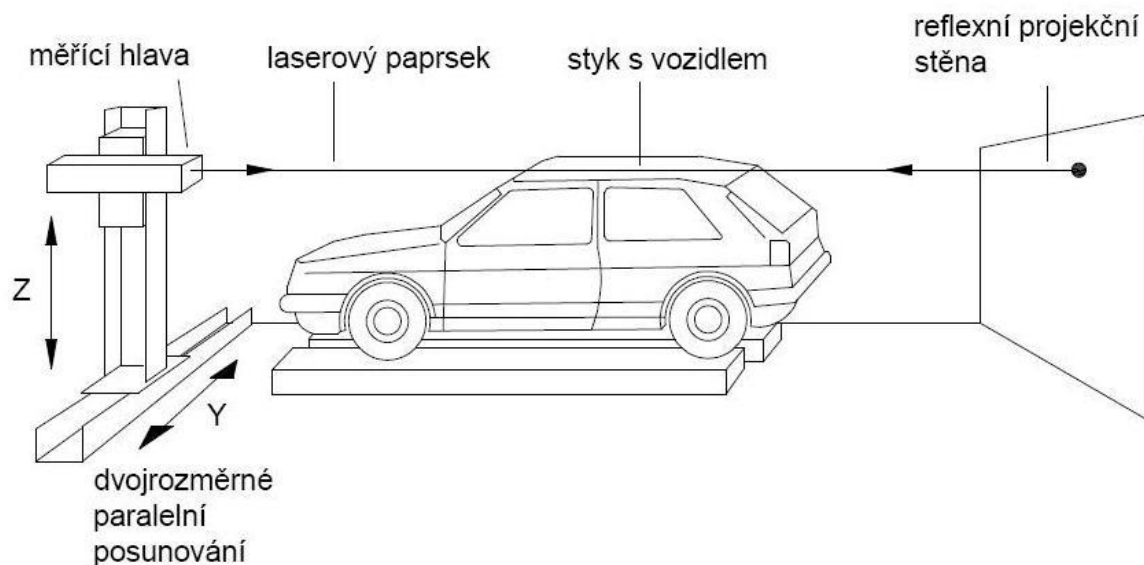
K vychýlení lamel z původního směru je vynaložena energie představující odpor vzduchu. Platí následující vztah:

$$O_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_x \cdot S_x \cdot v_r^2, \text{ kde} \quad (8.4)$$

O_v odpor vzduchu [N]

ρ hustota vzduchu (měrná hmotnost). Používá se hodnota $1,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, avšak pro různé tlaky a teploty je nutno ji korigovat

S_x čelní plocha vozidla [m^2]. Získat ji lze více způsoby, řezem nebo projekcí a planimetrií



Obr. 8-3: Příklad způsobu získání hodnoty čelní plochy vozidla [7]

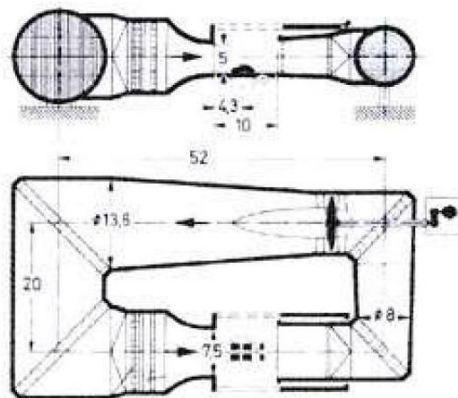
- v rychlost proudícího vzduchu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]. Jde o vektor rychlosti vozidla a rychlosti větru. Pokud projíždí vozidlo v bezvětrí, je rychlost vzduchu totožná s rychlostí vozidla. Pokud vane vítr, je třeba zjistit jeho směr i rychlost a tyto pak do výpočtu zahrnout.
- c_x součinitel odporu vzduchu [-]. Poměrné číslo, jež sdružuje jak tvarový, tak povrchový vliv tělesa na obtok vzduchu. Těleso umístěné v proudu vzduchu bude proudnicemi (lamelami) obtékáno. Kvalita obtoku bude záviset nejen na tvaru tělesa, ale také např. na drsnosti jeho povrchu a objemu. Pokud je tvar tělesa blízký tzv. ideálním křivkám obtoku (lemniskata, kardioida) a je dokonale hladký, součinitel c_x bude nízký.

V následující tab. 8-2 jsou uvedeny některé hodnoty c_x jednak u běžných vozidel a také u některých speciálních.

Typ vozidla	c_x	S_x	Poznámka
běžné osobní automobily	0,3-0,4	1,6-2,0	cca od roku 1940
závodní vozy formule 1	0,7-1,1	0,7-1,3	lze seřizovat
nákladní automobil	0,8-1,1	4-7	
nákladní automobil s návěsem	1,0-1,2	9	
autobus	0,5-0,7	5-7	
Lotus Seven	0,7	-	1957-1972
Hummer H2	0,57	-	2003
Fiat Pininfarina	0,17	-	na bázi F 124 1978
VW XL-1	0,186	-	2011 (série 2013)
Nuna	0,07	-	solární vozidlo pro soutěž 2001-7

Tab. 8-2: Hodnoty c_x a S_x pro vybraná vozidla, [1]

Reálná hodnota c_x je zjišťována experimentálně. Nejčastěji ji lze zjistit umístěním vozidla ve větrném (aerodynamickém) tunelu podle obr. 8-4.



Obr. 8-4: Větrný (aerodynamický) tunel [7]

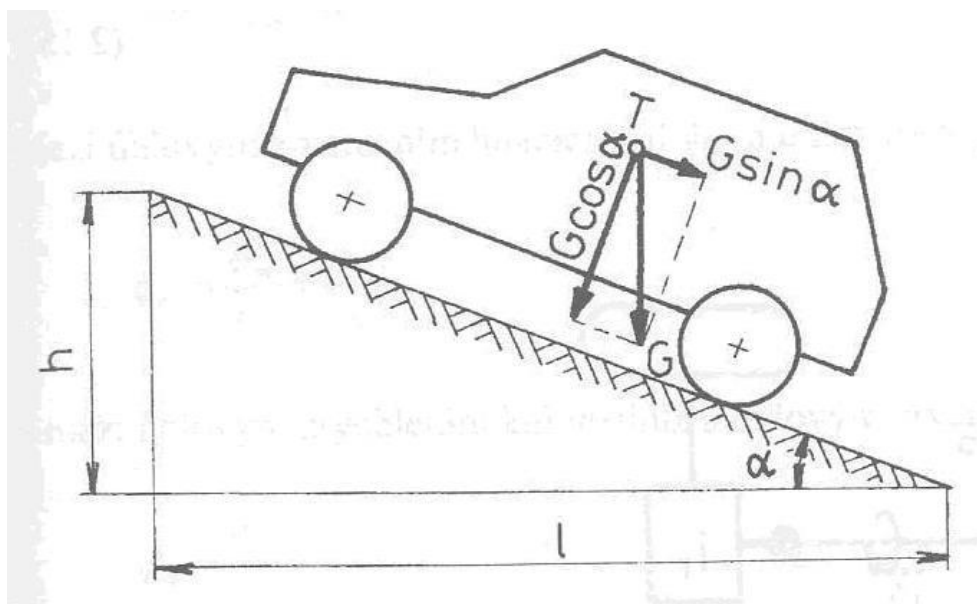
Pozn.: Na snižování odporu vzduchu pracují konstruktéři dopravních prostředků zhruba od dob motorizace dopravy. Vzhledem k tomu, že jeho závislost na rychlosti je kvadratická, nabývá jeho řešení důležitosti se vzrůstající rychlostí dopravy. Obvyklou cestou snižování aerodynamického odporu je tvarování karosérie. Designéři jsou v tomto směru omezeni řadou vlivů. Zohlednit musí např. následující:

- síly vzlaku, v jejichž důsledku může docházet ke „vznášení“ vozidla a snížení adheze,
- aerodynamické hluky a vibrace,
- ejektivní účinky proudění.

8.4. Odpor stoupání

Odpor stoupání O_s působí při jízdě v podélném sklonu vozovky. Při jízdě v rovině je nulový, při jízdě v klesání je záporný.

Podle obr. 8-5 je tíha vozidla G vektorově rozložena na složku kolmou k vozovce a složku totožnou se směrem jízdy, působící jako odpor jízdy.



Obr. 8-5: Síly při odporu stoupání [7]

Platí vztah:

$$O_s = \pm G \cdot \sin \alpha, \text{ kde} \quad (8.5)$$

O_s	odpor stoupání [N]
G	tíha vozidla [N]
α	úhel stoupání

Pokud se vozidlo pohybuje v klesání, nabízí se využití mařené energie k rekuperaci.

Pozn.: O_s je energetický faktor, na jehož snižování se jen málo může podílet dopravní prostředek. Náleží do kompetence oboru dopravní infrastruktury. Část, ve které lze konstrukcí vozidla odpor stoupání ovlivnit, je volba převodů tak, aby motor pracoval v režimu nejvyšší účinnosti η .

8.5. Odpor zrychlení (setrvačnost)

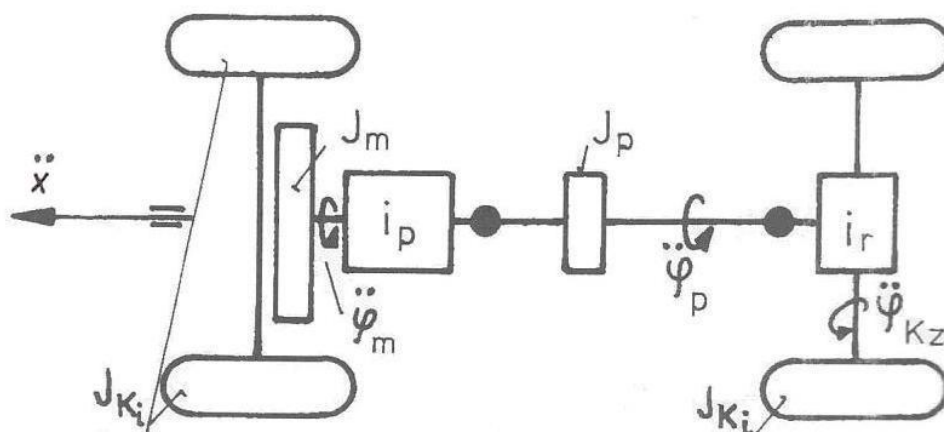
Odpor zrychlení O_z , působí při všech změnách pohybu vozidla nebo jeho částí. V rovnoměrném pohybu, nebo v klidu je nulový. Vozidlo má tendenci setrvávat v rovnoměrném pohybu nebo v klidu. Síla, která je potřebná k jeho vychýlení, je odpor zrychlení resp. odpor setrvačnosti.

Platí následující vztah:

$$O_z = \left(m + \sum_i \frac{J_{Ki}}{r_{di} \cdot r_{Ki}} \right) \cdot \ddot{x} = O_{zp} + O_{zr}, \text{ kde} \quad (8.6)$$

O_z	odpor zrychlení [N]
O_{zp}	odpor zrychlení vozidla [N]
O_{zr}	odpor zrychlení rotujících částí vozidla [N]
m	hmotnost vozidla [kg]
J_k	moment setrvačnosti rotujících částí [kg.m ²]
r_d	dynamický poloměr kol [m]
r_k	poloměr rotujících částí [m]

Uvedený vztah je zjednodušen a pro výpočty O_z plně postačí. Podrobné výpočty zohledňují rozdílné vlastnosti urychlovaných konstrukčních prvků.



Obr. 8-6: Momenty setrvačnosti zrychlovacího vozidla [7]

Jak vyplývá z obr. 8-6, je nutno při zrychlení rozeznávat dva typy. Jednak je urychlováno celé vozidlo ve směru jízdy ($\ddot{x}$) a jednak jsou urychlovány jeho rotující části ($\ddot{\varphi}$).

Pro tyto dva typy platí následující vztahy:

$$O_{Zp} = m \cdot \ddot{x} \quad (8.7)$$

$$O_{Zr} = \sum \frac{J_{Ki}}{r_{di} \cdot r_{Ki}} \cdot \ddot{\varphi} \quad (8.8)$$

Každá z rotujících částí (motor, rychlostní skříň, kola, hřídele,...) má vlastní moment setrvačnosti a také vlastní poloměr. Protože úhlové zrychlení rotujících částí $\ddot{\varphi}$ je dále ovlivněno převodovými poměry, je podrobný výpočet poměrně složitý a přesahuje úroveň tohoto textu. Pro výpočty energetické analýzy postačí vztah (8.6), ve kterém výraz $r_{di} \cdot r_{Ki}$ nahradíme r_d^2 .

Odpor zrychlení pak lze vyjádřit:

$$O_Z = \left(m + \frac{\sum J_K}{r_d^2}\right) \cdot \ddot{x} \text{ [N]} \quad (8.9)$$

9. Celkové jízdní odpory

Jak bylo již uvedeno, téměř všechna kinetická energie přeměněná v motoru z energií jiného druhu na kinetickou je využita pro překonání jízdních odporů.

Pozn. 1: Energie využitá pro provoz vozidlové infrastruktury a příslušenství zde není uvažována.

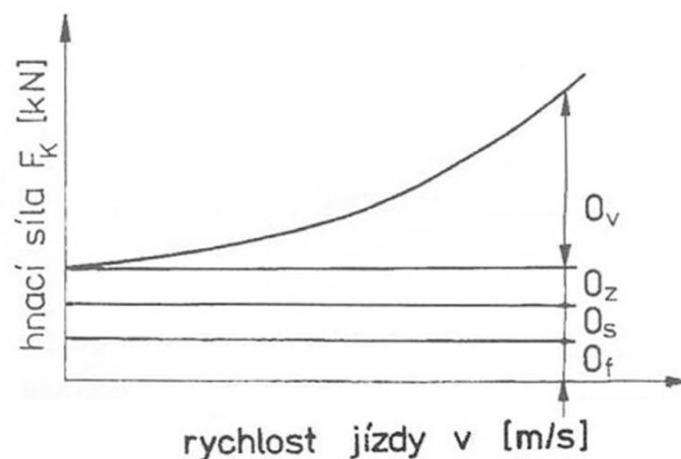
Pozn. 2: Následující výpočty platí jen pro vozidla poháněná odvalováním kol. Pro ostatní pozemní dopravní prostředky (pásová vozidla, smykový pohyb, bezkontaktní prostředky, kráčející vozidla apod.) jsou postupy energetické analýzy jiné.

Pozn. 3: Celkovou účinnost, resp. vnitřní tření, zde neuvádíme úmyslně, jde nám o sílu na rozhraní pneu-vozovka.

Točivý moment motoru M_t je přiveden na hnací kola vozidla a ve styku pneumatiky s vozovkou se projeví jako hnací síla. Můžeme tedy uvést:

$$F_k = O_f + O_v + O_s + O_z \quad (9.1)$$

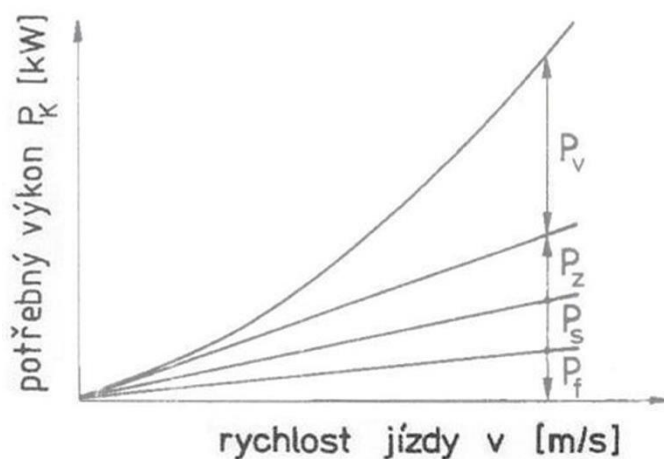
Závislost hnací síly F_k na rychlosti jízdy je graficky znázorněna na *grafu 9-1*.



Graf 9-1: Hnací síla potřebná na překonání jízdních odporů [6]

Z grafu plyne nelineární závislost odporu vzduchu a lineární, dokonce konstantní závislost ostatních odporů. Úvaha je jen teoretická, v reálu ani tyto závislosti nejsou zcela lineární ani konstantní, avšak pro výklad energetické analýzy postačí.

Průběh výkonu P_k potřebného k překonání jízdních odporů je v závislosti na rychlosti uveden na grafu 9-2.



Graf 9-2: Výkon potřebný na překonání jízdních odporů [6]

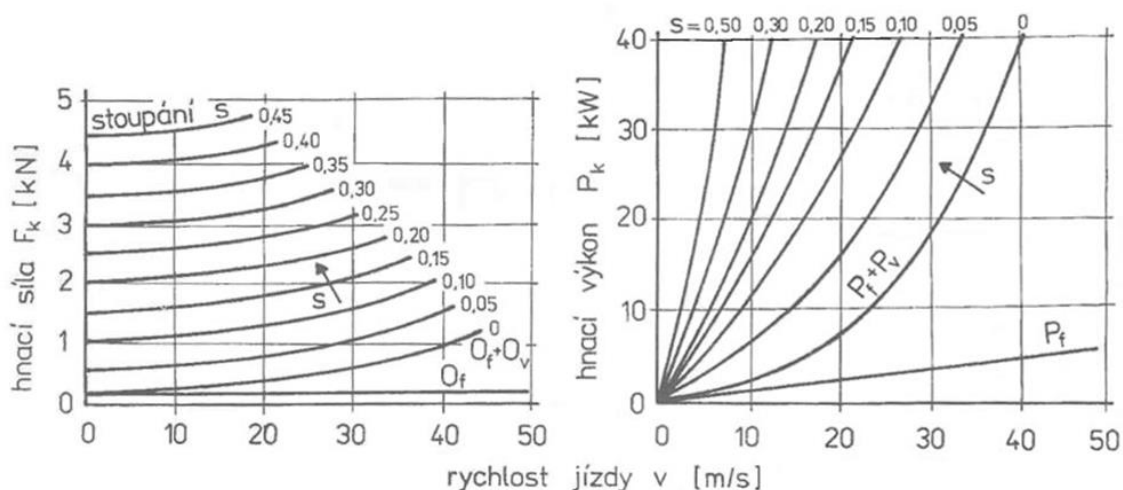
Z grafu je zjevná rostoucí potřeba výkonu, což plyne ze vztahu:

$$P_k = F_k \cdot v \quad (9.2)$$

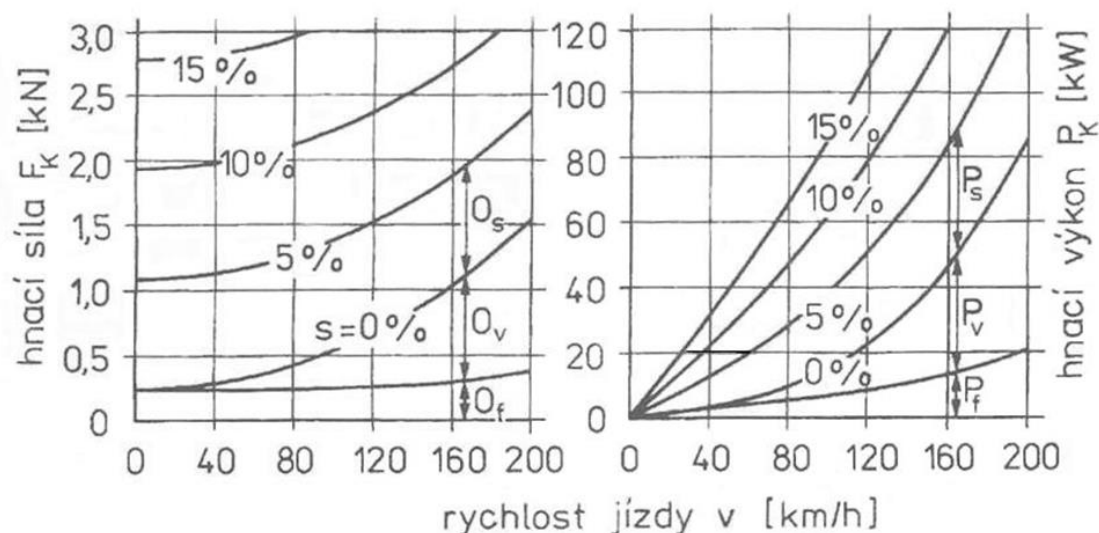
Pro výpočet energie je nutno dále výkon P_k násobit časem, po který působí. Následující grafické ukázky znázorňují parametry F_k a P_k v závislostech na rychlosti jízdy vozidla. Platí pro osobní automobil a následné podmínky: [6]

- hmotnost automobilu $m = 1\,000$ kg,
- součinitel odporu valení $f = 0,01$,
- součin $c_x \cdot S_x = 0,8\text{ m}^2$.

Stoupání je uvedeno jako poměr $S = \frac{h}{l}$ [%], automobil nezrychluje $O_z = 0$.



Graf 9-3: Hnací síla a výkon potřebný k překonání některých jízdních odporů (rychlost v $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) [6]



Graf 9-4: Hnací síla a výkon potřebný k překonání některých jízdních odporů (rychlost v $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$) [6]

Ze všech grafů plyne reálný průběh parametrů a jejich nelinearita.

10. Příklad výpočtu energetické náročnosti

Automobil se spalovacím motorem v rovnoměrné rychlosti

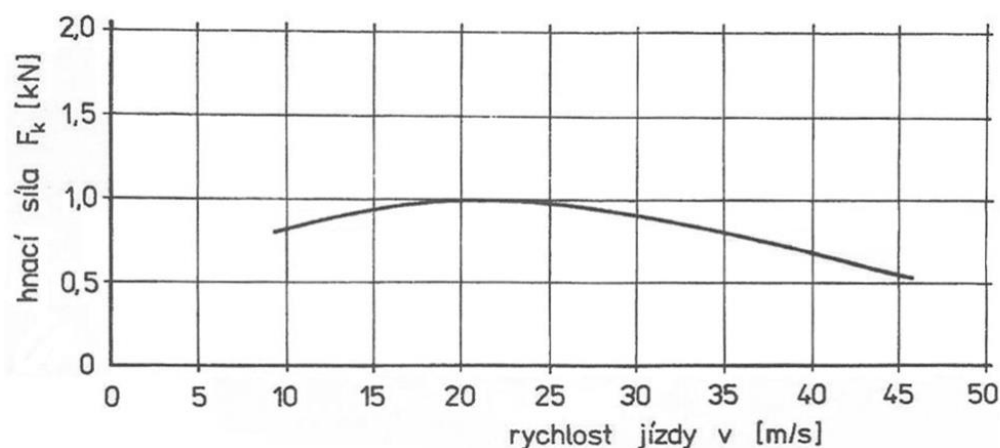
Abychom mohli provést analýzu energetické náročnosti konkrétního vozidla, musíme znát některé jeho parametry. Zejména je důležitá charakteristika motoru s uvedením točivého momentu M_t , ze kterého lze určit průběh hnací síly na kole.

Zadání a podmínky výpočtu:

Určete maximální rychlost v rovině za bezvětrí a určete energii potřebnou pro hodinu jízdy automobilu, který má následující parametry:

$G = 10 \text{ kN} = 10\,000 \text{ N}$ tíha vozidla odpovídající hmotnosti cca 1 000 kg
 $c_x = 0,5$ součinitel odporu vzduchu
 $\rho = 1,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ hustota vzduchu
 $S_x = 1,6 \text{ m}^2$ čelní plocha vozidla
 $f = 0,03$ součinitel odporu valení

F_k je vypočteno z M_t motoru a má na přímý záběr průběh podle následujícího diagramu.



Graf. 10-1: Charakteristika hnací síly [6]

Vzhledem k tomu, že vozidlo nezrychluje, nestoupá a vzhledem k tomu, že hnací síla je udána v bodě styku pneu s vozovkou, není nutné brát v úvahu O_z , O_s ani η . Rozhodující budou tedy O_f a O_v .

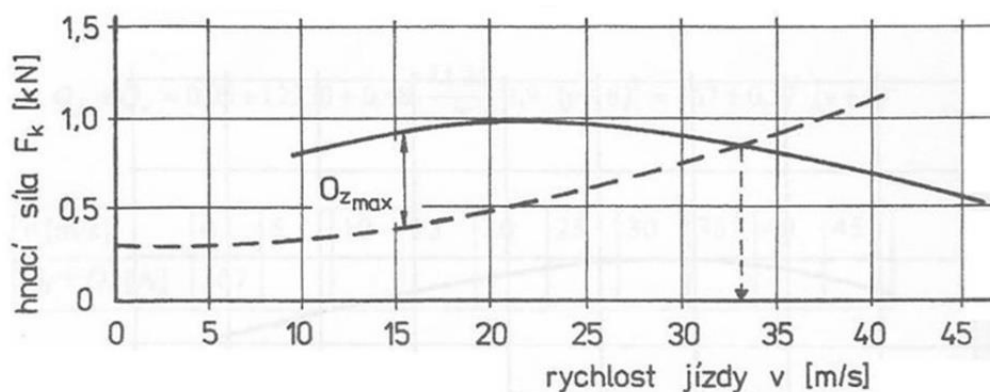
$$O_f + O_v = G \cdot f + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c_x \cdot S_x \cdot v^2 = 10000 \cdot 0,03 + \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 0,5 \cdot 1,6 \cdot v^2$$

Pro zjištění průběhu funkce jízdních odporů je vhodné výpočet uvést do tabulky pro různé rychlosti.

v	0	10	20	30	40
$O_v + O_f$	0,3	0,35	0,5	0,75	1,1

Tab. 10-1: Závislost jízdních odporů na rychlosti

Vypočtené hodnoty $O_v + O_f$ v jedné funkci regresí zaneseme do grafu 10-2, kde již je funkce hnací síly F_k .



Graf 10-2: Charakteristika hnací síly a křivka odporů

Maximální dosažitelná rychlost je určena průsečíkem hnací síly a jízdních odporů. Z grafu lze odečíst a dále dopočítat následující výsledky:

$$v_{\max} = 33 \text{ m.s}^{-1} \approx 119 \text{ km.h}^{-1}$$

Výkon P_k pro tuto rychlost je

$$O_f + O_{V(v_{\max})} \cdot v_{\max} = 28,2 \text{ kW}$$

Energie potřebná pro hodinu provozu je $28,2 \text{ kWh} = 10,15 \cdot 10^7 \text{ J}$.

V případě zážehového spalovacího motoru s celkovou tepelnou účinností $\eta = 0,33$ (33 %) to představuje cca 9,5 l benzínu za hodinu, což odpovídá cca 8 l/100 km.

11. Systémy přeměny energie na kinetickou v dopravních prostředcích

V silniční dopravě jsou zásadními motorovými dopravními prostředky automobil a motocykl. Pohybují se na vozovkách nebo v terénu odvalováním kol. Přestože existují i jiné způsoby pohybu, např. bezkontaktní pohyb smykem nebo kráčení, nejsou tyto masivně využívány a jsou spíš předmětem speciálních konstrukcí nebo předmětem výzkumu.

Následující přehled uvádí systémy, které mění rozličné druhy energií na energii kinetickou, nezbytnou pro pohyb. Takové systémy jsou označeny jako motory. Protože často nemohou existovat samostatně a musí být vybaveny ještě dalšími konstrukčními prvky (spojky, převody, ...), můžeme tyto soubory také považovat za pohonné jednotky.

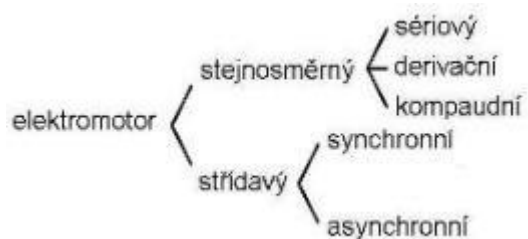
Jako pohonné jednotky v současné silniční motorové dopravě převládají spalovací motory. Odhaduje se, že jich využívá víc jak 95 % všech prostředků.

Uvedme nejprve přehled a rozdělení jednotlivých systémů.

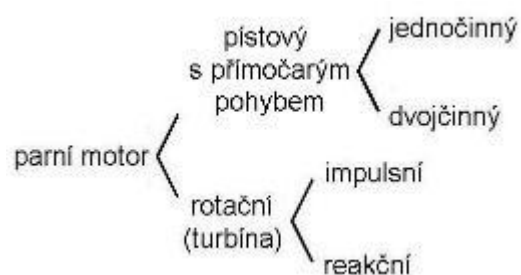
spalovací motor



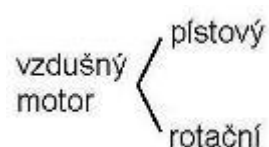
elektromotor



parní motor



vzdušný (kompresní) motor



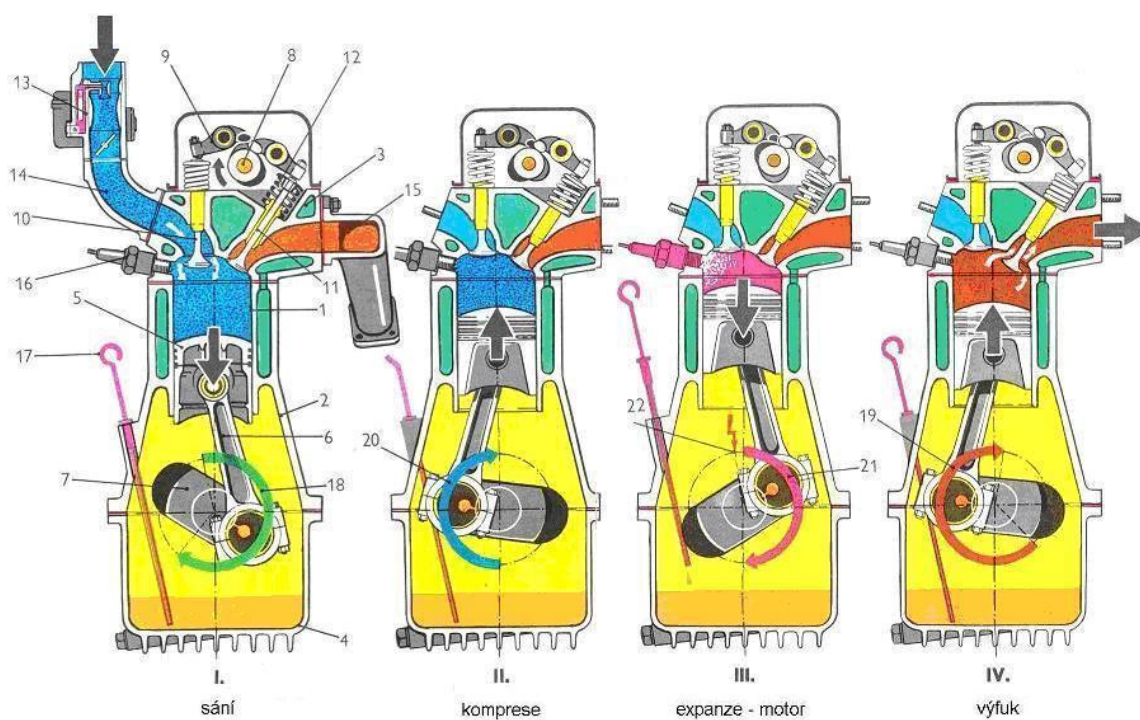
11.1. Spalovací motor

11.1.1. Motor s vnitřním spalováním a přímočarým pohybem pístu

Protože se jedná o nejužívanější systém přeměny energie, bude na tomto systému proveden výklad podrobněji.

Nejužívanějším systémem přeměny energie na kinetickou v dopravě je spalovací motor s vnitřním přerušovaným spalováním, přímočarým pohybem pístu a čtyřdobým pracovním cyklem. Rozeznávají jsou zážehové a vznětové, liší se způsobem vznícení paliva a z toho vyplývajících rozdílů.

Způsob práce zážehového motoru je patrný z *obr. 11-1*.



Obr. 11-1: Čtyřdobý spalovací motor zážehový, atmosférický [8]

Legenda:

- | | | |
|--------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| 1 – pracovní válec | 8 – vačka ventilů (systém OHC) | 15 – výfukové potrubí |
| 2 – skříň motoru | 9 – vahadla | 16 – zapalovací svíčka |
| 3 – hlava motoru | 10 – ventil sací | 17 – měrka oleje |
| 4 – vana motoru | 11 – ventil výfukový | 18 – 21 směr rotace klik. hřídele |
| 5 – pracovní píst | 12 – pružina ventilu | 22 – předstih zážehu |
| 6 – ojnice | 13 – karburátor | |
| 7 – klikový hřídel | 14 – sací potrubí | |

Pozn.: Jde o principiální, jednoduchý motor bez elektron. řízení a regulace.

Sání: Při pohybu pístu směrem k dolní úvratí je do pracovního válce nasávána směs paliva se vzduchem.

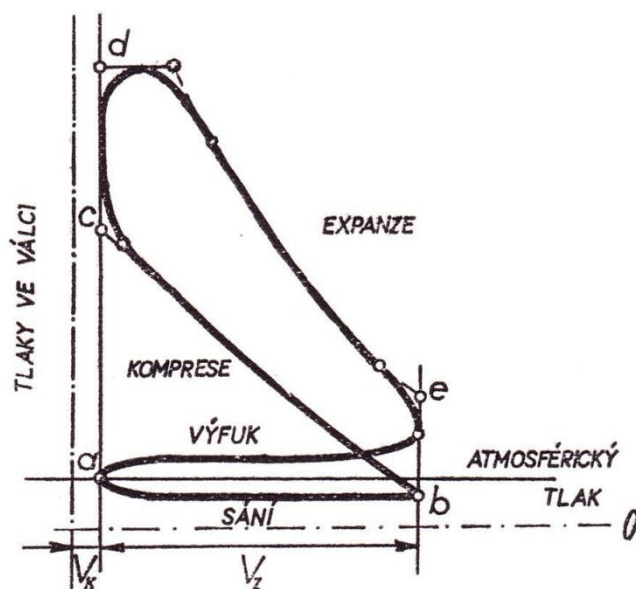
Komprese: Po uzavření sacího ventilu je směs stlačena pístem při jeho pohybu k horní úvratí.

Expanze: Po zážehnutí směs expanduje a stlačuje píst do dolní úvratí. Tento zdvih je pracovní.

Výfuk: spálená směs, jejíž vnitřní (chemická) energie byla prudkým okysličením (hořením) přeměněna na kinetickou, je jako nepotřebná vytlačena mimo pracovní válec.

Přímočarý pohyb pístu je pomocí klikového hřídele přeměněn na rotační a tento dále převeden na kola dopravního prostředku. Termodynamická změna, ke které při procesu dochází, je považována za adiabatickou.

Graficky lze termodynamickou změnu, ke které v motoru dochází, charakterizovat pomocí diagramu p - V . Diagram znázorňuje závislost tlaku p v pracovním válci na objemu V nad pístem.



Graf 11-1: p - V diagram pro čtyřdobý zážehový spalovací motor [8]

p - V diagram je rovněž označován jako diagram indikátorový, protože poskytuje tzv. indikované parametry.

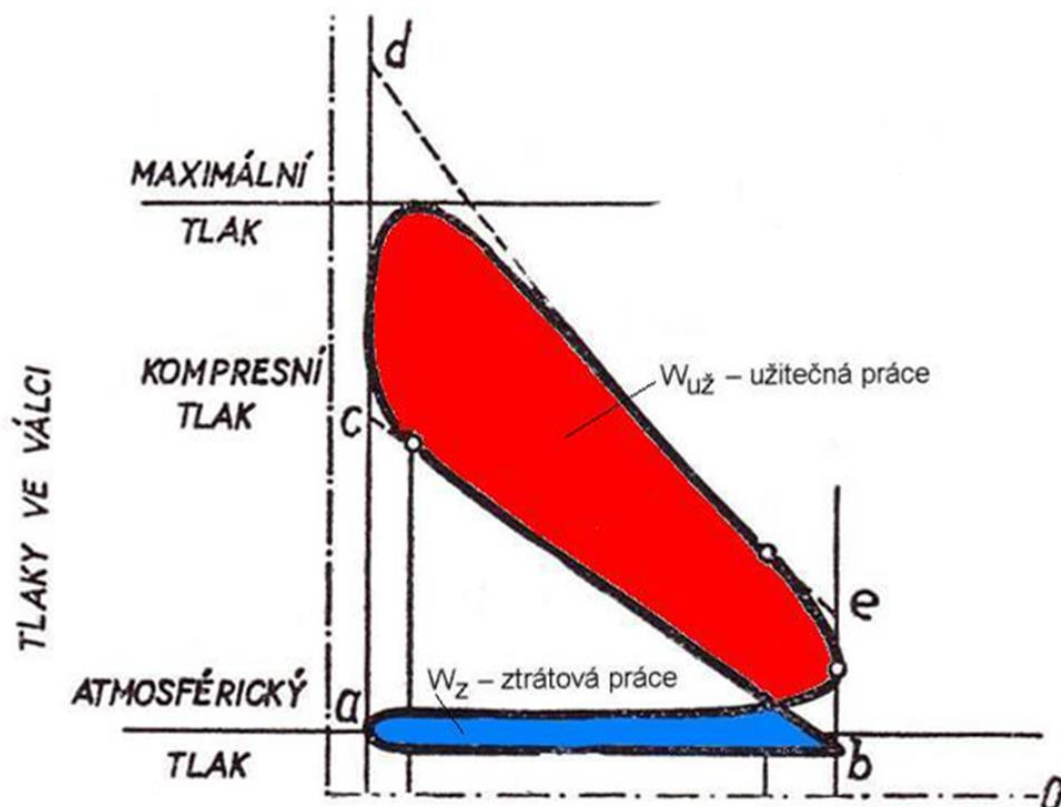
Pozn.: Název pochází z doby, kdy pohyb pístu, resp. otáčky klikového hřídele byly mechanicky přenášeny na zapisovací zařízení (směr x) a na totéž zařízení byl mechanicky převeden i tlak ve válci (směr y), oba sledované parametry se tak zobrazily (indikovaly).

Termodynamická změna, ke které v motoru dochází, nemá charakter žádné z konstantních změn (izobara, izotropa, izoterma), ale je určitou kombinací všech. Nejblíže je změně adiabatické, pro kterou platí vztah

$$p \cdot V^{\kappa} = \text{konst.}, \text{ kde} \quad (11.1)$$

κ Poissonova konstanta $\approx 1,4$ pro benzínový motor. Exponent κ je jedním z určujících faktorů účinnosti přeměny energie.

Indikované parametry jsou patrné z grafu 11-2.



Graf 11-2: Spalovací motor – indikované parametry [8]

Platí zde následující vztahy:

Indikovaná práce

$$W_i = W_{už} - W_z, \text{ kde} \quad (11.2)$$

W_i práce indikovaná [J]

$W_{už}$ práce užitečná [J]

W_z práce ztrátová [J] (u přeplňovaných motorů menší)

Dále platí vztahy:

$$W_i = \int p \cdot dV_\alpha, \text{ kde} \quad (11.3)$$

p tlak [Pa]

dV_α změna objemu pracovního válce nad pístem v závislosti na úhlu natočení klikového hřídele α

Indikovaný tlak

$$P_i = \frac{W_i}{V_z} [\text{Pa}], \text{ kde} \quad (11.4)$$

V_z zdvihový objem [m^3]

Spalovací motor je nadále charakterizován následujícími (efektivními) parametry.

Točivý moment

M_t moment síly na výstupním hřídeli motoru [N.m]. Je přímo úměrný tlaku v pracovním válci, avšak vzhledem k setrvačnosti hmot mezi spalovacím prostorem a výstupem na konci klikového hřídele, má M_t rovnoměrnější průběh.

Otáčky motoru

n otáčky klikového hřídele [s^{-1}]

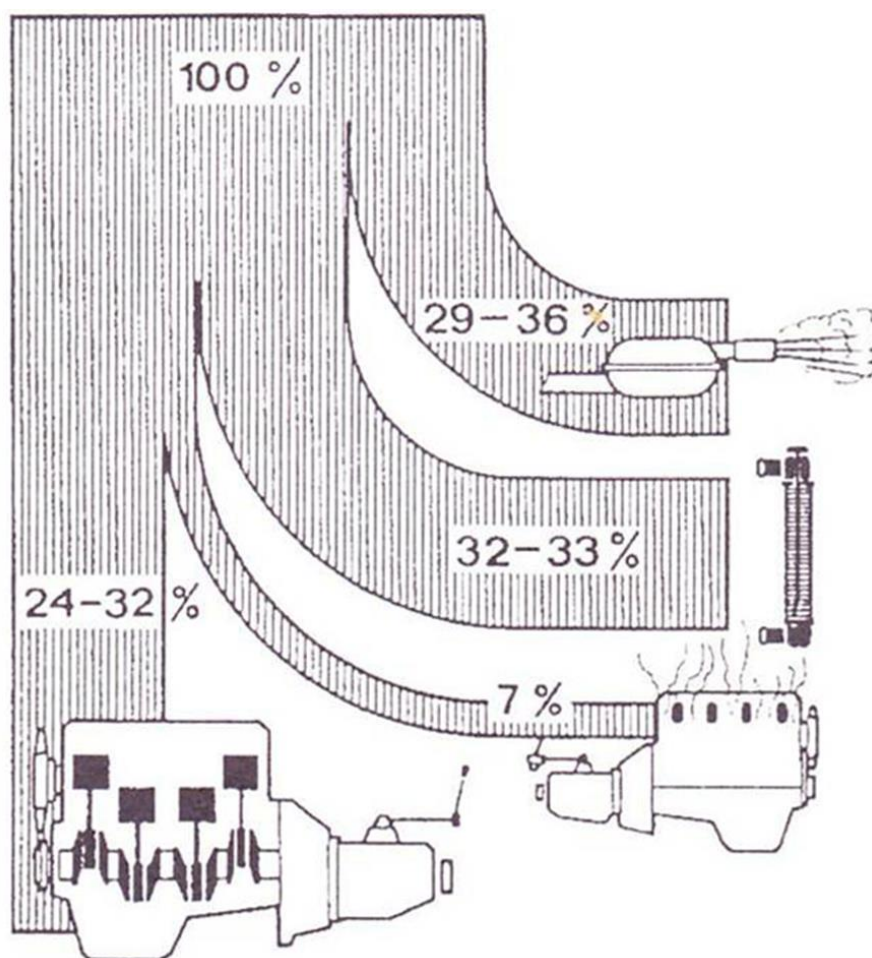
Efektivní výkon

$$P_e = M_t \cdot n \cdot [W] \quad (11.5)$$

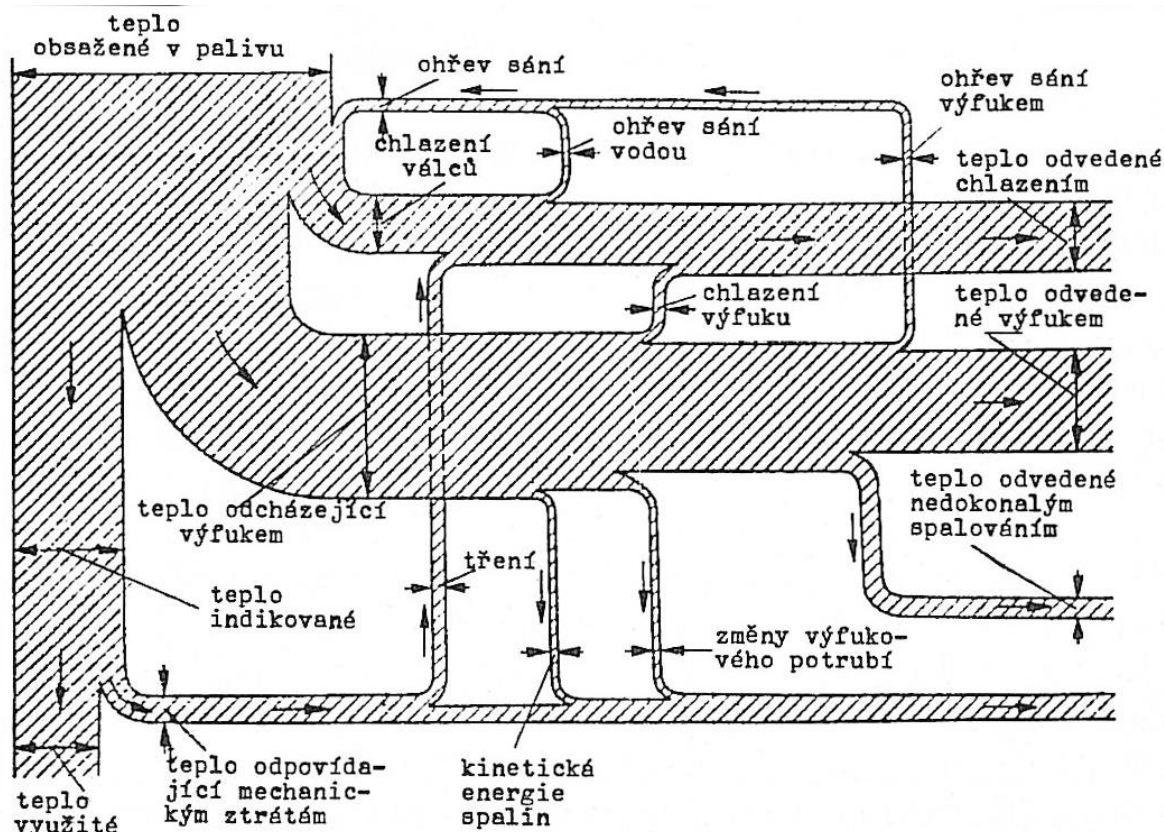
Tepelná bilance a účinnost spalovacího motoru

Tepelná bilance každého systému přeměny energie na kinetickou je vyjádření poměru energie využité ku energii přivedené do systému.

Graficky lze znázornit např. pomocí Sankeyova diagramu. Pro zážehový spalovací motor má podobu podle obr. 11-2 a obr. 11-3.



Obr. 11-2.: Spalovací motor – tepelná bilance



Obr. 11-3.: Sankeyův diagram pro zážehový spalovací motor [9]

Nutno připomenout, že zobrazené hodnoty platí pro motory „primitivní“ konstrukce bez elektronického řízení a regulace, bez využití sekundárních energií a bez rekuperace. Inteligentní motory současné mohou mít interval využití energie širší, uvádí se až 40 %. Metody zvyšování účinnosti jsou uvedeny dále v textu.

Účinnost spalovacího procesu a účinnost přeměny energie na kinetickou je vyjádřena jako poměr energie využití ku energii přivedené do systému (stejně jako u tepelné bilance). Jsou definovány následující účinnosti:

- η_i indikovaná účinnost (vypočtená)
- η_m mechanická účinnost (zjištěná bývá 0,75 – 0,95)
- η_e efektivní účinnost (zjištěná), též celková

Platí následující vztahy:

$$\eta_e = \frac{P_e}{M_p \cdot H_U} \text{ [W], kde} \quad (11.6)$$

- P_e efektivní výkon [W]
- M_p hmotnost spotřebovaného paliva [kg]
- H_U dolní výhřevnost paliva [J.kg⁻¹]

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m = \frac{3600}{m_{pe} \cdot H_U}, \text{ kde} \quad (11.7)$$

- 3 600 tepelný kvocient jedné kWh [kJ]
- m_{pe} měrná spotřeba paliva [kg.kWh⁻¹]

Příklad zjednodušeného výpočtu efektivní účinnosti

U motoru byla změřena měrná spotřeba 260 g.kWh^{-1} . Dolní výhřevnost benzínu je 43 MJ.kg^{-1} . Účinnost je

$$\eta_e = \frac{3600}{260 \cdot 43} = 0,32$$

Účinnost samotné termodynamické změny uvnitř spalovacího motoru lze ještě vyjádřit pomocí jiných vztahů. Teorie vychází z myšlenky porovnávání tvaru funkcí p - V diagramu. Je evidentní, že 100% účinnost by představovala plocha užitečné práce vyjádřená jako součin $p_{\max} \cdot V_{\max}$. Taková plocha však existovat nemůže vzhledem k adiabatické termodynamické změně. Neexistuje ani u tzv. ideálního (Carnotova) tepelného oběhu. Pokusme se tedy vyjádřit účinnost pomocí veličin, které charakterizují tepelný oběh. Takovými veličinami mohou být např. Poissonova konstanta κ a kompresní poměr ε . Bude platit vztah

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \quad \text{pro zážehový motor a} \quad (11.8)$$

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \times \frac{\varphi^{\kappa} - 1}{\kappa(\varphi - 1)} \quad \text{pro vznětový motor, kde}$$

φ je stupeň izobarického zvětšení objemu.

Nabízí se zlepšení účinnosti zvyšováním komprese. Přitom ale dochází také ke zvyšování teploty a při určité hodnotě k samozápalům, signalizovaným detonacemi. Za tuto hranici nelze kompresi zvyšovat.

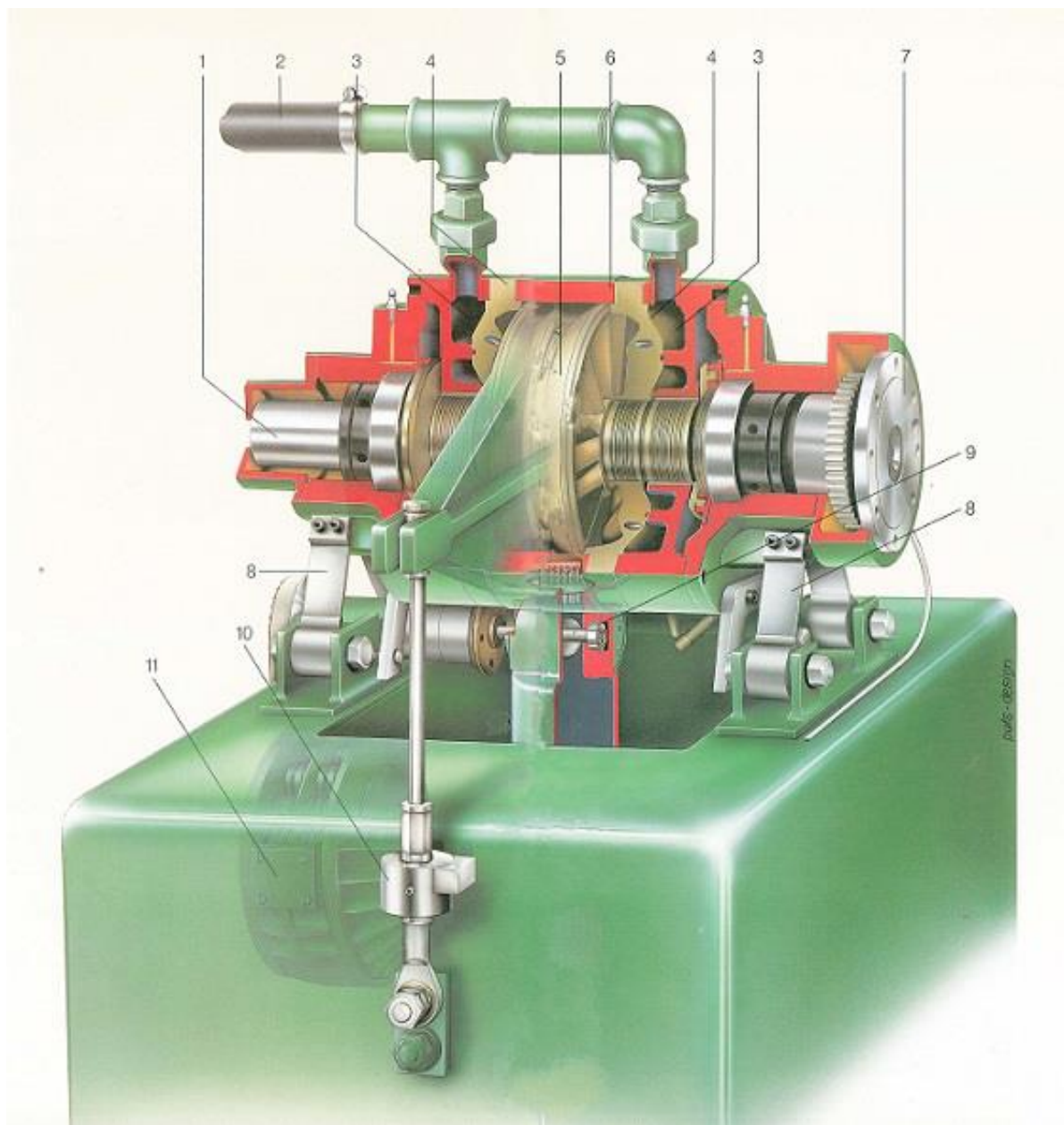
Charakteristika spalovacího motoru

Motor může být charakterizován (popsán) několika parametry. Pro energetickou analýzu jsou důležité následující:

- otáčky klikového hřídele n [s^{-1}], [min^{-1}],
- točivý moment M_t [N.m],
- měrná spotřeba paliva m_e [g.kWh^{-1}],
- výkon P [W], [kW].

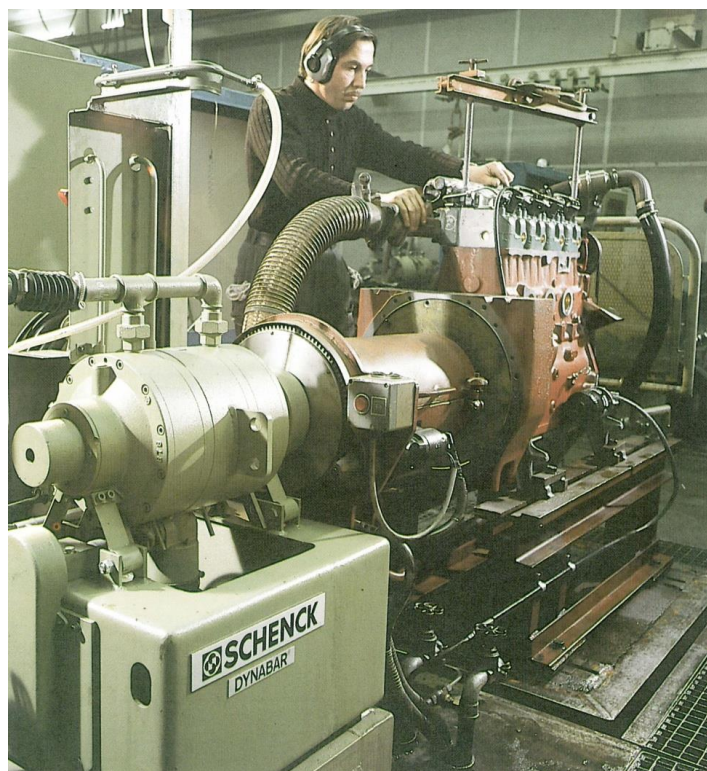
Uvedené parametry lze získat více metodami, za nejspolehlivější je považováno laboratorní zjištění na zařízení, které označujeme jako motorová brzda nebo dynamometr.

Pozn.: Motor je instalován jako samostatná jednotka bez spojky a dalších částí pohonu na stavu, v poloze jakou zaujímá reálně ve vozidle. Klikový hřídel motoru je spojen se zařízením, které klade motoru odpor. Tento odpor (síla) na rameni je měřený M_t – viz obr. 11-4 a 11-5.



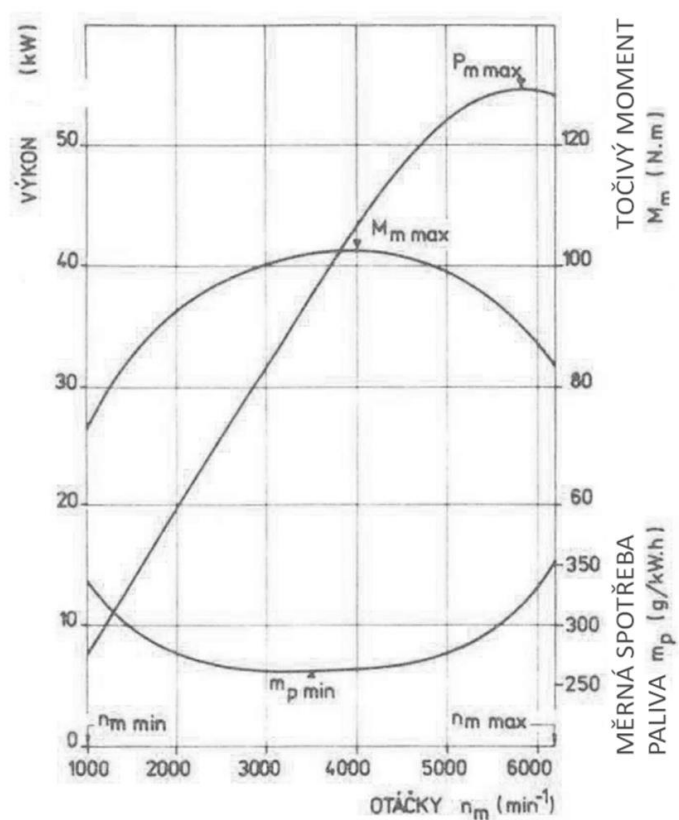
Obr. 11-4.: Dynamometrické zařízení firmy Schenck [10]

Hlavní hřídel (1) s rotorem (5) je spojen deskou (7) s měřeným motorem. Rotují v ložiskách skříně, která je pružně uložena (8). Síla je měřena snímačem (10) na ramenní (6). Toto je unášeno vířením kapaliny přiváděné (2) a protékající komorami (3) a statorem (4). Průtok vody je řízen ventilem (9) spojeným s rotorem(11).



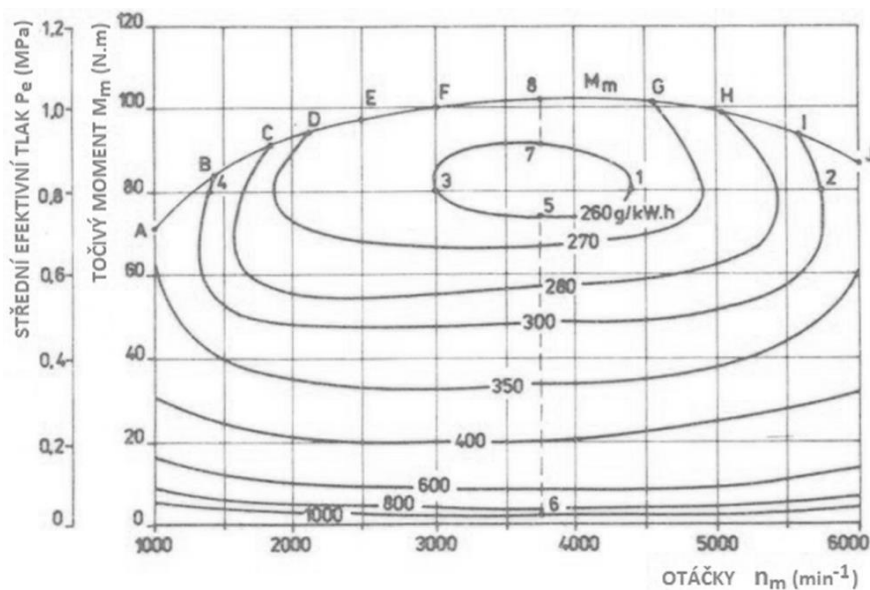
Obr. 11-5.: Dynamometrické zařízení firmy Schenck [10]

Snímány jsou zde otáčky n a k nim příslušná hodnota M_t a m_e . Výkon P_e je dopočítán. Ze sejmutých hodnot je konstruován graf 11-3.

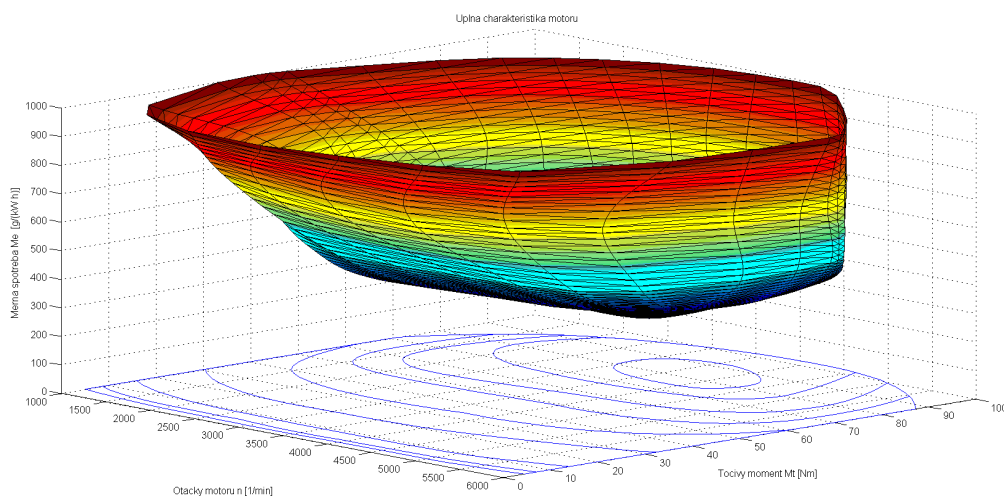


Graf 11-3: Spalovací motor – vnější charakteristika [39]

Pokud jsou parametry pořízeny při plné přípustí paliva („na plný plyn“), jde o vnější, nebo také rychlostní charakteristiku. Žádný motor ale v reálném provozu nepracuje stále na plný plyn, proto je důležité poznat také jeho parametry v jiných pracovních režimech při částečných přípustech paliva. Souboru grafů, které takto vzniknou, potom říkáme úplná charakteristika.



Graf 11-4: Spalovací motor – úplná charakteristika (2D zobrazení) [39]



Graf 11-5: Spalovací motor – úplná charakteristika (3D zobrazení)

Vrstevnice na *grafu 11-4* představují pole měrné spotřeby paliva a byly pořízeny tak, že z grafů charakteristik pro několik přípustí paliva, např. $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, 1 („čtvrt plynu, půl plynu, ...“) byly odečteny průřezy hodnot M_t , n a tyto vyneseny do grafu.

Protože jde o měrnou hodnotu, bude stejná nebo velmi podobná pro všechny motory, bez rozdílu jejich objemu a výkonu.

Pole nejnižší měrné spotřeby (260 g.kWh^{-1}) představuje největší účinnost motoru a interval otáček a točivých momentů, který ohraničuje pole nejnižší spotřeby, je intervalem úsporné jízdy.

Pozn.: Na tomto základě jsou konstruovány hybridní technologie, které kombinují spalovací motor a elektromotor. Spalovací motor pracuje v režimu n a M_t odpovídajícímu nízké spotřebě, tedy v režimu účinnosti až 40 %, pohání generátor elektrického proudu a jím jsou dobíjeny akumulátory. K pohonu vlastního vozidla a k pokrytí energetických špiček pak slouží elektromotor s účinností až 98 %.

11.1.2. Exhalace spalovacího motoru

Metody optimalizace hoření

Účinnost energetické přeměny je silně závislá na dokonalosti hoření směsi paliva a vzduchu. S procesem hoření je také spojen problém emisí.

Spalovací motor emituje (vydává) při své činnosti několik emisí, které jsou nežádoucí. Jednou z nich jsou exhalace. Motor je vydechuje (exhaluje), lidé a živé struktury je vdechují (inhalují) nebo jsou ukládány do přírody a znečišťují životní prostředí. Je specifikováno více než 1000 složek škodlivin emitovaných motorem, avšak legislativně sledováno a omezeno je jen několik. Legislativní omezení (v Evropě známé jako EURO 1–6) se týká těchto plynných nebo aerosolových emisí:

- oxid uhelnatý CO
- oxidy dusíku NO_x
- uhlovodíky HC
- částice (pevné) PM
- opacita (kouřivost).

Pozn.: Oxid uhličitý CO₂ je omezován nepřímo snižováním absolutní spotřeby paliva. Zákonem limitován není (r. 2014).

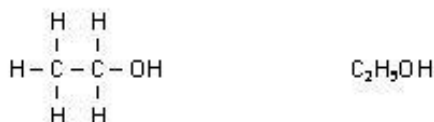
Hoření ve spalovacím motoru je silně závislé na poměru látek, které se procesu účastní. K dispozici jsou palivo a oxidátor, zjednodušeně řečeno benzín a vzduch.

Paliv je ale používáno více druhů a stále se hledají nová – alternativní k dosavadním. Všechna dosud používaná paliva (s výjimkou čistého vodíku) jsou sloučeninami několika prvků, mezi kterými jsou zásadně zastoupeny uhlík a vodík. Označovány jsou



přičemž indexy (x, y, z) ve sloučenině hrají zásadní roli ve výpočtech účinnosti a exhalací. Většina paliv obsahuje i malé množství síry, ale snaha je tuto zcela eliminovat.

Příklad schematického znázornění molekuly a sumárního označení etanolu:



U paliv je sledováno více jejich vlastností, pro energetickou analýzu jsou některé málo důležité a jiné více. Pro následující výpočty je důležitá znalost výhřevnosti Q_v [J.kg⁻¹] a spalného tepla Q_s [J.kg⁻¹].

Mezi oběma veličinami platí následující vztah:

$$Q_v = Q_s - 24,42 (8,94 H - W), \text{ kde} \quad (11.9)$$

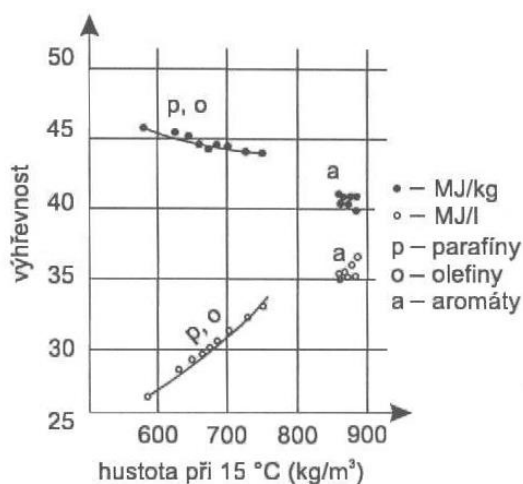
H obsah vodíku v % hmotnosti
 W obsah vody v % hmotnosti

Pro výpočty se používá výhřevnost, která je vždy nižší než spalné teplo. V následující *tab. 11-1* jsou uvedeny některé prvky a sloučeniny a jejich výhřevnost.

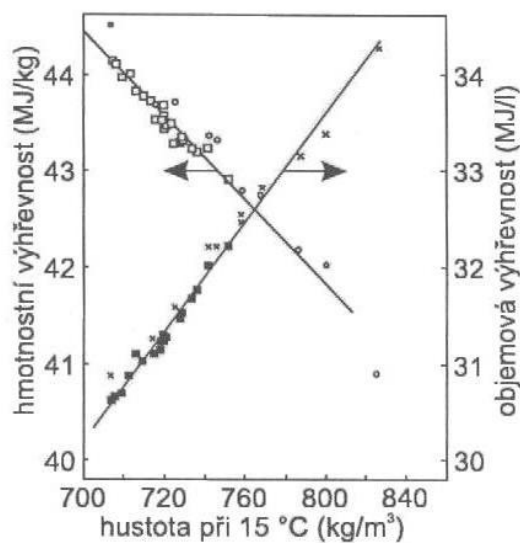
Sloučenina prvek	Značka	Q_v [kJ.kg ⁻¹]
vodík	H ₂	142 350
uhlík	C	34 150
benzín	C _x H _{1,8x}	43 600
nafta	C _x H _y	42 700
etanol	C ₂ H ₅ OH	26 800

Tab. 11-1: Výhřevnost vybraných prvků a sloučenin

Z tabulky je patrná vysoká výhřevnost vodíku. Bude tedy platit, čím více vodíku bude ve sloučenině oproti uhlíku, tím sloučenina bude výhřevnější. Výhřevnost různých sloučenin paliv je rovněž závislá na jejich hustotě. Následující grafy závislost znázorňují.



Graf 11-6: Výhřevnost obecných uhlovodíků v závislosti na hustotě



Graf. 11-7: Výhřevnost benzínu v závislosti na hustotě

Hoření je prudké oksyločení, při kterém reagují některé prvky s jinými. Výsledkem je teplo (energie) a produkty hoření (nejčastěji CO₂ a H₂O). K hoření je nezbytný kyslík (O₂). Teoretická spotřeba kyslíku pro shoření 1 kg paliva je vyjádřena stechiometrickou rovnicí ve tvaru

$$O_t = \frac{8}{3} \mu_C + 8\mu_H + \mu_S - \mu_O \text{ [kg/kg]} \quad (11.10)$$

V této rovnici jsou hodnoty μ_C , μ_H , μ_S a μ_O procentuální podíl hmotnosti každého prvku ve sloučenině. Hodnota μ_O je odečtena, protože jde o kyslík obsažený v palivu a tento je využit.

Spalovací motory v pozemní dopravě využívají k tvorbě směsi vzduch, ve kterém je jen cca 23 % kyslíku. Stechiometrická rovnice teoretické spotřeby vzduchu pro shoření 1 kg paliva bude potom mít tvar

$$L_t = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} \mu_C + 8\mu_H + \mu_S - \mu_O \right) \text{ [kg/kg]}, \text{ kde} \quad (11.11)$$

L_t teoretická spotřeba vzduchu v kg na 1 kg paliva

Pozn.: Obsah kyslíku ve vzduchu se liší podle nadmořské výšky a okamžitého atmosférického tlaku.

Příklad výpočtu teoretické spotřeby vzduchu pro shoření 1 kg automobilového benzínu o složení C_xH_yO_zS, pro který platí následující podíly hmotnosti jednotlivých prvků [kg.kg⁻¹]:

$$\mu_C = 0,8575; \mu_H = 0,1378; \mu_S = 0,0005; \mu_O = 0,0042$$

Po dosazení do předchozí rovnice má tato tvar

$$L_t = \frac{1}{0,23} \left(\frac{8}{3} \cdot 0,8575 + 8 \cdot 0,1378 + 0,0005 - 0,0042 \right) = 14,72 \text{ [kg.kg}^{-1}] \quad (11.12)$$

Pro optimální shoření 1 kg benzínu je potřeba 14,72 kg vzduchu (nebo objemově pro 1 l benzínu 9 017 l vzduchu). Aby v celém průběhu pracovního režimu motoru byl dodržen tento poměr, je věcí karburátoru nebo vstřikovávání a jejich mechanického nebo elektronického řízení.

Příklad složení některých paliv a teoretická spotřeba vzduchu pro optimální hoření

Palivo	Hmotnostní podíl [%]			L_t
	C	H	C/H	[kg.kg ⁻¹]
Metan CH ₄	75,0	25,0	3,00	17,4
Propan C ₃ H ₈	81,8	18,2	4,50	15,8
Butan C ₄ H ₁₀	82,8	17,2	4,80	15,6
Heptan C ₇ H ₁₆	84,0	16,0	5,25	15,3
Oktan C ₈ H ₁₈	84,2	15,8	5,33	15,2
Cetan C ₁₆ H ₃₄	85,0	15,0	5,67	15,1

Benzín ¹⁾ Super	86,5	13,5	6,4	14,7
Normal	85,5	14,5	5,9	14,9
Motorová nafta	86,3	13,7	6,3	14,8
Etanol	52,0	13,0	4,00	9,0
Vodík	0	100	0	34,0
LPG	82,3	17,7	4,65	15,5

Tab. 11-2: Složení některých paliv a jejich stechiometrické směšovací poměry se (suchým) vzduchem [11]

Pozn.: 1) Navíc mohou benzíny obsahovat kyslíkaté sloučeniny, hmotnostní podíl kyslíku může tvořit až 2,7 % na úkor C, H.

Celý proces hoření může být řízen více způsoby.

Na řízení se mohou podílet mechanické nebo elektronické prvky konstrukce motoru. Cílem procesu řízení je co nejúčinnější přeměna chemické energie paliva na energii kinetickou. To se však musí dít za určitých podmínek. Těmi jsou:

- kultivovaný chod bez detonací (řízené hoření),
- minimální exhalace,
- minimální emise (hluk, vibrace, elektromagnetické záření),
- životnost a spolehlivost.

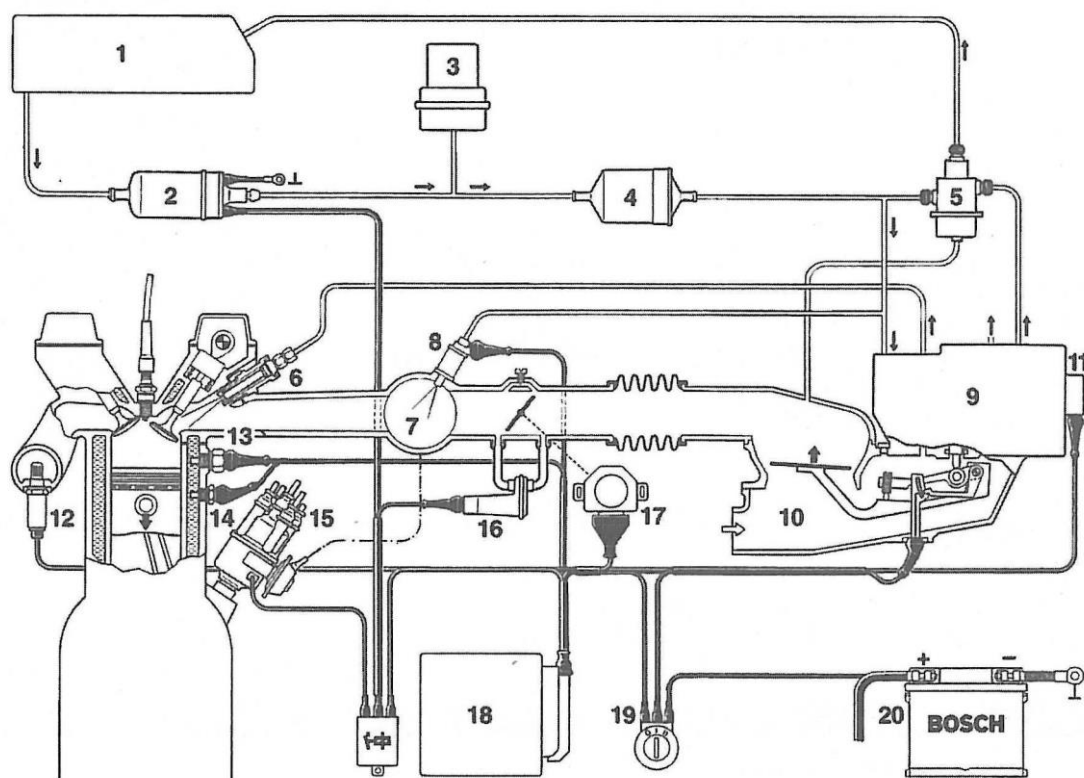
Systémy řízení se liší podle druhu motoru, rozdílné jsou pro zážehové nebo vznětové motory. Liší se i podle výrobců.

Zážehové motory

K řízení účinnost přeměny energie u zážehových motorů se nabízí následující komponenty nebo funkce:

- spalovací prostor: změny tvaru, antidetonační prvky, ...
- ventily a ventilový rozvod: časování, zdvih
- zapalování: předstih, intenzita zážehu, doba zážehu, místo zážehu
- palivo (vstřík): dávkování, časování, tlak, tvar a zrnitost
- oxidátor: dávkování, teplota, tlak.

Jeden z používaných systémů (KE-Jetronic) provádí řízení a regulaci podle obr. 11-6.

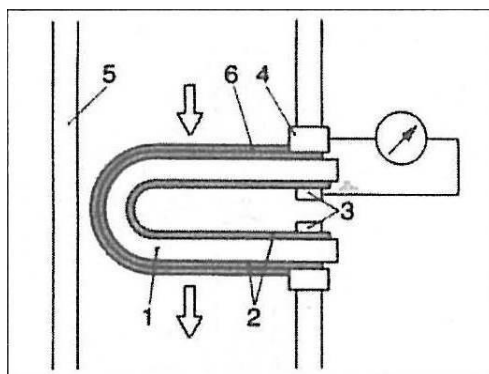


Obr. 11-6: Systém KE-Jetronic [12]

Vysvětlivky:

- | | | |
|---------------------------------------|--|------------------------------------|
| 1 – palivová nádrž | 9 – rozdělovač paliva | 17 – ovlád. motorek škrticí klapky |
| 2 – elektrické palivové čerpadlo | 10 – měřič množství vzduchu | 18 – elektronická řídicí jednotka |
| 3 – zásobník paliva | 11 – elektrohydraulický tlakový ventil | 19 – spínací skříňka |
| 4 – palivový filtr | | 20 – akumulátor |
| 5 – regulátor tlaku | 12 – lambda-sonda | |
| 6 – vstřikovací ventily | 13 – teplotní časový spínač | |
| 7 – směšovací komor | 14 – snímač teploty chladicí kapaliny | |
| 8 – ventil studeného spouštění motoru | 15 – rozdělovač | |
| | 16 – ventil přídavného vzduchu | |

Základním informačním prvkem pro řídicí jednotku je **λ sonda**. Tato je umístěna ve výfuku a podává informaci, zda hoření bylo dokonalé, nebo zda ve výfukových plynech jsou zbytky nespálené směsi. Funkce λ sondy je patrná z obr. 11-7.



Obr. 11-7: Schematické uspořádání λ sondy ve výfukovém potrubí [13]

Vysvětlivky:

1 – keramické těleso sondy

2 – elektrody

3 – kontakt

4 – kontakty pouzdra

5 – výfukové potrubí

6 – porézní keramická ochranná vrstva

Hodnota λ je součinitel přebytku vzduchu a porovnává skutečné množství vzduchu ve směsi s množstvím teoretickým – vypočteným podle stechiometrické rovnice (vztah 11.11). Platí vztah

$$\lambda = \frac{L_s}{L_t} = \frac{\text{množství vzduchu skut.}}{\text{množství vzduchu teoretické}} \quad (11.13)$$

Dále platí následující poměry

$\lambda = 1$ směs je správná, hoření je optimální,

$\lambda > 1$ přebytek vzduchu ve směsi,

$\lambda < 1$ nedostatek vzduchu ve směsi.

Dokonalé spalování má kromě vlivu na optimální přeměnu energie také vliv na exhalace spalovacího motoru. Exhalace – emise spalin je velmi sledovaná veličina, legislativně omezená (limitovaná). Limity emitovaných škodlivin jsou od roku 1971 stále snižovány podle stavu vědy ve světě. Rozhodující jednotkou je hmotnost emise na km jízdy [g/km]. U zážehových motorů jsou sledovány:

CO – oxid uhelnatý,

HC – nespálené uhlovodíky,

NO_x – oxidy dusíku.

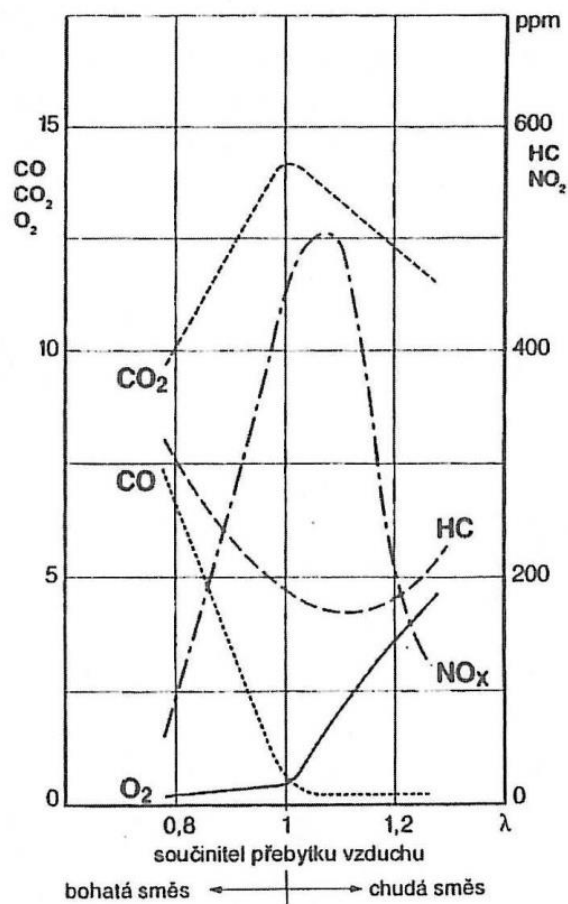
CO₂ není dosud legislativně limitován. Snižování jeho produkce se děje cestou snižování absolutní spotřeby.

Rok	Norma EURO	CO [g.km ⁻¹]	NO _x [g.km ⁻¹]	HC + NO _x [g.km ⁻¹]	HC [g.km ⁻¹]
1992	I	3,16	-	1,13	-
1996	II	2,20	-	0,50	-
2000	III	1,30	0,15	-	0,20
2005	IV	1,00	0,08	-	0,10
2009	V	1,00	0,06	-	0,10
2014	VI	1,00	0,06	-	0,10

Tab. 11-3: Limity jednotlivých škodlivin podle roku platnosti (pro osobní automobily [14])

Pozn.: Ve výfukových plynech je dále obsaženo několik prvků nebo sloučenin. Protože však nejsou prioritně škodlivé, nejsou prozatím limitovány.

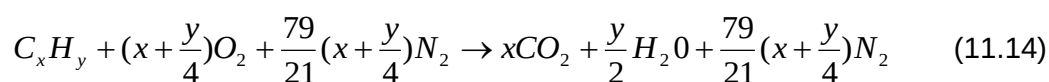
Informace, které λ sonda předává řídicí jednotce a následné řízení spalování má vliv na sledované veličiny tak, jak ukazuje graf 11-8.



Graf 11-8: Složení emisí v závislosti na součiniteli přebytku vzduchu λ [13]

Při dokonalém spalování motor emituje jen CO_2 a H_2O . nutno připomenout, že rovněž N_2 , ten je však jenom vrácen do vzduchu, odkud byl nasán.

Při dokonalém hoření je možné určit množství spalín podle vztahu:



kde $\frac{79}{21}$ představuje poměr dusíku a kyslíku ve vzduchu.

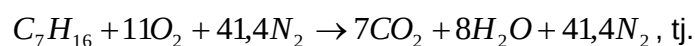
Příklad pro výpočet emise při dokonalém spalování

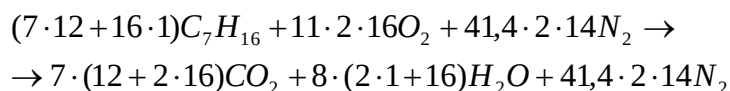
Pro zjednodušení použít heptan C_7H_{16} (jde o druh benzínu, resp. přídavku do různých benzínů méně čistých).

Molové hmotnosti jsou:

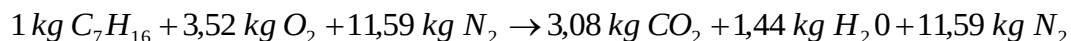
$$M_C = 12; M_H = 1; M_N = 14; M_O = 16 \text{ [kg} \cdot \text{mol}^{-1}]$$

dosazením do vztahu (11.14) dostaneme

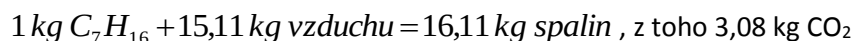




Po vydělení hmotností C_7H_{16} dostaneme



a dále:



Uvedený výpočet je obecně platný pro všechny druhy paliv, která jsou sloučeninami C_xH_y (benzín, nafta, LPG, CNG, etanol, ...). Emitovaný CO_2 je nežádoucí produkt, který však nelze snížit řízením hoření. Jediná cesta k jeho snižování vede přes absolutní spotřebu paliva.

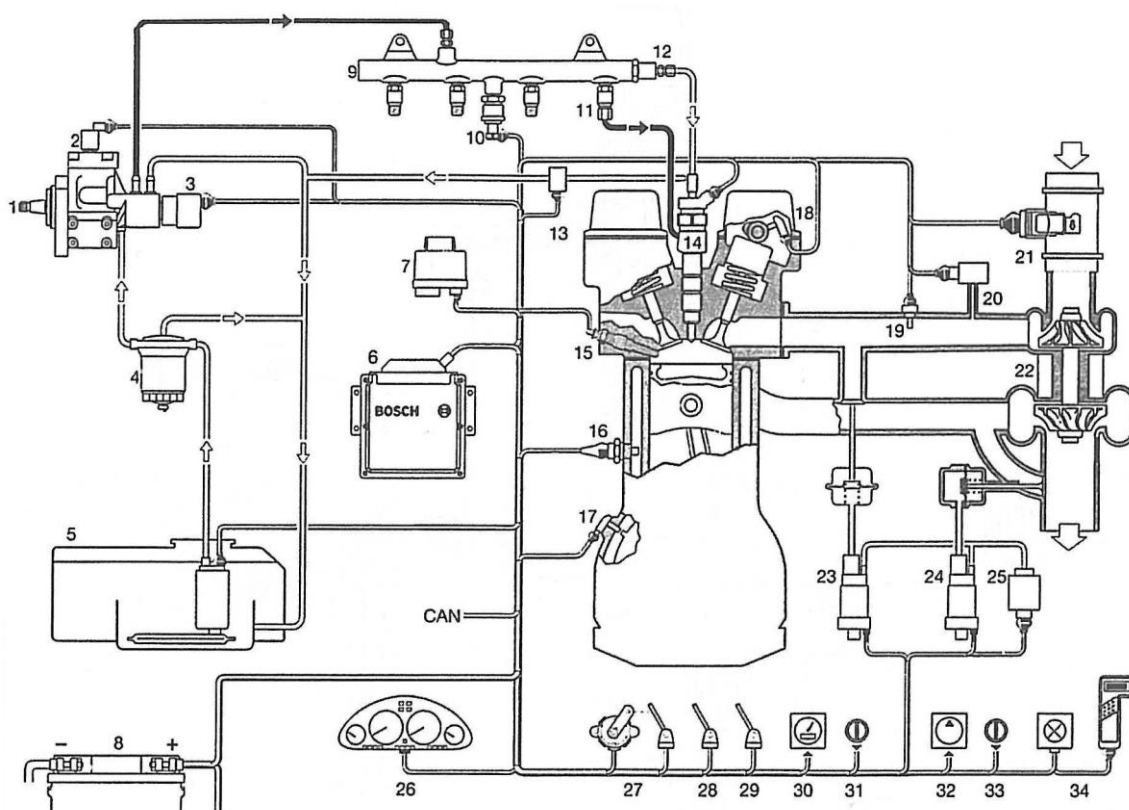
Vznětové motory

Pozn.: Účinnost vznětových motorů je o několik procent vyšší než u zážehových (až 50 %).

K řízení účinnosti přeměny energie u vznětových motorů se nabízí následující komponenty nebo funkce:

- spalovací prostor: změny tvaru, zvýšení počtu pro jeden válec, ...
- ventily a ventilový rozvod: časování, zdvih,
- palivo (vstřík): dávkování, časování, tlak, rozstřík, zrnitost,
- oxidátor (vzduch): dávkování, teplota, tlak,
- periferní systémy: recirkulace výfukových plynů, přidávání činidel ovlivňující emise (močovina, AdBlue, čpavek aj.)

Jeden z používaných systémů (Common Rail) provádí řízení a regulaci podle obr. 11-8.



Obr. 11-8: Vstřikovací systém Common Rail (Bosch) [15]

Vysvětlivky:

- 1 vysokotlaké čerpadlo s radiálními písty
- 2 vypínání prvků při volnoběhu a při neúplném zatížení, pro omezení ohřívání paliva
- 3 tlakový regulační ventil, taktovaný řídicí jednotkou
- 4 palivové čerpadlo
- 5 palivová nádrž s předřazeným filtrem a pomocným čerpadlem
- 6 řídicí jednotka
- 7 řídicí jednotka doby žhavení
- 8 akumulátor
- 9 rail
- 10 snímač tlaku v railu
- 11 omezovač průtoku, v případě vadného vstřikovače blokuje průtok paliva, aby nedošlo k poškození motoru
- 12 omezovací tlakový ventil, zabraňuje zvýšení tlaku nad 180 MPa
- 13 snímač teploty paliva
- 14 vstřikovač
- 15 žhavicí svíčka
- 16 snímač teploty chladicí kapaliny
- 17 snímač otáček klikové hřídele
- 18 snímač otáček vačkové hřídele (Hallův snímač), slouží k rozpoznávání válců
- 19 snímač teploty nasávaného vzduchu
- 20 snímač plnicího tlaku turbodmychadla
- 21 snímač hmotnosti vzduchu s vyhřívaným filmem
- 22 turbodmychadlo
- 23 regulátor recirkulace výfukových plynů
- 24 regulátor plnicího tlaku turbodmychadla

- 25 vakuové čerpadlo
- 26 přístrojová deska s výstupem signálu o spotřebě paliva, otáčkách atd.
- 27 snímač polohy pedálu akcelérátoru
- 28 snímač polohy brzdového pedálu
- 29 spínač spojky
- 30 snímač rychlosti jízdy
- 31 ovlád. prvek regulace rychlosti jízdy (tempomat)
- 32 kompresor klimatizace
- 33 ovládací prvky klimatizace
- 34 přípojka pro diagnostický přístroj

Výsledkem řízení je optimální dávka paliva vstříknutá do spalovacího prostoru.

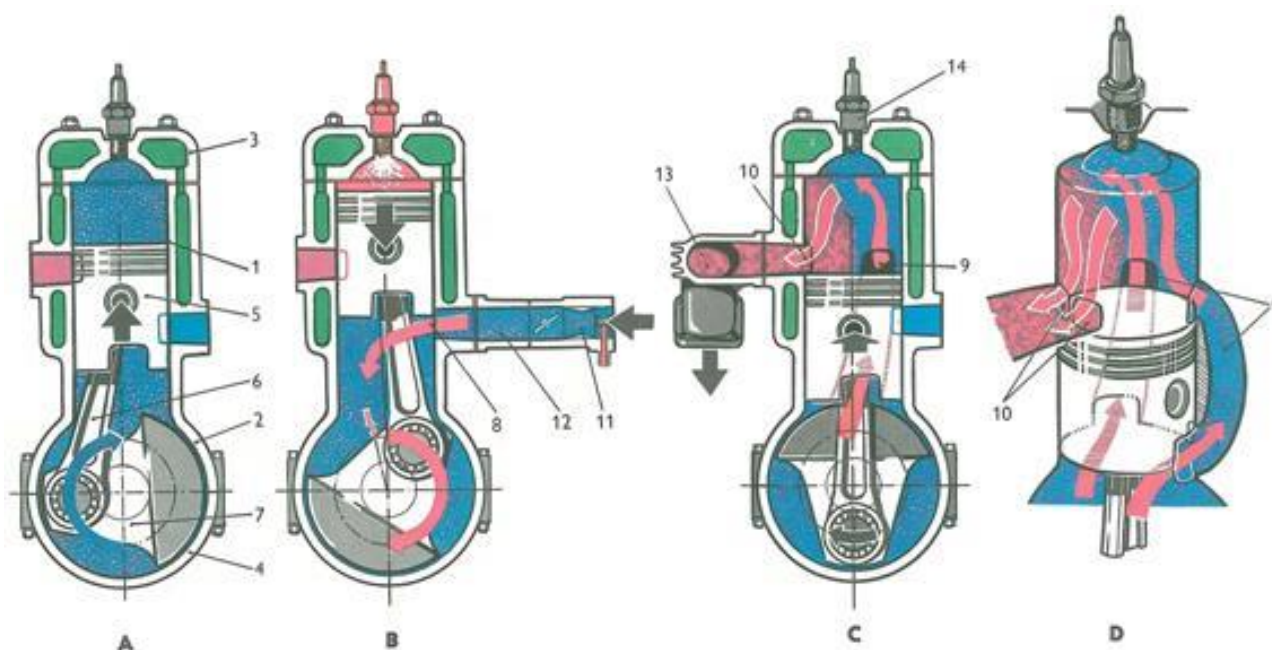
Protože u vznětových motorů je omezeno řízení vznícení paliva a hoření má detonační průběh, jsou v exhalacích sledovány ještě emise pevných částic (PM). V následující Tab. 11-4 jsou uvedeny limity jednotlivých škodlivin podle roku platnosti (pro osobní automobily)

Rok	Norma EURO	CO [g.km ⁻¹]	NO _x [g.km ⁻¹]	HC + NO _x [g.km ⁻¹]	PM [g.km ⁻¹]
1992	I	3,16	-	1,13	0,18
1996	II	1,00	-	0,70	0,08
2000	III	0,64	0,50	0,56	0,05
2005	IV	0,50	0,25	0,30	0,025
2009	V	0,50	0,18	0,23	0,005
2014	VI	0,50	0,08	0,17	0,005

Tab. 11-4: Limity jednotlivých škodlivin podle roku platnosti (pro osobní automobily [14])

Motor s dvoudobým pracovním cyklem

Způsob práce uvedeného motoru je patrný z obr. 11-9.



Obr. 11-9: Činnost dvoudobého zážehového motoru [8]

Vysvětlivky:

1	pracovní válec	9	přepouštěcí kanál
2; 4	kliková skříň	10	výfuk spalín
3	hlava válce	11	difuzor (karburátor)
5	pracovní píst	12	sací potrubí
6	ojnice	13	výfukové potrubí
7	klikový hřídel	14	zapalovací svíčka
8	sání směsi do klikové skříně		

Popis činnosti

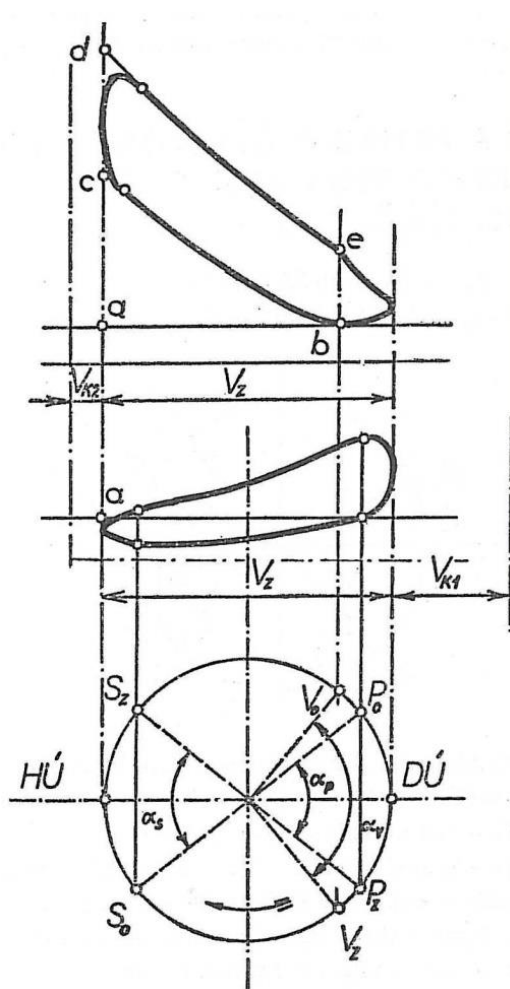
A – pracovní píst směřuje z dolní úvrati do horní. Směs je stlačována ve spalovacím prostoru a zároveň je v klikové skříni vytvářen podtlak.

B – stlačená směs je zažehnuta, dochází k expanzi a píst koná práci. Zároveň díky podtlaku v klikové skříni proudí do tohoto prostoru směs do doby, než píst uzavře přípuť.

C – v klikové skříni je vytvořen přetlak, přepouštěcí kanál otevřen a směs proudí do pracovního prostoru nad píst. Vytlačuje přitom spaliny do výfuku.

D – prostorové znázornění činnosti

Vyobrazený motor znázorňuje jeden z principů jeho činnosti. Moderní konstrukce dvoudobých motorů mají mnohá konstrukční doplnění, která zvyšují účinnost procesu. Termodynamická závislost tlaku na objemu je patrná z $p - V$ diagramu na obr. 11-10.



Obr. 11-10: Průběh tlaků ve válci a v klikové skříni dvoudobého zážehového motoru [8]

Vysvětlivky:

V_{K1} – škodlivý prostor klikové skříně; V_{K2} – kompresní prostor válce; SO – sací kanál se otvírá; SZ – sací kanál se zavírá; VO – výfukový kanál se otvírá; VZ – výfukový kanál se zavírá; PO – přepouštěcí kanál se otvírá; PZ – přepouštěcí kanál se zavírá; α_s – otevření sacího kanálu; α_v – otevření výfukového kanálu; α_p – otevření přepouštěcího kanálu

SO $\rightarrow$ HÚ = HÚ $\rightarrow$ SZ

PO $\rightarrow$ DÚ = DÚ $\rightarrow$ PZ

VO $\rightarrow$ DÚ = DÚ $\rightarrow$ VZ

Horní část znázorňuje poměry v pracovním válci nad pístem a střední část znázorňuje poměry v klikové skříni. Plocha ohraničená křivkami grafu představuje užitečnou práci (nahore) a neužitečnou uprostřed.

Celková účinnost dvoudobého spalovacího motoru je nižší než u motoru čtyřdobého. Pohybuje se v intervalu do 30 %. Zásadním problémem tohoto systému přeměny energie však není jeho účinnost, ale nemožnost splnit požadavky na exhalace. Vzhledem k tomu, že v pracovním procesu nelze oddělit nespálenou směs od spálené – výfukové plyny jsou vytlačovány nespálenou směsí – nelze zabránit tomu, aby ve výfukových plynech nebyla nespálená směs. Dodatečné spálení v katalyzátoru je možné jen za cenu vysokých ztrát.

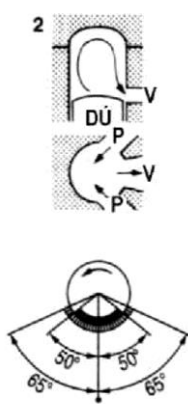
Měrná spotřeba paliva dvoudobých motorů se pohybuje v rozmezí 320 až 800 g.kWh⁻¹. Tato hodnota ukazuje na účinnost menší než 30 %.

V průběhu vývoje dvoudobých motorů se pozornost soustředila na dvě oblasti:

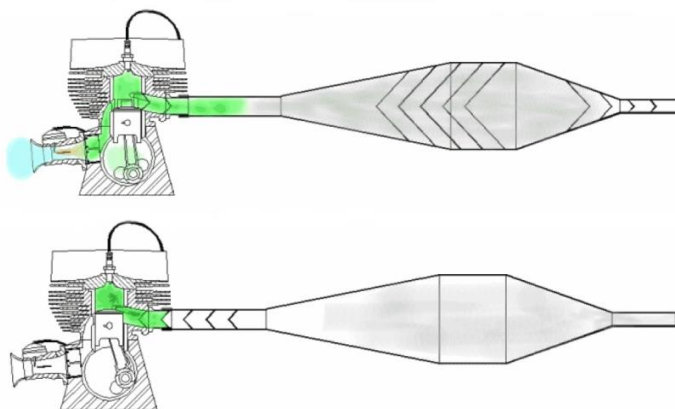
- účinnost přeměny energie,
- emise škodlivin.

Konstrukční opatření, která v obou směrech postavení dvoudobých motorů zlepšila, lze stručně v časovém sledu vyjmenovat:

a) Vratné vyplachování. Způsob, kterým dochází k určitému víření směsi při vytlačování výfukových plynů. Tento způsob nahradil tzv. deflektor, překážku na hlavě pístu.



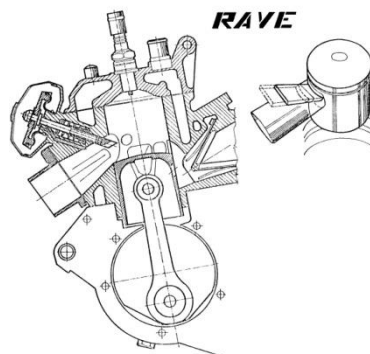
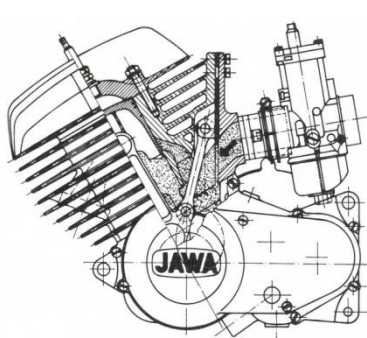
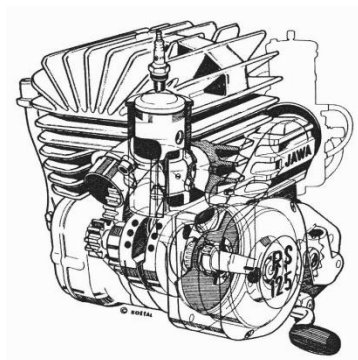
Obr. 11-11: Vratné vyplachování [38]



Obr. 11-12: Pulsace ve výfuku [38]

b) Pulsace ve výfuku. Vhodnou (resonanční) skladbou překážek ve výfuku a vhodnou délkou výfukového potrubí je docíleno toho, že odražená vlna výfukových plynů zabráni nespálené směsi proniknout do výfuku.

c) Rotační nebo posuvné šoupátko. Disk s otvorem rotující společně s klikovým hřídelem otevírá sací otvor lépe než výřezy v pístu. Tím dochází k řízenému plnění.



Obr 11-13: Rotační šoupátko a řízení výfukového traktu [38]

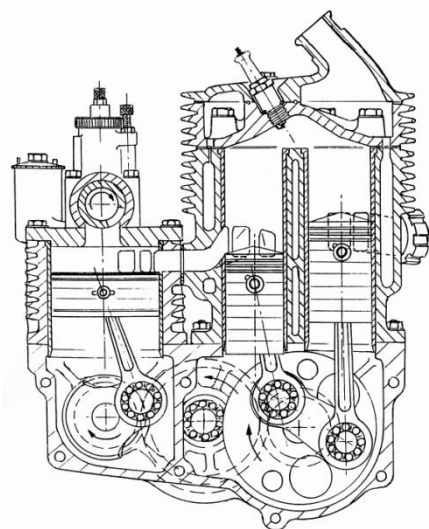
Obr 11-14: Membrána v sání [38]

d) Samostatné mazání. Pro provoz dvoudobého motoru je třeba mazivo nasávat ve směsi. Mazací poměr olej/benzín se pohybuje v rozmezí 1/20 až 1/50. Řízené samostatné mazání je schopno poměr měnit podle režimu práce.

e) Řízení výfukového traktu. Časování výfuku i sání provádí píst. Změnu lze ale provést i jinak, např. řízenou změnou rozměru výfukového traktu (přívěra).

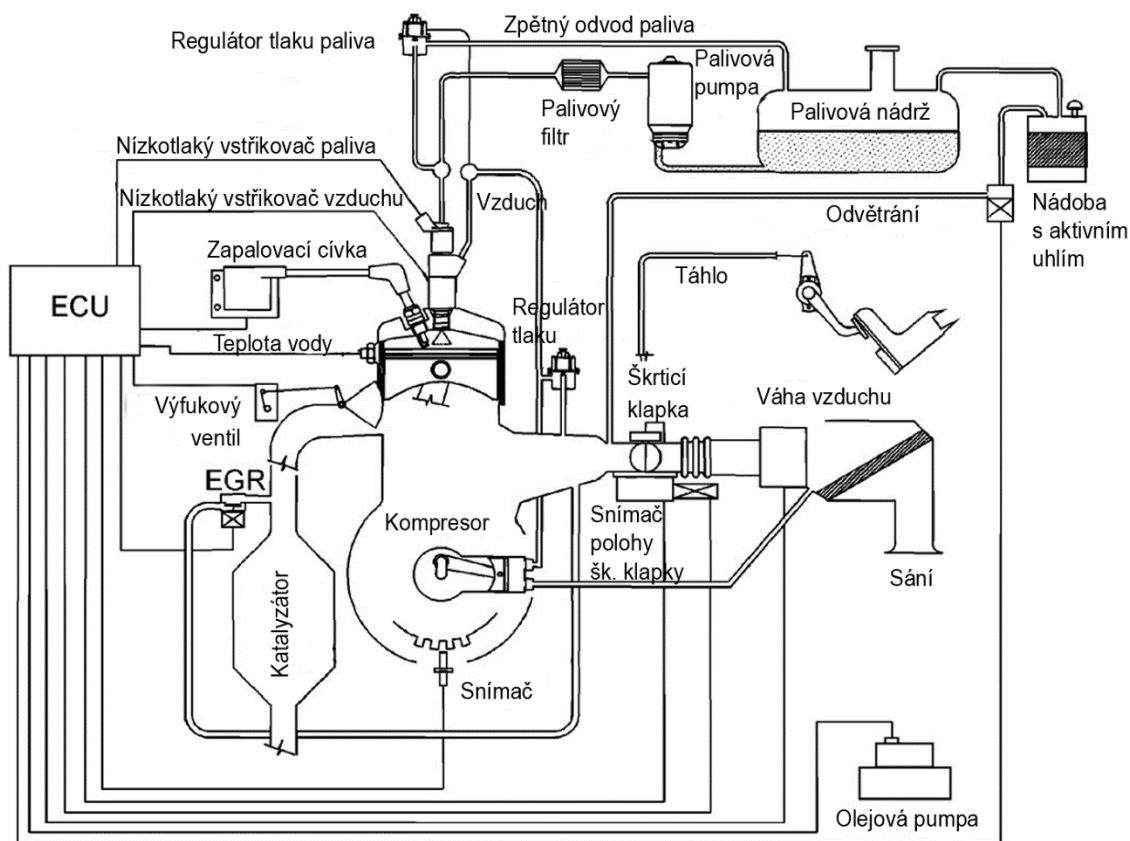
f) Membrána v sání. Aby bylo zabráněno zpětnému rázu nasávané směsi, je v sacím traktu umístěna jednosměrná membrána, která propouští jen směrem do motoru.

g) Přepřlňování a zvyšování kompresního poměru. Metody jsou schematicky znázorněny v následujících skicách.



Obr 11-15: Přepřlňování

h) Řízení stechiometrického poměru dodatečným vstupem vzduchu. Princip vycházel ze zkušenosti, že pro vznícení je možný jiný poměr než pro průběžné hoření. Přísáváním vzduchu do klikové skříně byla směs ochuzována.



Obr 11-16: Systém řízení dvoudobého motoru

11.1.3. Motor s vnitřním spalováním a nelineárním pohybem pístu

Nedostatky spalovacích motorů s lineárním pohybem pístu vedly k výzkumu a vývoji jiných systémů. Byly hledány systémy, které by eliminovaly jeden z hlavních nedostatků, a sice volné setrvačné síly a momenty, které zapříčiňují vysoké vibrace. Pozornost se soustředila na jiný nežli přímočarý pohyb pístu a jeho nutný převod na rotační pohyb. Tak vznikly motory s kývavým, rotačním a krouživým pohybem pístu. Stejně jako u všech spalovacích motorů je základem přeměny energie prudká expanze směsi paliva a oxidátoru. Tlak takto vzniklý působí na píst, jehož pohyb není přímočarý. Tento pohyb je využit přímo (pokud je rotační) nebo je převeden na rotační. V průběhu rozvoje dopravy bylo zkonstruováno více mechanismů tohoto druhu, avšak očekávaná revoluce v koncepci spalovacího motoru nenastala. Hlavními důvody byly zejména nízká účinnost přeměny energie, nevhodné exhalace, nízká životnost těsnících částí, drahá výroba, nebo kombinace více důvodů.

11.1.3.1. Wankelův motor

Jedna z navržených koncepcí se dočkala sériového využití v dopravě. Vynález Felixe Wankela zaujal v roce 1957 celý motoristický svět a většina renomovaných automobilek jej zařadila do svého programu. 16 výrobců jej do roku 1966 začalo vyrábět a mnoho dalších až do osmdesátých let 20. století prohlubovalo jeho vývoj. Také v Československu byl v institutu ÚVMV vyroben vlastní prototyp.

Přes veškerý nadějný vývoj motor nezpůsobil revoluci v přeměně energie paliva na kinetickou. Důvody byl dva:

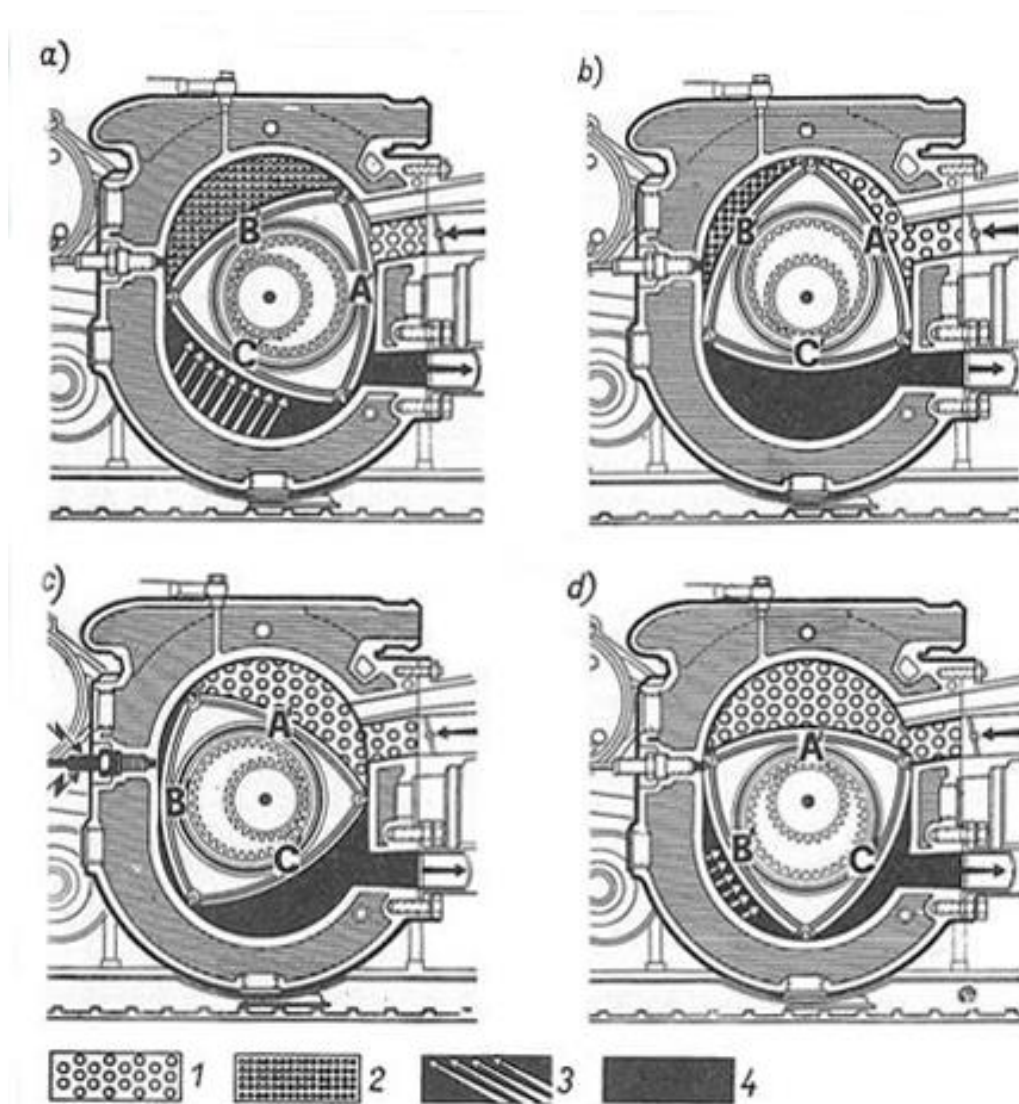
- nízká účinnost (méně než 30 %),
- vysoké exhalace.

Konstrukce motoru.

Vnitřní prostor skříně – ekvivalenta pracovního válce u motorů s lineárním pohybem pístu – je vytvořen křivkou, která se nazývá epitrochoida a vzniká odvalováním tvořícího bodu kružnice po jiné kružnici (výklad přesahuje možnosti této publikace a lze je nalézt např. v literatuře [16]).

Trojhranný píst uvnitř koná krouživý pohyb. V každé poloze pístu jsou jeho vrcholové přímky ve styku s epitrochoidou vnitřního prostoru skříně, čímž jsou vytvořeny oddělené komory. Objem komor se v důsledku kroužení mění, a tím je umožněno sání, komprese, expanze i výfuk, stejně jako u konvenčních motorů.

Způsob práce Wankelova motoru je patrný z *obr. 11-17*.



Obr. 11-17: Wankelův motor

Legenda:

a) výchozí poloha pístu; b), c), d) polohy pístu po každých 30° jeho otočení
1 – sání, 2 – komprese, 3 – expanze, 4 – výfuk; A', B', C' – boky pístu

Obr. 11-17a

- bok pístu A' dokončuje výfuk a začíná sání,
- bok pístu B' stlačuje nasátou směs,
- na bok pístu C' působí expandující plyny, které otáčejí pístem a konají práci.

Obr. 11-17b (píst se otočil o 30°)

- bok pístu A' ještě pokračuje v sání,
- bok pístu B' pokračuje v kompresi,
- lišta boku C' odkryla výfukový kanál a dochází k výfuku.

Obr. 11-17c (píst se otočil o 60°)

- bok pístu A' pokračuje v sání,
- bok pístu B' dokončil kompresi a dochází k zážehu,
- bok pístu C' pokračuje ve výfuku.

Obr. 11-17d (píst se otočil o 90°)

- bok pístu A' pokračuje v sání,
- nad bokem pístu B' začíná expanze plynů,
- bok pístu C' pokračuje ve výfuku.

Pokud bychom použili terminologii konvenčních motorů, pak u Wankelu dochází během jedné otáčky pístu ke třem pracovním oběhům (3 zážehy, 3 expanze). Jeho objemový výkon bude tedy výhodnější než u dvoudobého a čtyřdobého konvenčního motoru.

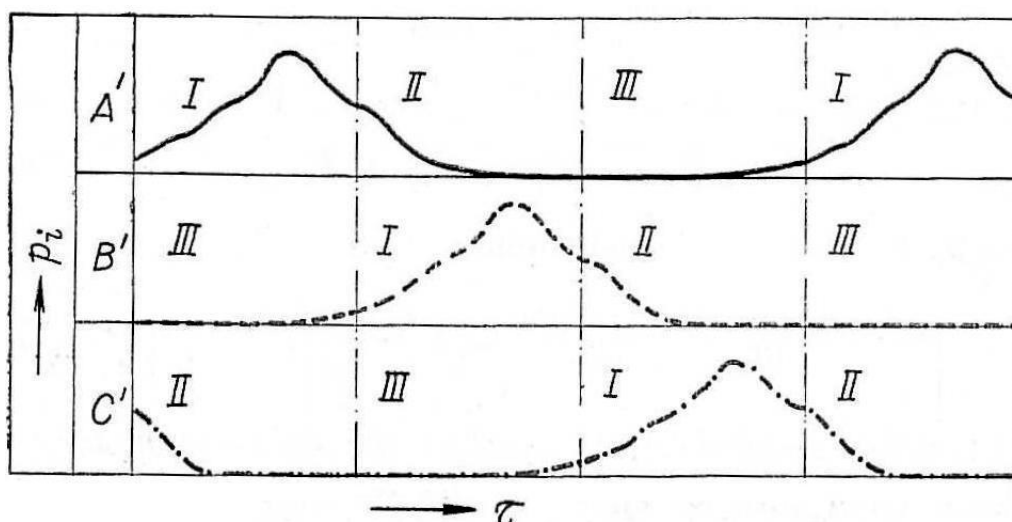
Indikované parametry Wankelova motoru

Indikovaný výkon lze vyjádřit rovnicí

$$P_i = \frac{p_i \cdot V_n \cdot n}{600} \text{ [kW]}, \text{ kde} \quad (11.15)$$

p_i	střední indikovaný tlak [daN/cm ²]
V_n	pracovní objem jedné komory [dm ³]
n	otáčky hřídele motoru [min ⁻¹]

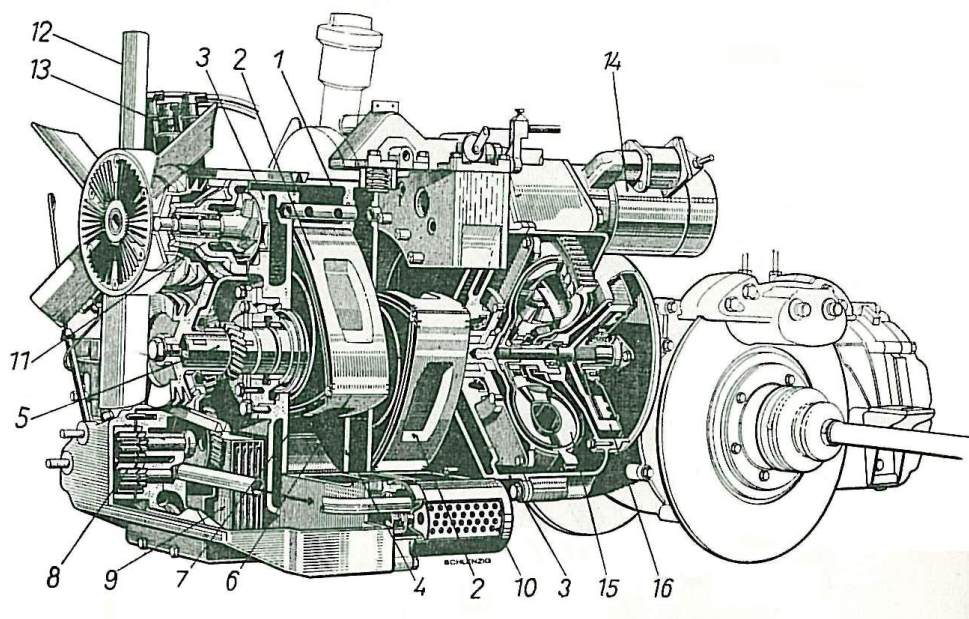
Indikovaný diagram (obdoba p - V diagramu konvenčních motorů) lze sestavit v závislosti na čase. Průběh tlaků je podle *grafu 11-8* vyjádřen pro každý bok pístu.



Graf 11-8: Indikátorové diagramy Wankelova motoru [16]

A', B', C' – boky pístu, I, II, III – snímače tlaku, τ – čas, p_i – indikovaný tlak

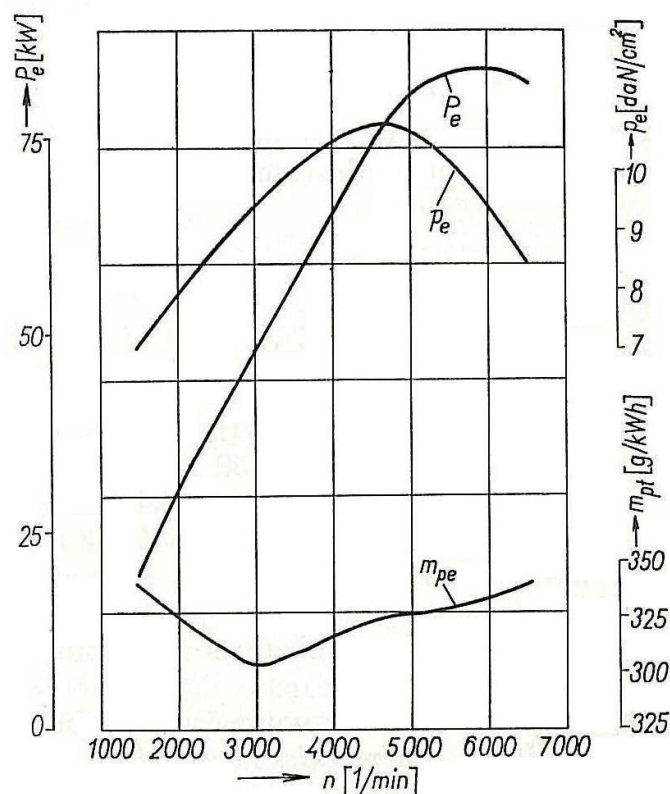
Vnější (rychlostní) charakteristika má pro motor NSU typ KKM-612 (obr. 11-18) tvar podle grafu 11-9.



Obr. 11-18: Řez motorem KKM-612 vozu NSU Ro 80, připojeným hydraulickým měničem momentu a spojkou [16]

Vysvětlivky:

1 – skříň, 2 – píst, 3 – víko skříňe, 4 – střední díl, 5 – hřídel, 6 – radiální těsnicí lišta, 7 – axiální těsnicí lišta, 8 – olejové čerpadlo, 9 – chladič oleje, 10 – čistič oleje, 11 – vodní čerpadlo, 12 – ventilátor, 13 – rozdělovač, 14 – spouštěč, 15 – hydrodynamický měnič točivého momentu, 16 – spojka



Graf 11-9: Vnější rychlostní charakteristika motoru KKM-612 [16]

Z grafu lze odečíst několik vlastností typických Wankelovu motoru:

- pružnost motoru φ_n , vyjádřená jako poměr otáček $M_{t \max}$ ku otáčkám $P_{e \max}$ je 0,793, což odpovídá zhruba pružnosti dvoudobých konvenčních motorů,
- m_e – měrná spotřeba paliva neklesne pod 300 g.kWh^{-1} , spíš leží blízko 320 g.kWh^{-1} , což odpovídá účinnosti menší než 30 %.

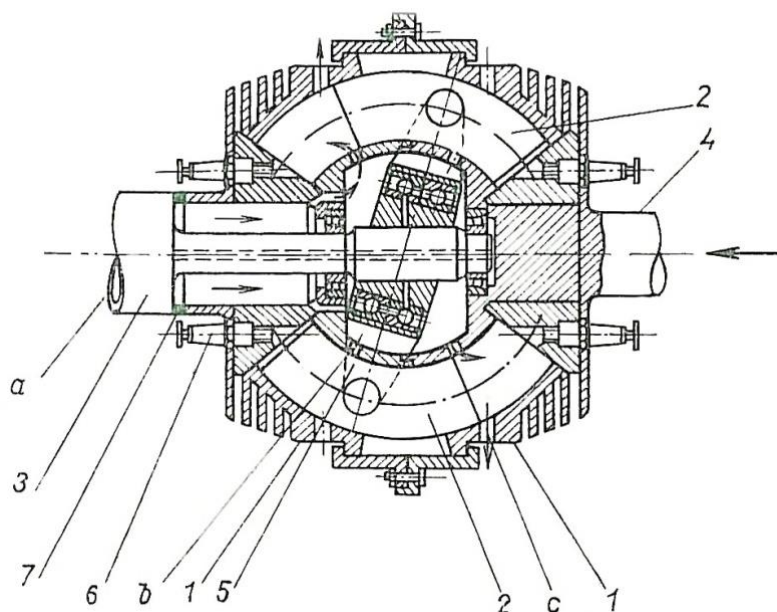
Pozn.: na vývoji Wankelova motoru stále pracuje několik institucí ve světě.

11.1.3.2. Motory s kývavým pohybem pístu nebo desky

Stejně jako u všech spalovacích motorů s vnitřním spalováním je přeměna energie na kinetickou uskutečněna expanzí prudkým hořením směsi paliva a vzduchu. Rozdíl oproti konvenčním motorům je ve způsobu přenosu síly. U jedněch typů je tlak na píst nebo desku vektorově rozložen na dva směry, z nichž jeden působí ve směru rotace a vytváří potřebný moment M_t a druhý působí pohyb pístu. K rotačnímu pohybu dochází díky různým osám rotace výstupního hřídele a desky nebo uložení pístů. U jiných je spalovací komora kruhová – prstencová a píst nebo písty vykonávají kývavý pohyb uvnitř této komory. Rotační pohyb je poté získán buďto pomocí klikového mechanismu, nebo přímo. V historii bylo použito několik motorů tohoto typu v dopravě, nikoliv ale masivně. Důvodů nerozšíření bylo několik. Nízká účinnost, nevyhovující exhalace nebo nákladná výroba. Uvedme některé:

Motor Selwood

V roce 1961 byl patentován motor s kývavým pohybem pístů Selwood. Princip práce je patrný z následujících obrázků.

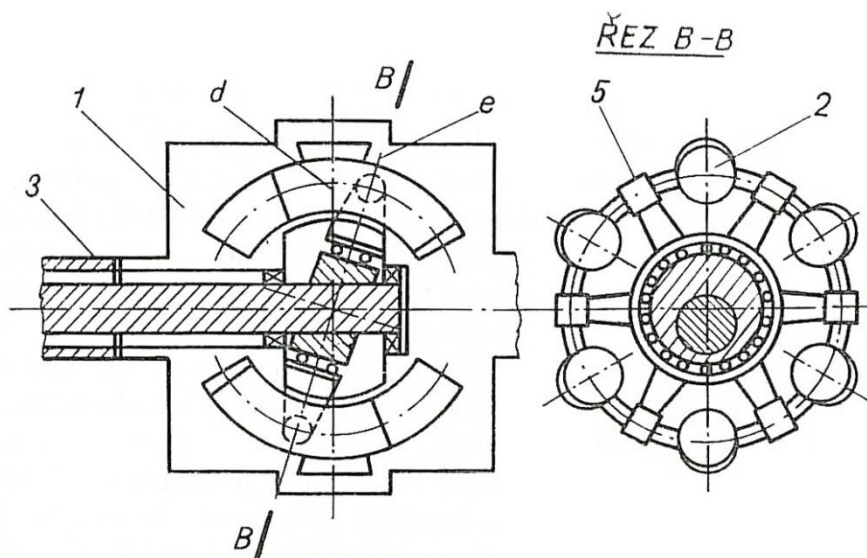


Obr. 11-19: schematický řez motorem Selwood [17]

Legenda:

- 1 – půlka skříně
- 2 – píst
- 3 – nosný čep
- 4 – výstupní hřídel
- 5 – hvězdice
- 6 – zapalovací svíčka

- 7 – tepelná izolace
- a – vstup směsi
- b – sací kanál
- c – výfukový kanál



Obr. 11-20: Uspořádání pístů motoru Selwood [16]

Legenda:

- 1 – skříň
- 2 – píst
- 3 – nosný čep

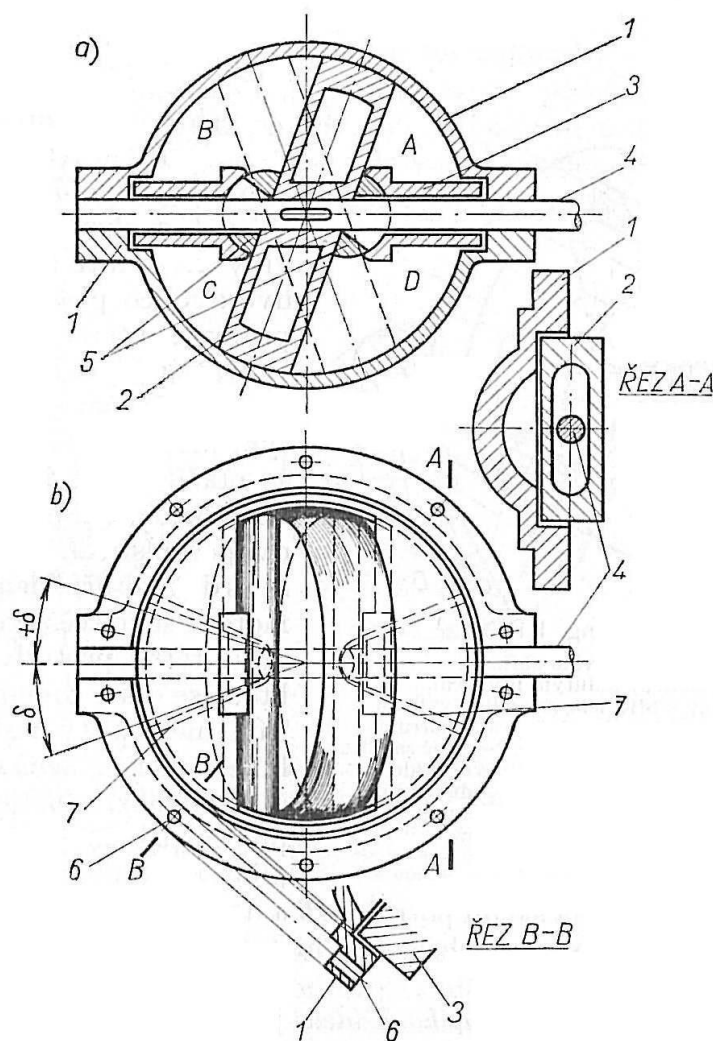
- 5 – hvězdice
- d – rovina rotace bloku
- e – rovina rotace hvězdice

Šestiválcový zážehový motor má dvojčinné písty pracující ve dvoudobém cyklu. Vychýlení os rotací je 15° . K plnění válců je použit kompresor. Spálená směs je vytlačována nespálenou, proto mají písty deflektor. Písty jsou uloženy na kyvné desce na kulovém čepu. Přenos síly je tedy zprostředkován vazbou sférickou.

Výhodou tohoto způsobu přeměny energie jsou nízké volné síly a tím i nízké vibrace. Nevýhodou je malá účinnost odpovídající zhruba účinnosti dvoudobých motorů a nemožnost splnění limitů pro exhalace. Rovněž technologie výroby je náročná.

Motor „Z“

Podobný princip přeměny energie využívá motor českého konstruktéra J. Zoukara. Princip práce je patrný z *obr. 11-21*.



Obr. 11-21: Schéma ústrojí Motoru „Z“ [16]

Legenda:

a) řez ve svislé rovině

b) půdorys při sejmuté horní části skříně

1 – skříň

2 – píst

3 – kyvná deska

4 – hřídel

5 – těsnicí lišta

6 – otvor pro šroub skříně

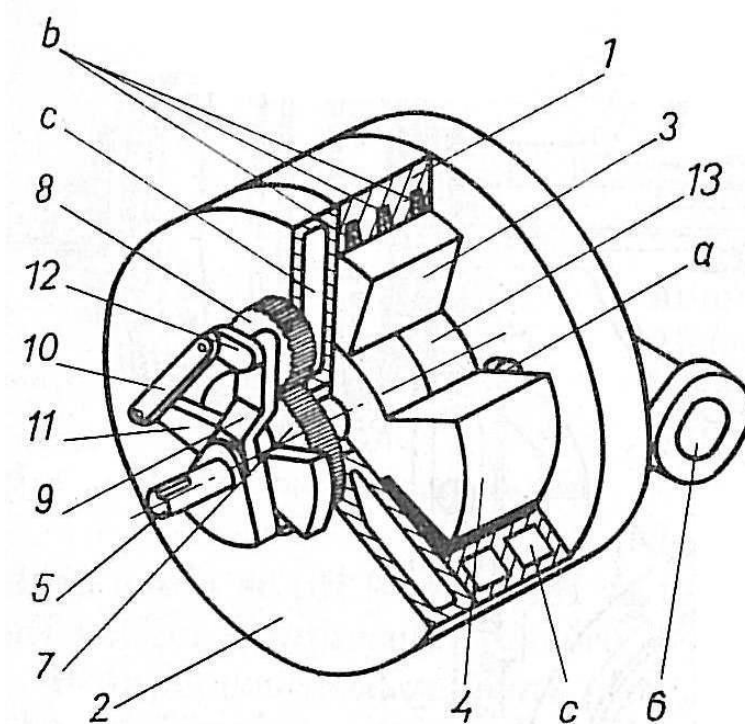
7 – vybrání pro hřídel

A, B, C, D – komory

Komora kulovitého tvaru je rozdělena deskou (3) na dvě poloviny a deskovitým pístem (2) dále na čtyři komory A, B, C, D. Ha hřídeli (4) je klínem připevněn deskový píst (2). Při otáčení hřídele dochází ke změnám objemu komor. Při zvětšování objemu je do komory nasávána směs paliva a vzduchu, ta je posléze stlačena a zažehnuta. Při expanzi tlak působí na píst a tento rotuje. Čtyřkomorový motor je obdobou čtyřválcového spalovacího motoru. Motor nenalezl masové uplatnění.

Motor Kauertz

Vynález je pojmenován po německém inženýru Eugenu Kauertzovi, který jej patentoval v roce 1961. Pracuje na principu dvou rotujících pístů motýlovitého tvaru, které proti sobě kývou tak, že prostor mezi křídly pístů mění objem.

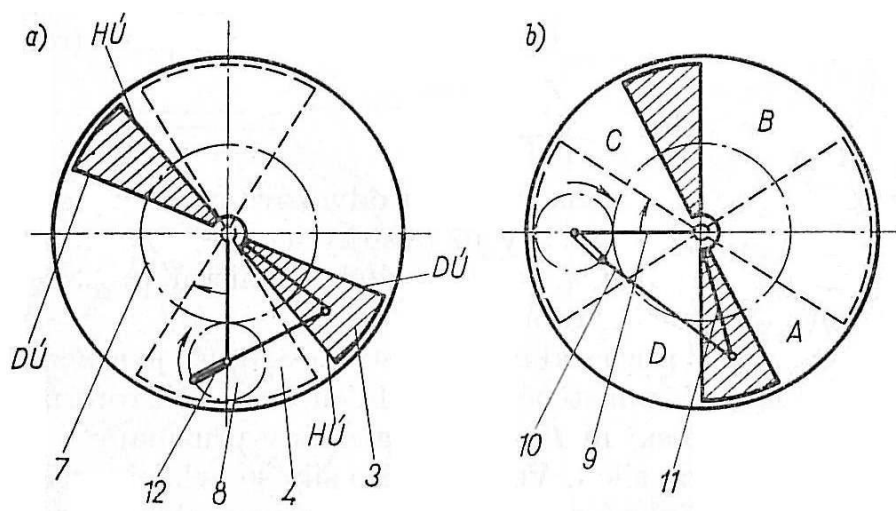


Obr. 11-22: Motor Ing. Kauertze [18]

Legenda:

- | | |
|---|-------------------------------------|
| 1 – skříň | 10 – ojnice |
| 2 – víko skříně | 11 – klika spojená s dutým hřídelem |
| 3 – píst spojený s dutým hřídelem | 12 – klika spojená se satelitem |
| 4 – píst spojený s hřídelem pro odběr výkon | 13 – dutý hřídel |
| 5 – hřídel pro odběr výkonu | a – plnicí kanál |
| 6 – sací potrubí | b – výfukové kanály |
| 7 – pevné planetové kolo | c – otvor pro chladicí kapalinu |
| 8 – satelit | |
| 9 – nosič satelitu | |

Této změny je využito k známým cyklům spalovacího motoru – sání, komprese, expanze a výfuk. Vzájemnou změnu poloh pístů a jednosměrnou rotaci umožňuje klikový mechanismus podle obr. 11-23.



Obr. 11-23: Schéma ústrojí motoru Ing. Kauertze v mezních polohách [16]

Legenda:

a) jedna z krajních poloh pístů

b) poloha ústrojí mezi oběma krajními polohami pístů

3 – píst spojený s dutým hřídelem

4 – píst spojený s hřídelem pro odběr výkonu

7 – pevné planetové kolo

8 – satelit

9 – nosič satelitu

10 – ojnice

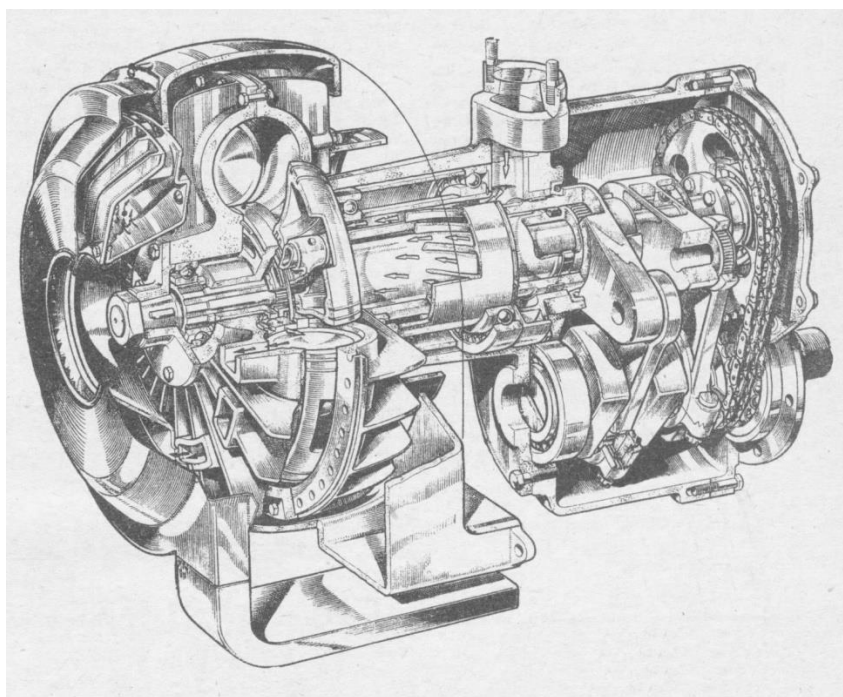
11 – klika spojená s dutým hřídelem

12 – klika spojená se satelitem

A, B, C, D – komory

Motor Omega

Podle patentu Granville Bradshawa byl vyroben motor, který pracuje na principu čtyř zaoblených pístů, pohybujících se v prstencové komoře. Způsob je patrný z obr. 11-24.



Obr. 11-24: Motor Omega [19]

Kývavý pohyb pístů je přenesen pákou na klasický klikový hřídel. Prostor mezi dvěma písty je komora, která mění objem a tak je v této komoře uskutečněn známý oběh v cyklech sání, komprese, expanze a výfuku. V prstencovém prostoru jsou čtyři písty a čtyři pracovní komory.

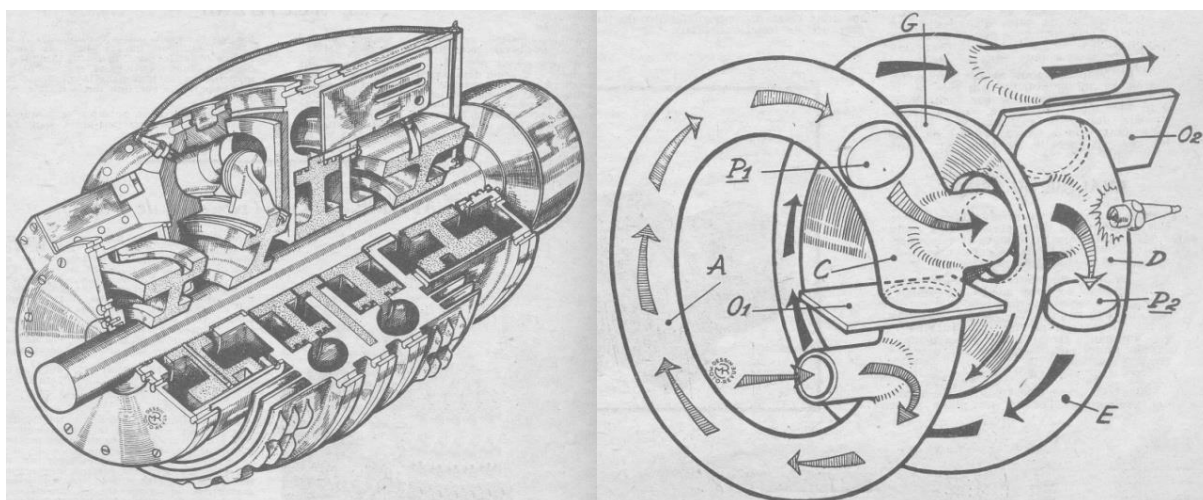
11.1.3.3. Motory s rotačním pohybem pístu

Také u těchto typů motorů je chemická energie paliva přeměněna na kinetickou expanzí hořením a tlakem na píst nebo jinou součást s funkcí pístu. Také zde je nezbytné, aby systém umožnil změnu objemu komory (prostoru), ve které může docházet k termodynamické změně (adiabatické).

V minulosti bylo použito několik motorů tohoto typu v dopravních prostředcích, nikoliv ale masivně. Tyto systémy nacházejí také uplatnění jako čerpadla nebo dmychadla. Uvedme některé:

Motor Fillols

Podle informace odborného tisku byl v padesátých letech předveden motor s rotujícími písty v prstencových komorách. Princip práce je patrný z obr. 11-26.



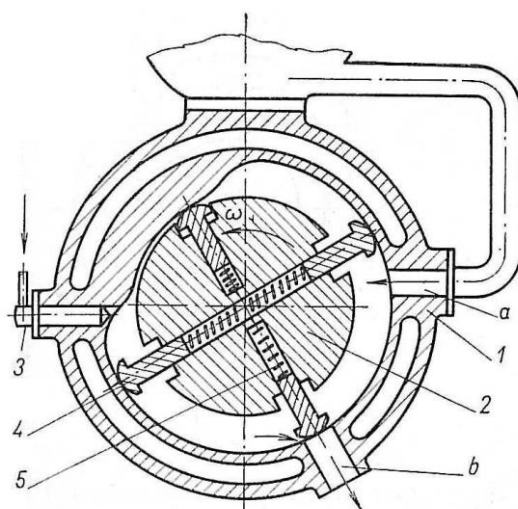
Obr. 11-25 a Obr. 11-26: Motor Fillols [19]

Nasávaná směs vzduchu a paliva je v komoře A stlačována pístem P_1 ve směru šipek do prostoru C. Přitom je uzavřeno šoupátko O_1 . Stlačená směs je přepuštěna po otevření rotačního šoupátka G do spalovacího prostoru D . Po zažehnutí expanduje a stlačuje píst P_2 . Ten zároveň vytlačuje spálené plyny prostorem E do výfuku při uzavřeném šoupátku O_2 . Způsob práce připomíná spíš činnost spalovací turbíny než pístového motoru.

Motory s klznými lištami, těsnícími lištami nebo plochami

Stejně jako v předchozích příkladech spočívá princip práce ve vytváření nebo využívání komor s proměnlivým objemem. V prostorách (komorách) dochází k termodynamické změně, nejčastěji adiabatické, přičemž je expanze plynů využita pro vytvoření točivého momentu. Protože dále uvedené systémy byly nebo jsou málo využívány v dopravě, jsou uvedeny jen ve schématech.

Patersonův motor



Obr. 11-27: Schéma Patersonova motoru [16]

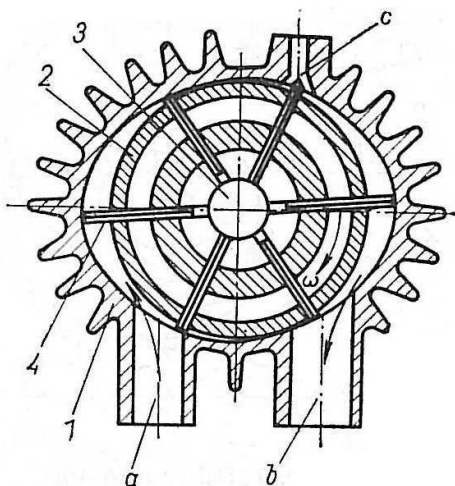
Legenda:

- 1 – skříň
- 2 – rotor
- 3 – vstřikovač
- 4 – radiální těsnicí lišta

- 5 – přitlačná pružina
- a – sací kanál,
- b – výfukový kanál

Rotom motor

Tento princip je použit k pohonu motocyklu s kompresním motorem na stlačený vzduch.



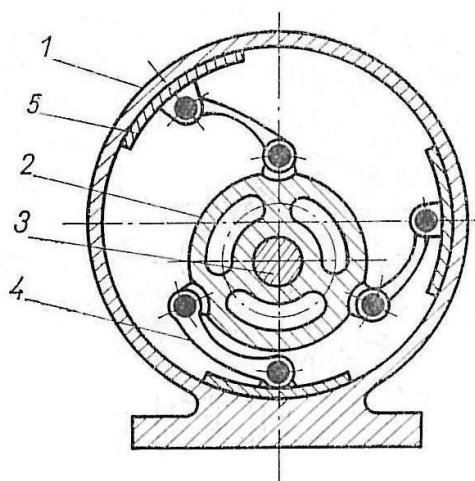
Obr. 11-28: Schéma motoru ROTOM [16]

Legenda:

- 1 – skříň
- 2 – rotor
- 3 – hřídel
- 4 – kluzné lišty

- a – sací kanál
- b – výfukový kanál
- c – zapalovací kanálek

Motor s kloubově uloženými lištami



Obr. 11-29: Schéma motoru s kloubově uloženými lištami [16]

Legenda:

1 – skříň

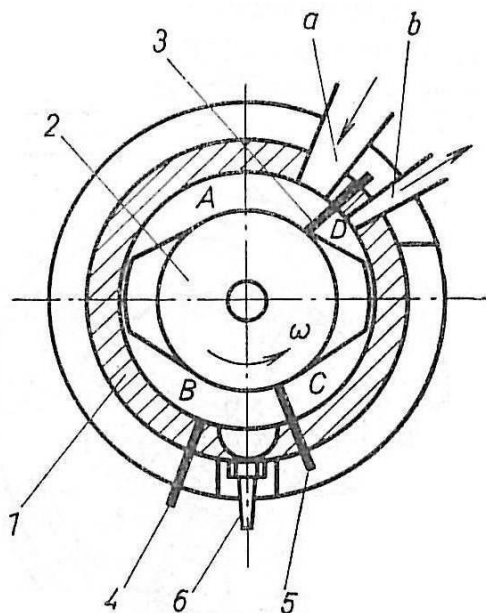
2 – rotor

3 – hřídel

4 – páka, 5 – kluzná lišta

5 – kluzná lišta

Kolettiho motor



Obr. 11-30: Schéma motoru Kolettiho [16]

Legenda:

1 – skříň

2 – rotor

3, 4, 5 – lišty

6 – zapalovací svíčka

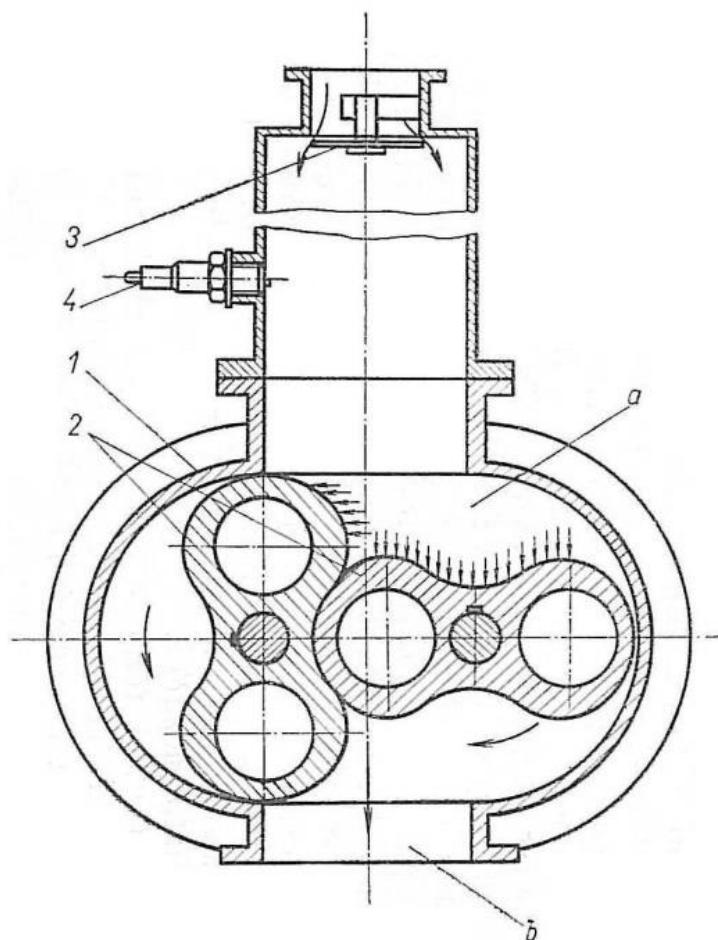
A, B, C, D – komory

a – sací kanál

b – výfukový kanál

Roots motor

Princip byl a je využíván k přepřínování konvenčních spalovacích motorů



Obr. 11-31: Použití Rootsova dmýchadla jako motoru [16]

Legenda:

1 – skříň

2 – rotory

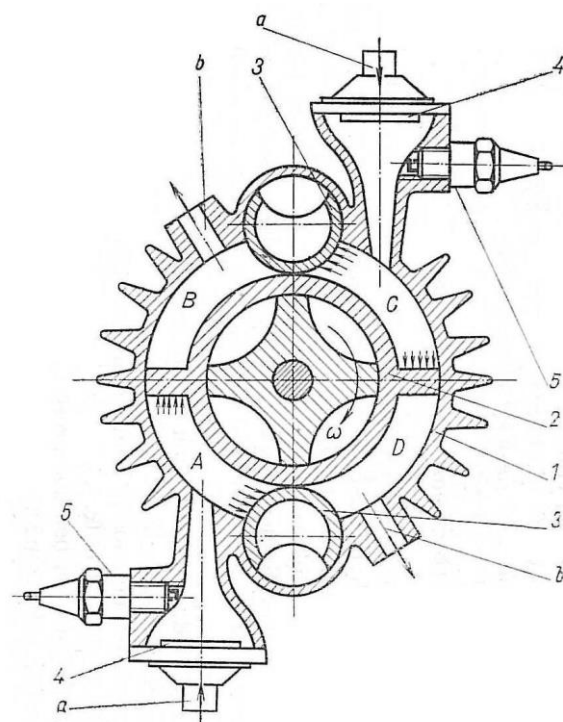
3 – sací ventil

4 – zapalovací svíčka

a – spalovací prostor

b – výfukový kanál

Gilbertův motor



Obr. 11-32: Motor Gilbertův [16]

Legenda:

1 – skříň

2 – rotor

3 – rotační šoupátka

4 – sací ventily

5 – zapalovací svíčky

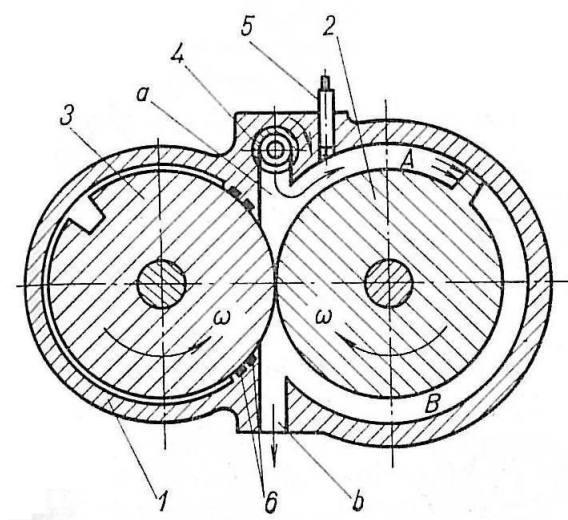
A, B, C, D – komory

a – sací kanály

b – výfukové kanály

Motory s rotačním těsnicím ústrojím

Unsinův motor



Obr. 11-33: Unsinův motor [16]

Legenda:

1 – skříň

2 – rotor

3 – těsnicí šoupátko

4 – rozváděcí šoupátko

5 – zapalovací svíčka

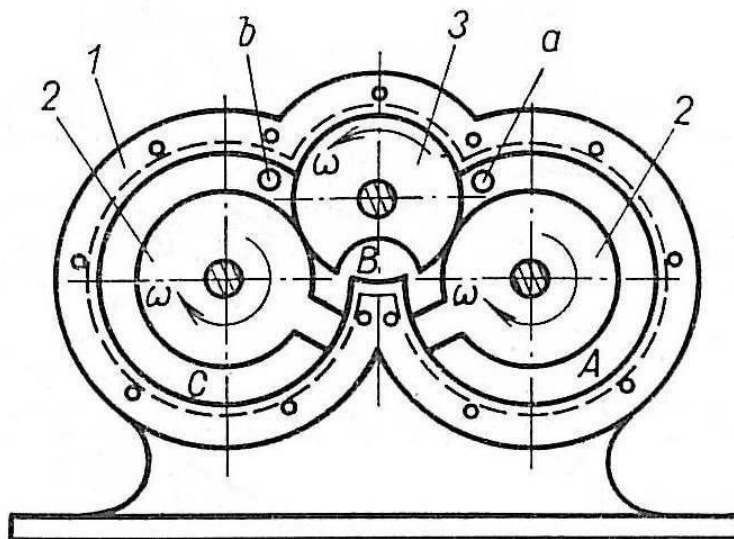
6 – těsnicí lišty

A, B, – komory

a – plnicí kanál

b – výfukový kanál

Traxlerův motor



Obr. 11-34: Motor Traxelův [16]

Legenda:

1 – skříň

2 – rotory

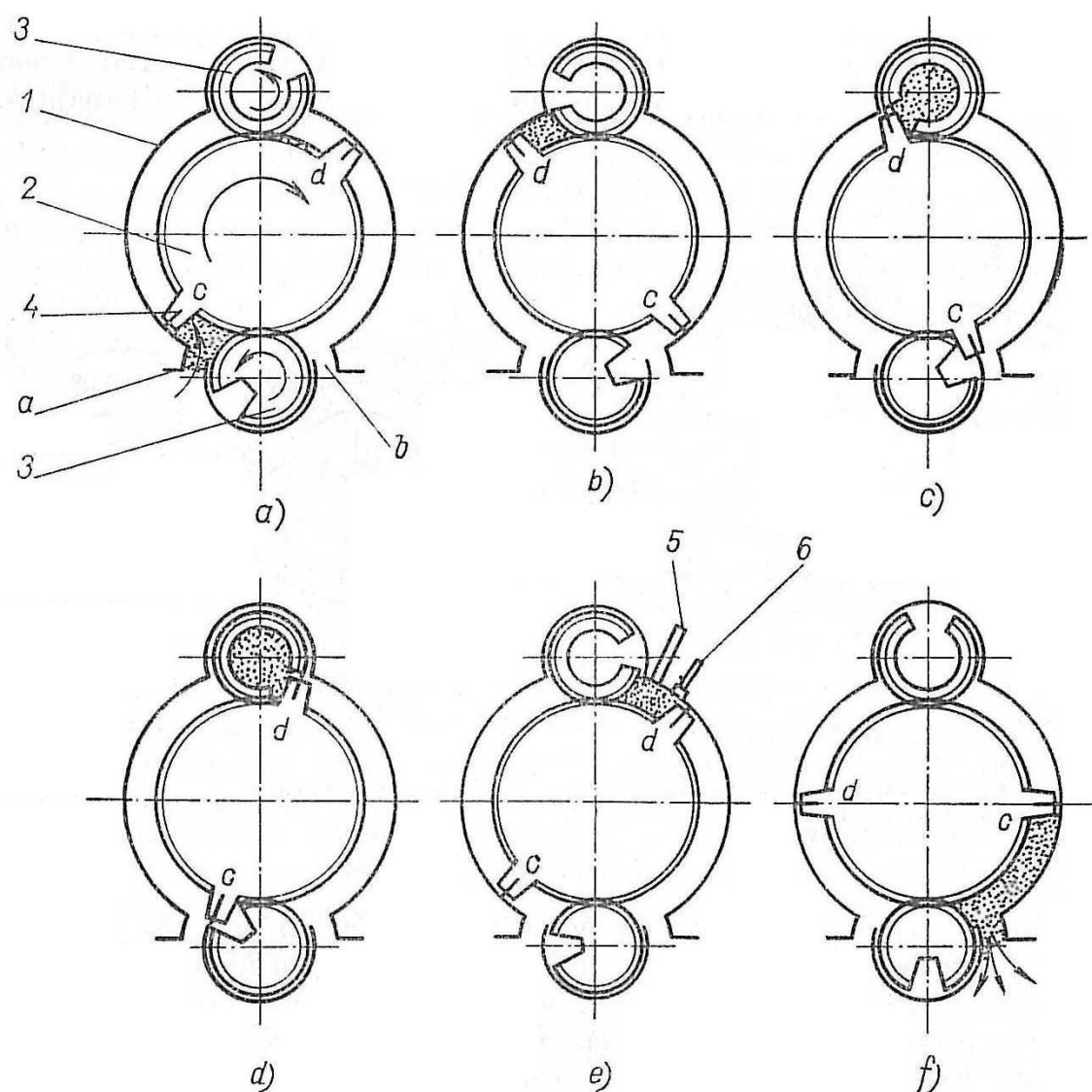
3 – šoupátko

A, B, C – komory

a – sací kanál

b – výfukový kanál

Clarkův motor



Obr. 11-35: Schéma činnosti Clarkova motoru [16]

Legenda:

- | | |
|----------------------|-----------------------|
| 1 – skříň | 6 – žhavicí svíčka |
| 2 – rotor | a – sací kanál |
| 3 – rotační šoupátka | b – výfukový kanál |
| 4 – těsnicí lišta | c, d – lopatky rotoru |
| 5 – vstřikovač | |

Legenda:

a – počátek komprese

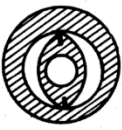
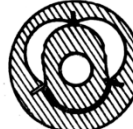
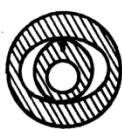
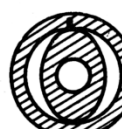
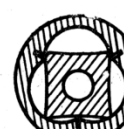
1 – rotor

b – konec komprese

2 – hřídel

11.1.3.4. Motory s krouživým pohybem pístu (s výjimkou Wankelova)

Komora s proměnlivým objemem, potřebným k uskutečnění adiabatické termodynamické změny, je zde vytvářena dvěma prostými rotačními pohyby pístu uvnitř prostoru vytvořeného některými cykloidami. Těmi mohou být trochoidy. Následující tabulka ukazuje několik možností vytváření komor s proměnlivým objemem.

Epitrochoida s vnitřní obalovou křivkou				
Schéma profilu				
Označení	$Ei\ 1:2$	$Ei\ 2:3$	$Ei\ 3:4$	$Ei\ 4:5$
i	1:2	2:3	3:4	4:5
$\delta_{\max} [^\circ]$	19,5	30	41,8	56,4
$t_{\varepsilon t}$	$\sim 140:1$	15,5:1	7,5:1	3:1
Epitrochoida s vnější obalovou křivkou				
Schéma profilu				
Označení	$Ea\ 1:2$	$Ea\ 2:3$	$Ea\ 3:4$	$Ea\ 4:5$
i	1:2	2:3	3:4	4:5
$\delta_{\max} [^\circ]$	19,5	30	41,8	56,4
$t_{\varepsilon t}$	$> 100:1$	$> 100:1$	$> 100:1$	$> 100:1$
Hypotrochoida s vnitřní obalovou křivkou				
Schéma profilu				
Označení	$Hi\ 1:2$	$Hi\ 2:3$	$Hi\ 3:4$	$Hi\ 4:5$
i	1:2	2:3	3:4	4:5
$\delta_{\max} [^\circ]$	9,6	19,5	30	41,8
$t_{\varepsilon t}$	1:1	2,7:1	5:1	10,4:1
Hypotrochoida s vnější obalovou křivkou				
Schéma profilu				
Označení	$Ha\ 1:2$	$Ha\ 2:3$	$Ha\ 3:4$	$Ha\ 4:5$
i	1:2	2:3	3:4	4:5
$\delta_{\max} [^\circ]$	9,6	19,5	30	41,8
$t_{\varepsilon t}$	1:1	1,5:1	2,2:1	2,3:1

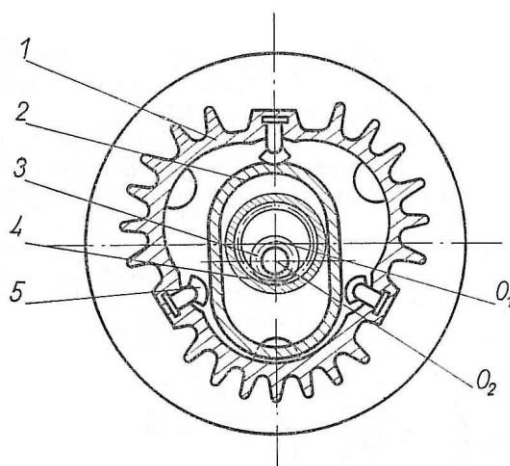
Tab. 11-5: Přehled některých parametrů variant trochoidních profilů [16]

Legenda:

- i poměr pracovních komor a těsnicích vrcholů pístu
 $\delta_{\max}$ úhel výkyvu pístu [°]. O tento úhel se vychyluje těsnicí přímka pístu od kolmice k vnitřnímu povrchu komory
 ϵ kompresní poměr

Motory pracující na tomto principu byly uplatněny v dopravních prostředcích dříve než motor Wankel.
 Uvedme některé:

Motor Cooley a motor Umpleby

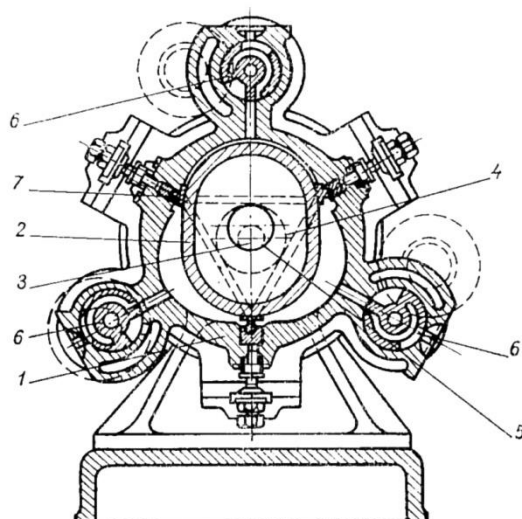


Obr. 11-38: Motor Umplebyho [16]

Legenda:

- | | |
|--|----------------------------|
| 1 – skříň | 5 – radiální těsnicí lišta |
| 2 – píst | O_1 – osa otáčení skříně |
| 3 – malé ozubené kolo spojené s pístem | O_2 – osa otáčení pístu |
| 4 – velké ozubené kolo spojené se skříní | |

Motor Grayův a Drummondův



Obr. 11-39: Motor Grayův-Drummondův [16]

Legenda:

1 – skříň

2 – píst

3 – hřídel

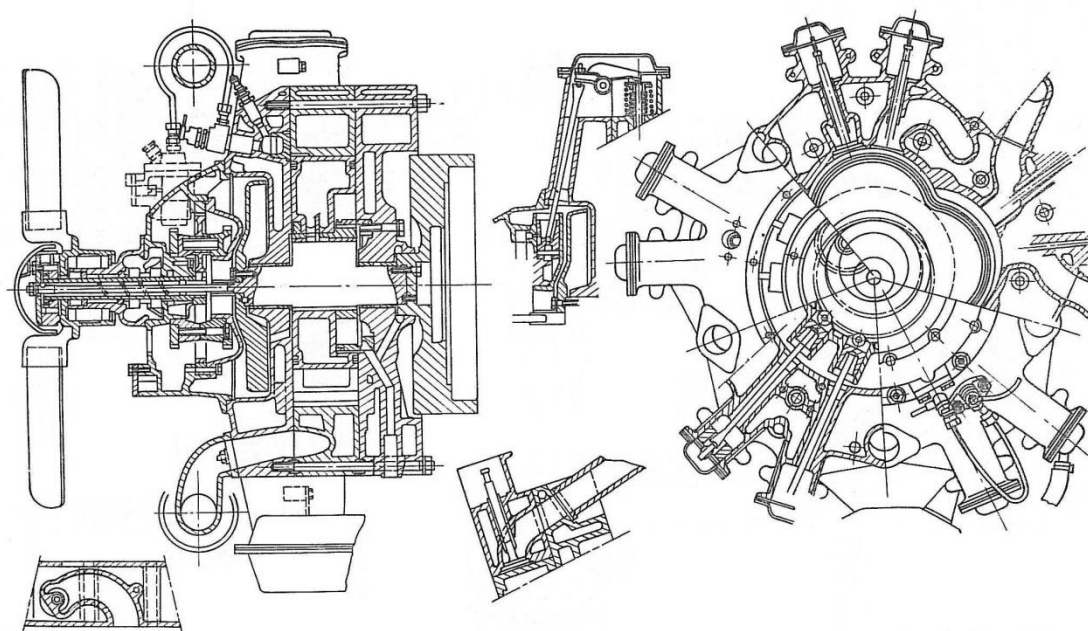
4 – pevné kolo spojené se skříní

5 – pohyblivé kolo,

6 – rotační šoupátka

7 – radiální těsnicí lišta

Motor Brilleyův – Renault

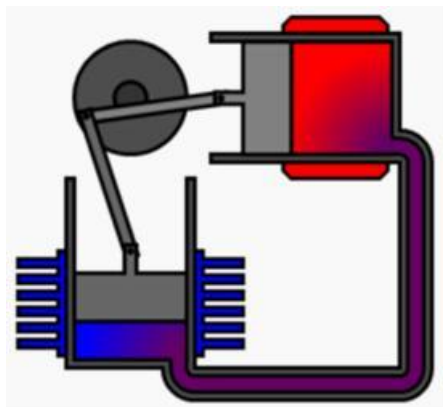


Obr. 11-40: Rotační ventilový motor Renault [16]

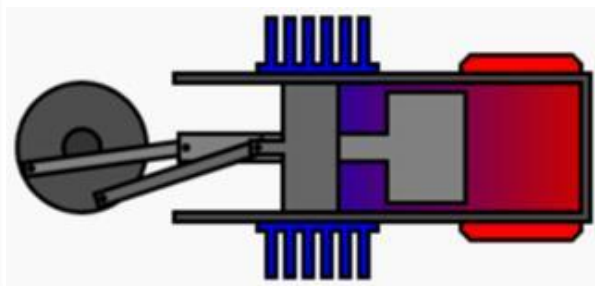
Spalovací motor s vnějším spalováním

Motory s vnějším spalováním využívají ke své činnosti expanzní vlastnosti plynů. Motory jsou uzavřené a pracují stále s jedinou náplní plynu. Nejvhodnějším plynem je helium (He), pro své fyzikální vlastnosti, zaručující vysoký interval minimálního a maximálního objemu a tlaku (měrná tepelná kapacita $c_v = 5 \text{ 193 J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, individuální plynová konstanta $r = 2 \text{ 078 J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Představitelem systémů tohoto typu je motor **Stirlingův**. Způsob práce Stirlingova motoru je patrný z obr. 11-41 a obr. 11-42.



Obr. 11-41: Stirlingův motor – typ α [20]



Obr. 11-42: Stirlingův motor – typ β [20]

Známy jsou nejméně dva typy Stirlingova motoru. Typ α je dvouválcový, u kterého je jeden válec expanzní (ohříváný) a druhý chladicí. Typ β je jednoválcový se dvěma sousedními písty, z nichž jeden je dvojčinný.

Motor pracuje tak, že ohřátý plyn v „horké“ části expanduje a stlačí pracovní píst. V této fázi je vykonána užitečná práce. Poté je plyn přetlačen (a nasán) do chladicího válce přes regenerační potrubí. Smrštěný chladný plyn je znovu přemístěn do ohřívacího válce, expanduje a děj se opakuje. Přímočarý pohyb je pomocí klikového ústrojí převeden na rotační a tento pak pohání kola dopravního prostředku.

Od doby svého vynalezení (1816 – Robert Stirling, Skotsko) byl několikrát uplatněn v dopravním prostředku, ale pro jeho malou účinnost nebylo s tímto pohonem pro silniční vozidla počítáno. Konstrukteři a vědci se v různých časových obdobích vraceli k tomuto způsobu přeměny energie a vždy účinnost mírně zvýší. Tak jsou známy systémy Gama, rotační Stirling, Quasiturbine, Ringbom, Fanchote, motor s volnými písty, plochý Stirling, ...

Hlavní výhodou Stirlingova motoru je možnost rozličných způsobů ohřevu pracovního válce včetně spalování méně kvalitních paliv jako je odpad.

Hlavní nevýhodou je nízká účinnost $\eta = 15 - 20 \%$ (je uváděno i 30 %).

Ostatní vlastnosti mohou být výhodné i nevýhodné, podle účelu, ke kterému jsou využity.

V druhé polovině 20. století byl Stirlingův motor několikrát použit v pozemních dopravních prostředcích a jeho vývoj dosud není uzavřen.

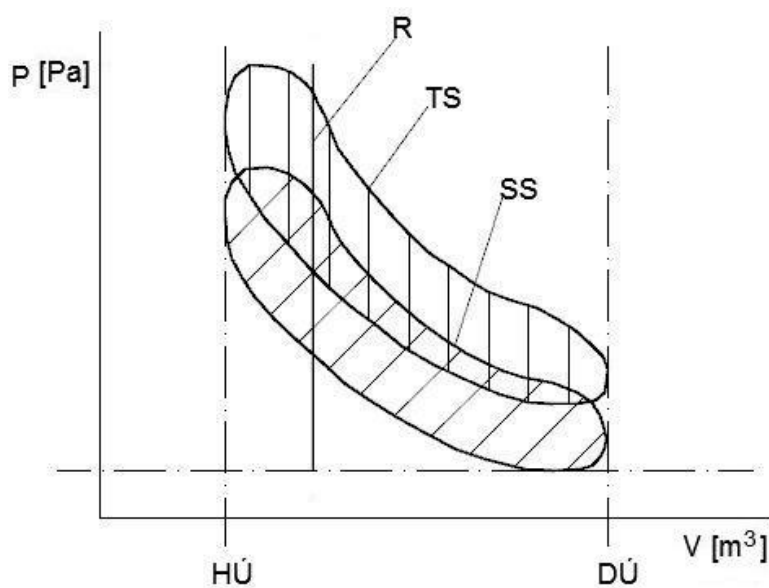
- 1974 – Ford Taunus, Ford Torino,
- 1975 – Porsche,
- 1982 – AMC Spirit (spolupráce s NASA),
- 2009 – Segway – oznámen vývoj hybridního skútru se Stirlingovým motorem.

Tepelná bilance a účinnost Stirlingova motoru

Termodynamická změna, ke které v motoru dochází, probíhá na třech místech. Těmi jsou

- TS – teplá strana (ohříváný válec),
- SS – studená strana (ochlazovaný válec),
- R – regenerátor (horký plyn teplo předává a studený přijímá).

Vyjádření termodynamické změny pomocí p - V diagramu je komplikované tím, že zatímco u TS a SS jde o změnu přibližnou adiabatickou, v regenerátoru jde o změnu izochorickou (stálý objem). Schematicky p - V diagram lze vyjádřit podle *grafu 11-11*.



Graf 11-11: p - V diagram pro Stirlingův motor typ α

Užitečná práce je potom vyjádřena jako rozdíl ploch TS – SS (při zanedbání ztrát v R).

Pozn.: Vhodnější metoda vyjádření termodynamické změny je pomocí grafu $\Theta - S$, kde

Θ poměr střední teploty pracovního plynu v motoru ku maximu této teploty [-]
 S entropie plynu [J.kg⁻¹.K⁻¹]

Užitečná práce je potom vyjádřena jako rozdíl ploch TS – SS.

Platí vztah

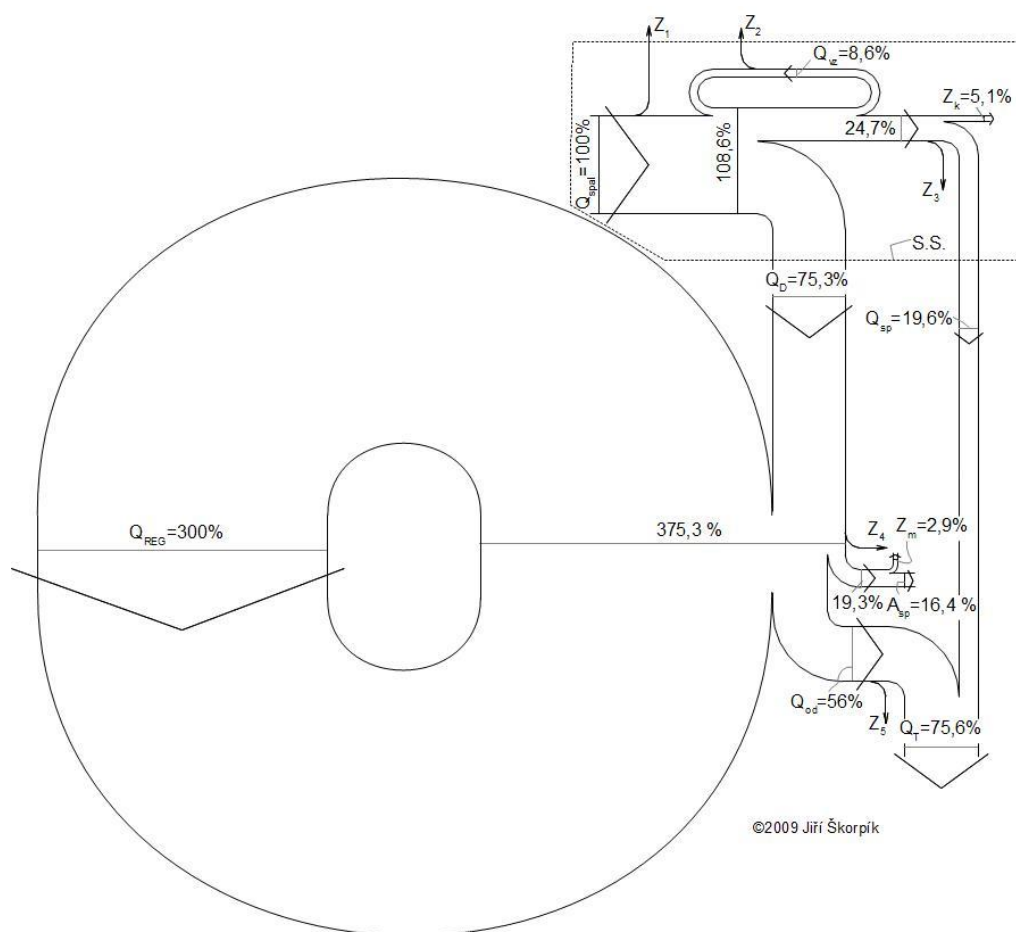
$$A = \int_{HÚ}^{DÚ} P_{TS} dV_{TS} - \int_{HÚ}^{DÚ} P_{SS} dV_{SS} \quad (11.16)$$

Samotná termodynamická účinnost lze vyjádřit vztahem

$$\eta_T = c \times \left(1 - \frac{1}{\tau}\right), \text{ kde} \quad (11.16b)$$

c Carnotův součinitel pro Stirlingův motor
 τ teplotní poměr na hranicích regenerátoru

Účinnost Stirlingova motoru lze vyjádřit pomocí Sankeyova diagramu podle *obr. 11-43*.



Obr. 11-43: Procentuální energetické toky (Sankeyův diagram) v jednotce se Stirligovým motorem při transformaci tepla uvolněného při spalování paliva [21]

Legenda:

Diagram je pro jednotku těchto parametrů: palivo biomasa; střední teplota pracovního plynu na teplé hranici regenerátoru $t_T = 490\text{ }^{\circ}\text{C}$ a studené hranici $t_S = 105\text{ }^{\circ}\text{C}$.

S.S.	hranice spalovacího systému
Q_{spal}	teplo uvolněné při spalování paliva [%]
Q_{vz}	teplo spotřebované na předehřev spalovacího vzduchu [%]
$Q_{spal-tuv}$	teplo ze spalin využité pro ohřev vody nebo vytápění [%]
Q_D	teplo sdělené pracovnímu plynu v ohřívačku [%]
Q_{reg}	množství tepla regenerovaného v regenerátoru [$J \cdot kg^{-1}_{pal}$]
Z_m	mechanické ztráty [%]
A_{sp}	práce motoru na spojce [%]
Q_{Od}	teplo odvedené z pracovního plynu v chladiči [%]
Q_{v-tuv}	teplo odvedené z jednotky (možno využít pro ohřev teplé užitkové vody) [%]
$Z_{1,2,3,4,5}$	ztráty sáláním do okolí, ztráty způsobené chlazením bloku motoru apod.
Z_k	komínová ztráta – teplo spalin odvedené do komína [%]

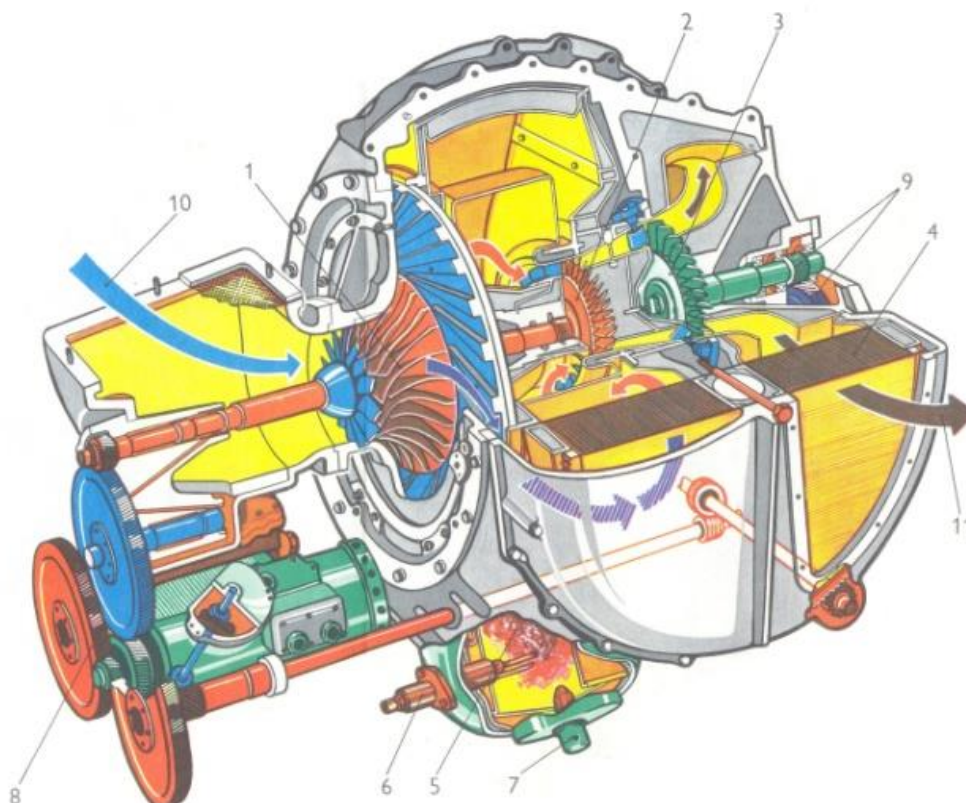
Uvedené hodnoty platí pro konkrétní kogenerační jednotku, ale lze je též zobecnit. Z grafu je patrné, že účinnost η jednotky je 16,4 %.

11.1.4. Spalovací motor s nepřerušovaným (kontinuálním) hořením

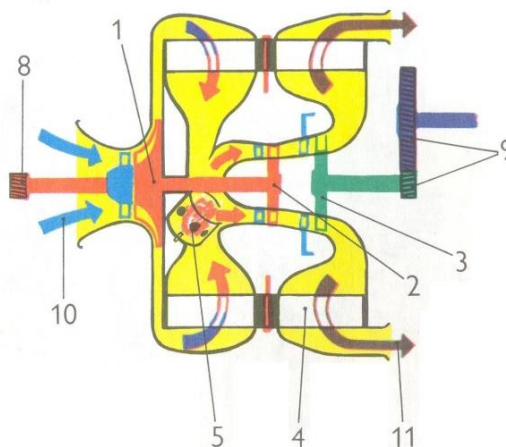
Rozeznávají jsou spalovací turbíny a reaktivní motory (rakety).

11.1.3.5. Spalovací turbína

Vnitřní energie paliv je zde přeměněna na kinetickou v nepřetržitém procesu hoření, při kterém tlak expandujících plynů působí na lopatky rotujícího hřídele. Patří tedy tento motor do skupiny rotačních. Standardně jsou používány v letecké dopravě, v pozemních dopravních prostředcích jen výjimečně. Příklad automobilové spalovací turbíny je uveden na *obr. 11-44* a *obr. 11-45*.



Obr. 11-44: Automobilová spalovací turbína

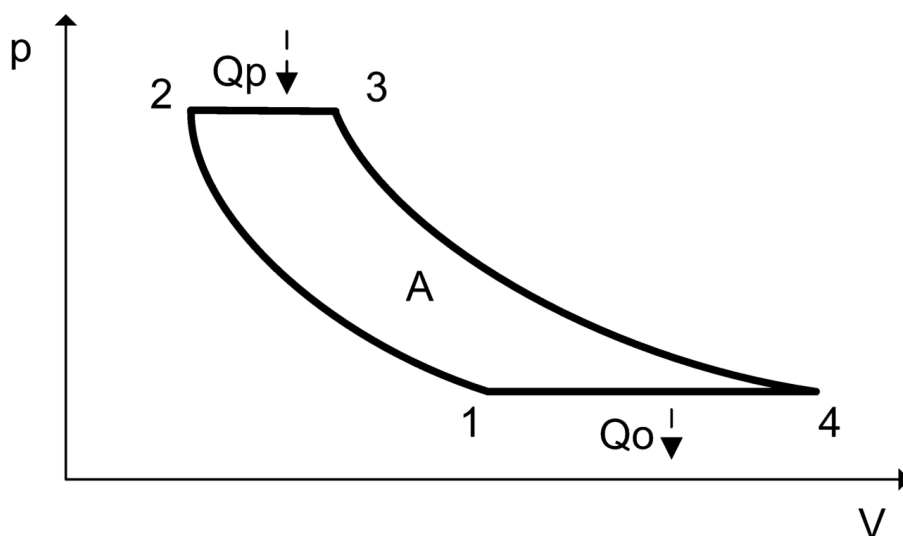


Obr. 11-45: Princip činnosti aut. spalovací turbíny [8]

Princip činnosti vyplývá ze schematu na *obr. 11-45*:

1. Kompresor, který stlačuje nasátý vzduch
2. Turbína určená k pohonu kompresoru
3. Turbína pracovní, pohánějící převody a následně kola automobilu. Točivý moment na hřídeli této turbíny nebo na hřídeli za převodem (9) je rozhodujícím parametrem motoru
4. Rotační výměník tepla, který je na jedné části ohříván spaliny (11) a na druhé straně získané teplo předává (předehřívá) nasátému vzduchu, výměník tepla zvyšuje účinnost soustavy.
5. Spalovací komora
6. Hořák (zapalovač)
7. Tryska vstřiku paliva
8. Ozubené soukolí startující turbínu
9. Převod (redukce otáček)
10. Nasávaný vzduch
11. Výfukové plyny

Termodynamická změna spalovací turbíny je zjednodušeně definována jako „Ericsson-Braytonův cyklus“ nebo nověji „Joule-Braytonův cyklus“. Vychází z principu izobarické změny a předpokládá, že spalování zde probíhá za stálého (konstantního) tlaku, protože spalovací prostor není uzavřen. p - V diagram Ericsson-Braytonova cyklu je patrný z *grafu 11-12*.



Graf 11-12: p-V diagram Ericsson-Braytonova cyklu [22]

Jednotlivé fáze Ericsson-Braytonova cyklu znázorňuje diagram vyjadřující závislost tlaku na objemu (p - V diagram). Zanesením všech čtyř fází cyklu do jednoho diagramu získáme oblast ohraničenou dvěma adiabaty a dvěma izobarami. Obsah této oblasti odpovídá práci vykonané strojem.

$$A \equiv Q_p - Q_o$$

Zobrazený oběh je „idealizován“ tak, že sestává ze dvou izobar (2-3 a 1-4) a dvou adiabat (1-2 a 3-4). Užitečnou práci lze tedy vyjádřit vztahem

$$A = \int_{V_2}^{V_1} p dV$$

a účinnost samotného procesu lze vyjádřit vztahem

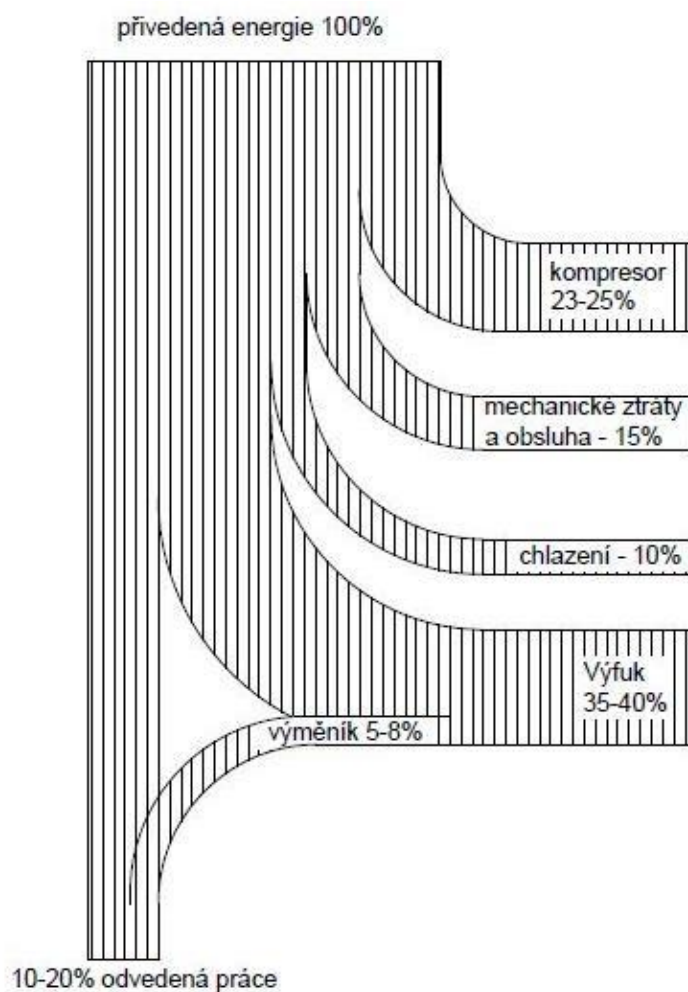
$$\eta_T = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\kappa-1}} \times 1 - \frac{1}{\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}}, \text{ kde} \quad (11.17)$$

ε kompresní poměr $\frac{V_1}{V_2}$

κ Poissonova konstanta (exponent adiabaty)

π poměr kompresoru

Účinnost spalovací turbíny vyjádřená pomocí Sankeyova diagramu je podle obr. 11-46.



Obr. 11-46: Sankeyův diagram spalovací turbíny

Parametry automobilových spalovacích turbín

V pozemních dopravních prostředcích byly spalovací turbíny použity v lokomotivách nebo automobilech. V literatuře se uvádí 18 prototypů lokomotiv v Evropě.[23]

Automobilky uvádějí následující prototypy nebo nulté série.

značka	rok	$P_{\max}/n$ [kW/min ⁻¹]	M_t [N.m]	$v_{\max}$ [km.h ⁻¹]	pozn.
ROVER JET1	1950	-/50000		140	
FIAT Turbine	1954	221/22000		250	
GM	1953-9	272/-		> 161	hybrid
GM EV1	1993	40/-		128	
GM/JaY Leno	2006	478/-		-	
Chrysler/Plymouth	1954	75/-		-	
Chrysler Turbine	1964	79/44500	576		
Toyota GT45	1975			160	hybrid
Toyota 800 Turbine	1979	22/-			hybrid
Toyota GTV	1987	110/-	333		
Volvo	1992			180	hybrid
Jaguar C-X75	2010	572/-	1600	300	hybrid
Ford 707	196-.	250/-		110	
KENWORD BOEING	1950				
MAN	1956	270/...			
NISSAN	-				
BELAZ (SSSR)	-				

Tab. 11-6: Přehled prototypů a nultých sérií spalovacích turbín.

Výhody spalovacích turbín

- Klidný chod díky rotačnímu pohybu mechanismů. Absence volných nevyvážených sil.
- Hmotnostní výkon.

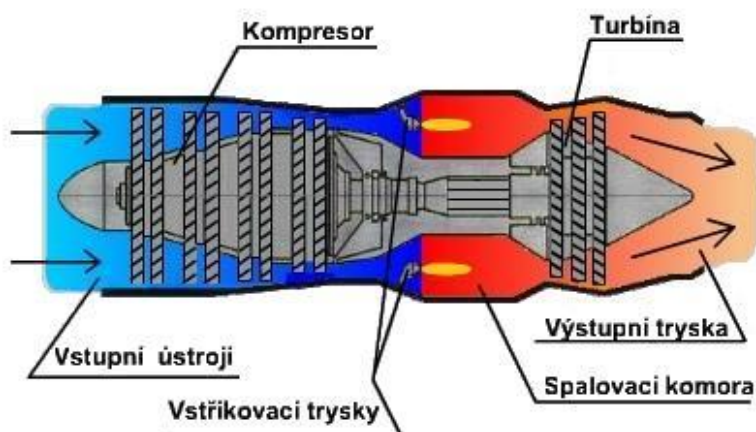
Nevýhody spalovacích turbín

- účinnost $\eta < 20 \%$,
- exhalace nad limity EURO.

11.1.3.6. Reaktivní motory

Reaktivní motory, pro které se ujal název raketa, pracují na principu reakce síly, vzniklé dynamikou prudce hořících a expandujících plynů. Motory jsou též označovány jako náporové.

Princip činnosti je patrný z obr. 11-47.



Obr. 11-47: Schema reaktivního motoru [24]

V pozemní dopravě bylo v minulosti učiněno několik pokusů o využití tohoto typu motoru, ale všechny projekty byly zastaveny jako neperspektivní. V kosmické dopravě je tento způsob využíván. Jeden z pokusů je uveden na *obr. 11-48*.



Obr. 11-48: Opel Rakete [25]

11.2. Elektromotor

Elektromotor představuje systém přeměny energie na kinetickou s vysokou účinností. Jeho masivního použití v pozemní dopravě brání dosud některé nevýhody. Snaha o jejich řešení vede k rozmanitým konstrukcím dopravních prostředků – elektromobilů, které kombinují více způsobů přeměny energie nebo její akumulace. Je tedy nezbytné nejprve uvést několik pojmů a definic, které popisují strukturu vozidel využívajících elektrickou energii.

11.2.1. Základní pojmy a legislativa spojená s elektroenergií v dopravě

Elektricky poháněná silniční vozidla – terminologie (výpis z ČSN EN 13447) [26]

Definice: Elektromobil je vozidlo, ve kterém je el. energie měněna na mechanickou k trakčním účelům (kinetickou) prostřednictvím elektrického motoru

Typy elektrického pohonu silničních vozidel

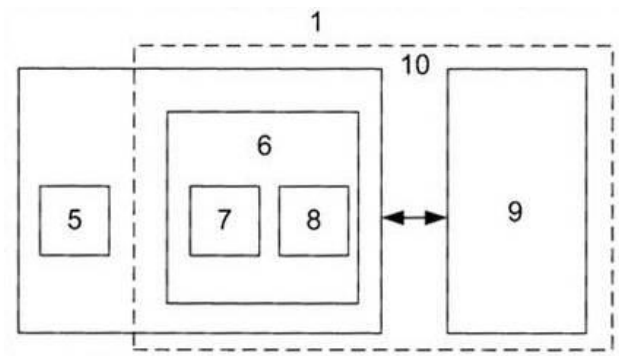
- Elektricky napájené silniční vozidlo (elektrina vstupuje z vnějšího zdroje – např. trolejbus).
- Výhradně elektrické silniční vozidlo (výhradně el. pohon s nezávislým zásobníkem na palubě, viz *obr. 11-49*).
- Hybridní vozidlo (dva nebo více zdrojů energie).
- Hybridní elektrické vozidlo (elektrický pohon).
- Hybridní elektrické vozidlo s tepelným motorem (jedním ze zdrojů je spalovací motor).
- Elektrické vozidlo výhradně s palivovými články (zdrojem energie jsou palivové články).
- Hybridní el. vozidlo s palivovými články (kombinace zdrojů energie – jedním jsou palivové články).
- Sériové hybridní el. vozidlo (viz *obr. 11-50*).
- Paralelní hybridní vozidlo (viz *obr. 11-51*).
- Dělené hybridní el. vozidlo s tepelným motorem.

- Paralelní hybridní el. vozidlo s tepelným motorem.
- Sériové hybridní el. vozidlo s tepelným motorem.
- Vozidlo nabíjené z vnějšku.
- Vozidlo nenabíjené z vnějšku.

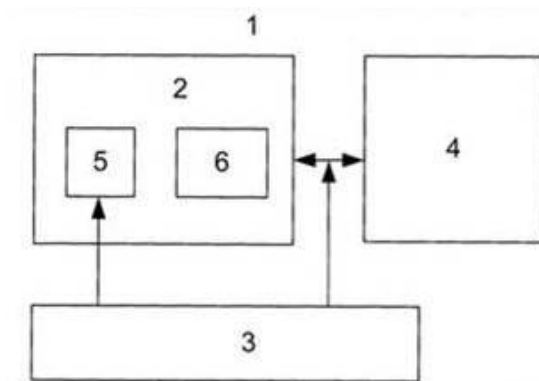
Jízdní režimy

- Výhradně elektrický režim,
- výhradně tepelný režim u hybridních el. vozidel se spalovacím motorem,
- hybridní režim.

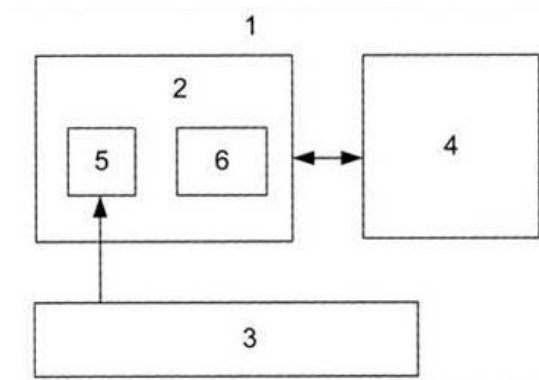
Schematické znázornění



Obr. 11-49: Elektrický trakční systém [26]



Obr. 11-50: Hybridní trakční systém sériového hybridního el. pohonu [26]

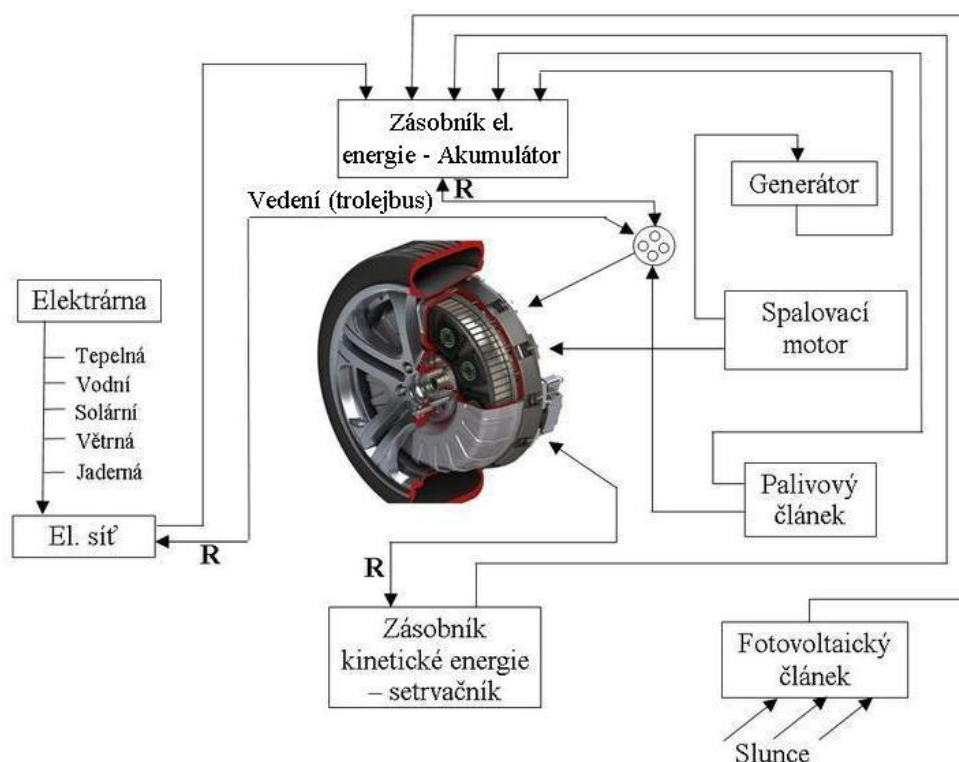


Obr. 11-51: Hybridní trakční systém paralelního hybridního el. pohonu [26]

Legenda:

- 1) Elektrický trakční systém
- 2) Elektrický výkonový rozvod
- 3) Doplnkové zdroje jiných druhů energie
- 4) Palubní sekundární zdroje el. energie
- 5) Převod
- 6) Elektrický pohon
- 7) Elektrický motor
- 8) Řízení elektrického výkonu
- 9) Palubní zdroj el. energie
- 10) Výkonový obvod

Elektricky poháněná silniční vozidla – zdroje el. energie



Obr. 11-52: Zdroje energie pro trakční elektromotor

Legenda:

R – Rekuperace

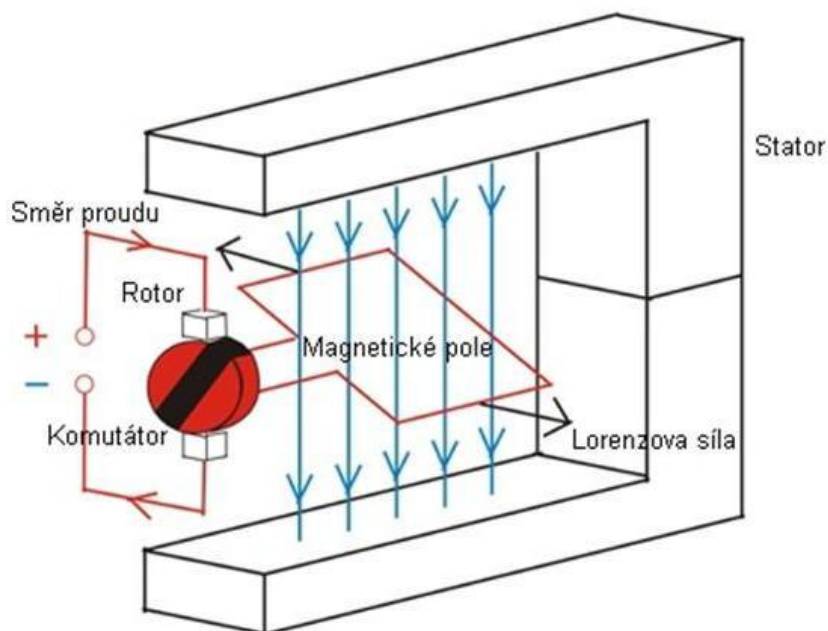
Elektricky poháněná silniční vozidla – režim přeměny energie

- Motorický režim – zařízení odebírá el. energii a přeměňuje ji na kinetickou. Účinnost $\eta > 90\%$.
- Režim el. rekuperace – zařízení odebírá kinetickou energii a přeměňuje ji na elektrickou. Tuto vrací do sítě nebo ukládá do zásobníku (akumulátor). Účinnost $\eta \approx 90\%$.
- Režim mechanické rekuperace – zařízení odebírá kinetickou energii a přeměňuje ji na elektrickou. Tuto ukládá do zásobníku kinetické energie (setrvačnick). Účinnost $\eta \approx 70\%$.
- Režim „maření energie“, resp. režim brzdy – zařízení odebírá kinetickou energii a přeměňuje ji na teplo.

11.2.2. Elektromotor – princip činnosti

Elektromotor je zařízení schopné měnit el. energii na kinetickou. Zařízení je schopné provádět i opačnou změnu, tedy měnit kinetickou energii na elektrickou. Takový proces je rekuperace energie a pro zařízení používáme výraz dynamo nebo alternátor.

Princip činnosti elektromotoru je patrný z obr. 11-53.



Obr. 11-53: Princip činnosti elektromotoru [27]

Na vodič, který je v magnetickém poli, působí síla F . Platí vztah

$$F = B \cdot I \cdot l, \text{ kde} \quad (11.18)$$

F	síla (Lorentzova síla) [N]
B	magnetická indukce [T]
I	el. proud [A]
l	délka vodiče v magnetickém poli [m]

Pokud je vodič uložen na rotujícím prvku (rotor), způsobí síla jeho rotační pohyb a vytvoří točivý moment M_t . Má-li elektromotor pracovat jako dynamo (stejnoseměrný proud) nebo alternátor (střídavý proud), pak v magnetickém poli, ve kterém se pohybuje (rotuje) vodič, vzniká ve vodiči napětí podle vztahu

$$U = B \cdot l \cdot v, \text{ kde} \quad (11.19)$$

U	napětí [V]
B	magnetická indukce [T]
l	délka vodiče v magnetickém poli [m]
v	rychlost vodiče [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

Pozn. 1: Vztah platí pro kolmé působení siločar na vodič.

Pozn. 2: Jsou známy i jiné principy činnosti (elektrostatické, lineární, piezoelektrické).

11.2.3. *Elektromotor – parametry*

Točivý moment M_t je vyvolán silou F (vztah 11.18) působící tangenciálně na efektivním poloměru rotoru R . Efektivní poloměr je rozměr od středu (osa rotoru) k „těžišti“ rotorového vinutí. Platí vztah

$$M_t = F_C \cdot R, \text{ kde} \quad (11.20)$$

M_t	točivý moment [N.m]
F_C	celková síla [N]
R	efektivní poloměr [m]

Pro výkon platí vztah

$$P = M_t \cdot \omega, \text{ kde} \quad (11.21)$$

P	výkon [W]
M_t	točivý moment [N.m]
ω	úhlová rychlost rotoru [rad.s ⁻¹]

11.2.4. *Elektromotor – konstrukce*

Elektromotorů vhodných pro elektromobily je více druhů. Každá konstrukce má své výhody a nevýhody. Základní dělení může být podle druhu napájecího proudu provedeno takto:

Elektromotory napájený stejnosměrným proudem

- sériové – mají vinutí statoru a kotvy zapojenou za sebou (sériově),
- derivační – mají vinutí statoru a kotvy zapojené vedle sebe (paralelně),
- kompaundní – mají dvojí vinutí statoru – za sebou i vedle sebe.

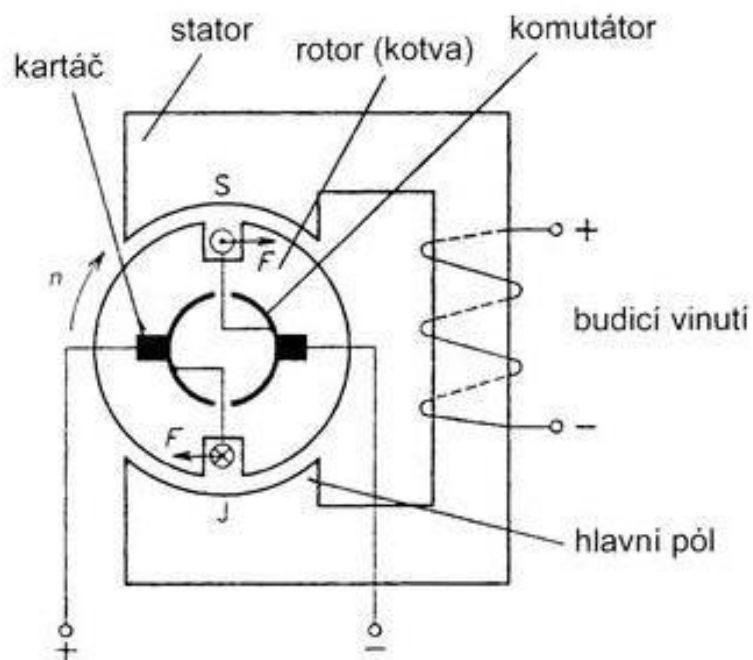
Elektromotory napájený střídavým proudem

- synchronní – otáčky rotoru jsou shodné s rychlostí obracení magnetického pole,
- asynchronní – otáčky rotoru se zpožďují za obrátkami magnetického pole.

Konstrukce elektromotorů se dále liší mnoha specifikacemi. Rozeznávají tak jsou např. motory transversální, regulační, tandemový, bez kartáčů, kroužkový, indukční, komutátorový, repulsní, jedno- nebo třífázové. Pro potřeby této publikace postačí uvedené rozdělení.

11.2.4.1. *Elektromotor na stejnosměrný proud*

Konstrukce motoru je patrná z obr. 11-54.



Obr. 11-54: Principiální schéma stejnosměrného motoru [28]

Legenda:

S, J – polarita hlavních pólů

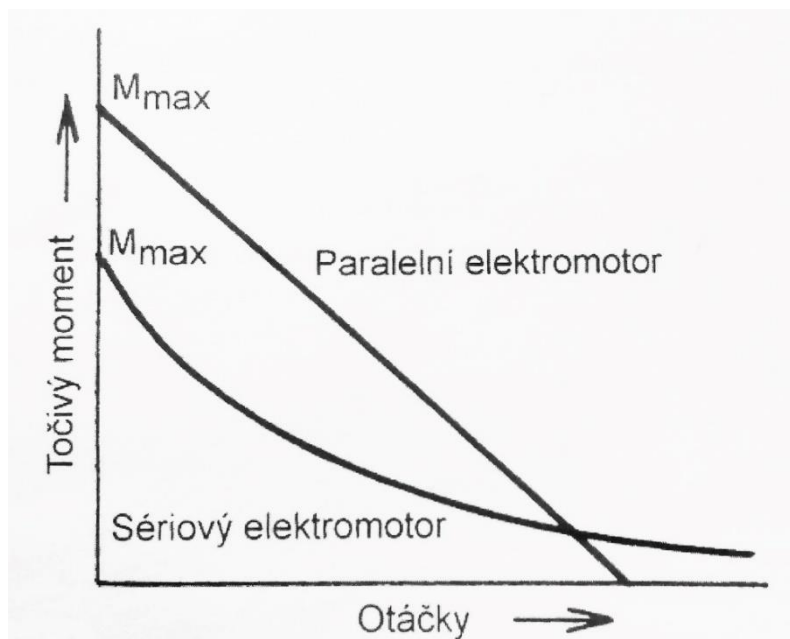
F – síla vytvářející točivý moment a rychlost otáčení n

Po zapojení budicího obvodu el. magnetu je vytvořeno magnetické pole mezi póly S a J a rotor je otáčen momentem $F \cdot r$, kde r je střední poloměr svazku vinutí na rotoru.

Konstrukce se dále vyznačuje následujícími znaky:

- vinutí je na statoru i rotoru,
- komutátor převrací proud do kostry, aby rotovala stále stejným směrem,
- regulace otáček je prováděna změnou napětí kotvy U nebo moderněji s využitím elektroniky změnou proudu kotvy či pole,
- účinnost $\eta > 90 \%$,
- přetížení je možné krátkodobě až 100% , dlouhodobě 20% ,
- možnost napájení přímo z akumulátoru,
- otáčky omezeny na cca $7\,000 \text{ min}^{-1}$.

Průběh M_t stejnosměrného motoru je patrný z grafu 11-13.

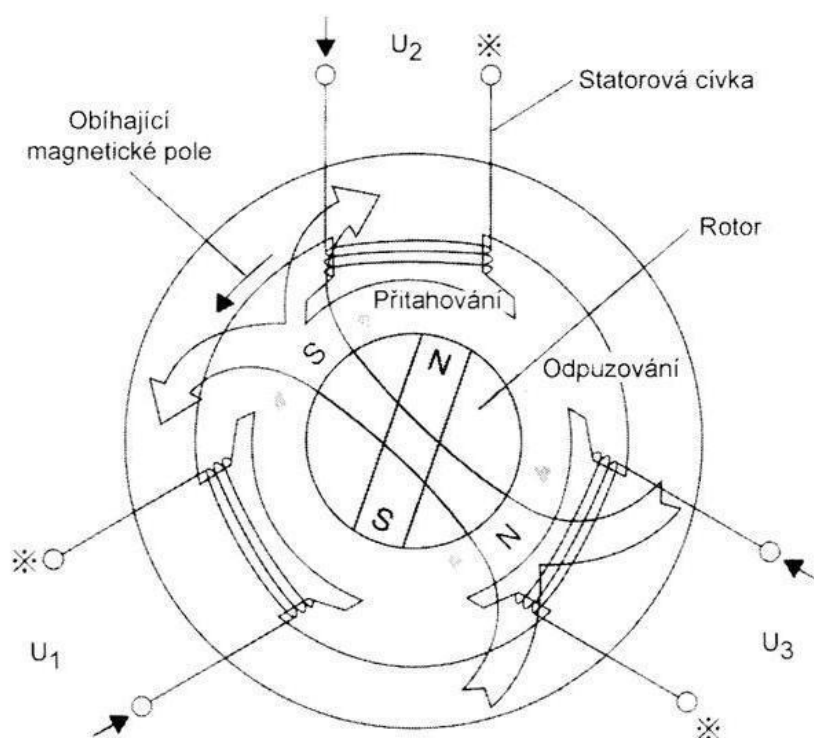


Graf 11-13: Charakteristiky paralelního a sériového stejnosměrného elektromotoru [28]

Zatímco paralelní motor má nejvyšší M_t hned po zapojení, u sériového je tento o něco nižší. Ve vyšších otáčkách se tato výhoda ztrácí.

11.2.4.2. Elektromotor na střídavý proud

Konstrukce je patrná z obr. 11-55.



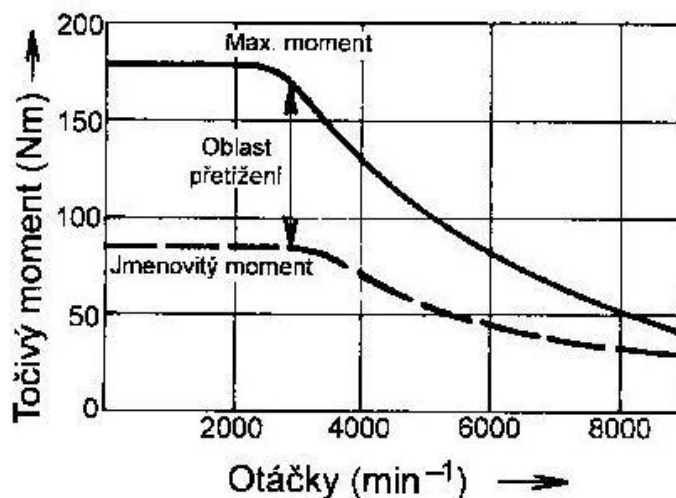
Obr. 11-55: Synchronní motor s permanentním buzením [28]

Permanentní (stálé) magnetické pole rotoru je na jedné straně odpuzováno a na druhé přitahováno silou F .

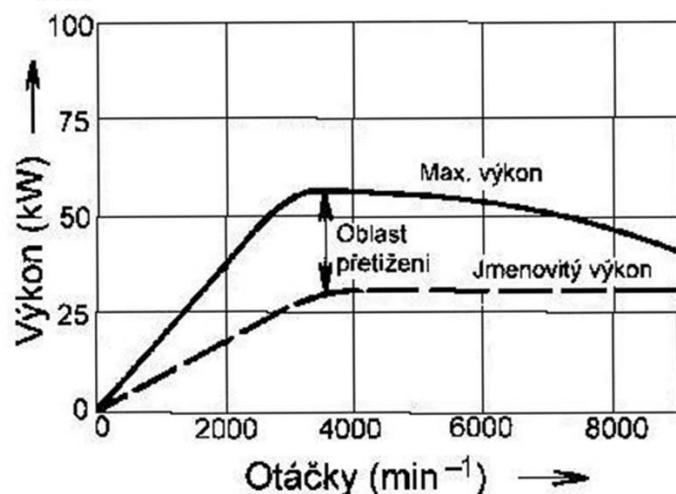
Konstrukce uvedeného typu střídavého motoru se vyznačuje následujícími prvky a vlastnostmi:

- vinutí kotvy (rotoru) a komutátor odpadá,
- stejnosměrný proud napájecích akumulátoru musí být změněn na střídavý,
- účinnost $\eta > 90 \%$,
- otáčky možné 15 – 20000 1/min^{-1} ,
- přetížení možné v nízkých otáčkách až 50 %.

Průběh M_t a P v závislosti na otáčkách je patrný z následujících dvou grafů.

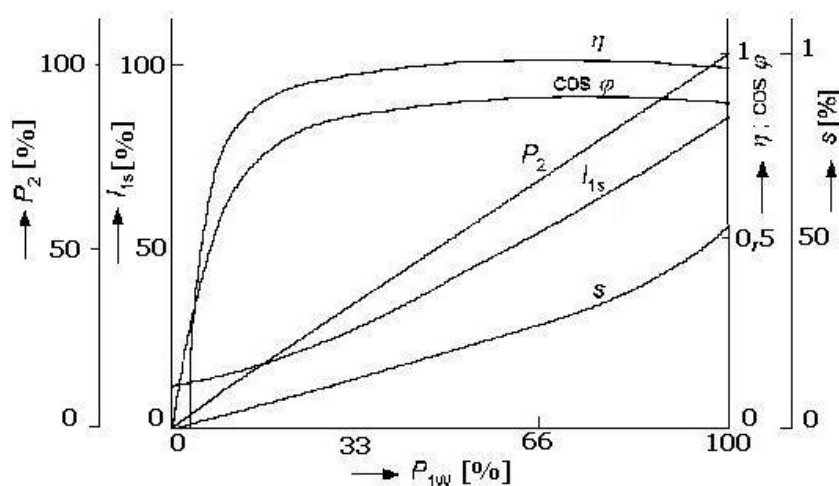


Graf 11-14: Typický průběh točivého momentu synchronního elektromotoru [28]



Graf 11-15: Typický průběh výkonu synchronního elektromotoru [28]

Průběh některých parametrů elektromotoru je závislý na jiných. Závislost jednotlivých parametrů na příkonu (P_{1w} = činný příkon) je patrná z grafu 11-16.



Graf 11-16: Typická zatěžovací charakteristika indukčního motoru (12 MW, 6 kV) [28]

Legenda:

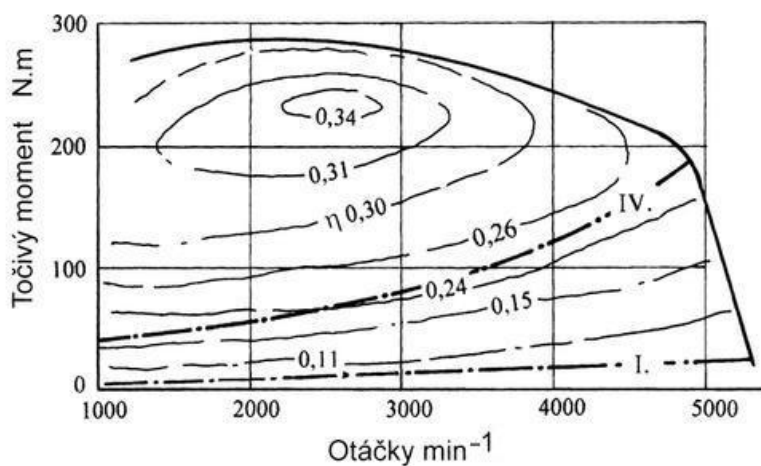
P_2 výkon
 η účinnost
 $\cos \varphi$ účiník
 I_s satorový proud
 s skluz

Ze zátěžové charakteristiky vyplývá:

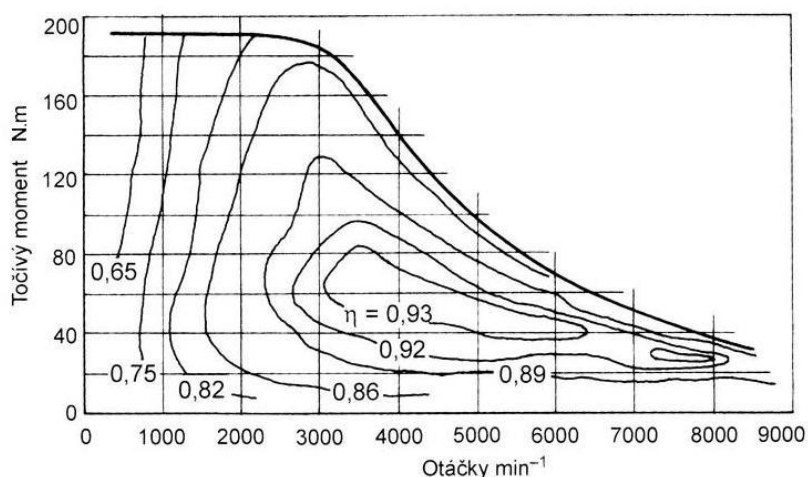
- Účinnost η roste strmě od nenulové hodnoty a již od cca 20 % příkonu dosahuje vysoké hodnoty. Účinnost přesahuje 90 % takřka ve 4/5 průběhu příkonu.
- Účiník $\cos \varphi$ vyjadřuje podíl účinného a zdánlivého výkonu. Závisí na fázovém posunu proudu a napětí ($\cos \varphi$). Je téměř ekvidistantou účinnosti.
- Průběh výkonu P_2 naznačuje lineární závislost.
- Satorový proud I_s je vhodný prostředek regulace.

11.2.5. Porovnání účinnosti elektromotoru a spalovacího motoru

Oba motory se liší účinností. Z následujících grafů je možno posoudit rozdíly.



Graf 11-17: Pole účinností spalovacího motoru [28]



Graf 11-18: Pole účinností elektromotoru [28]

Účinnost obou typů motoru je porovnána v závislosti na otáčkách motoru a točivém momentu. U spalovacího motoru byly hodnoty získány z úplné charakteristiky na motorové brzdě, u elektromotoru měřením příkonu a výkonu pomocí napětí a proudu pro různá zatížení.

Z porovnání obou polí vyplývá výrazná výhoda elektromotoru jak v účinnosti, tak v průběhu točivého momentu.

Pozn.: Uvedené grafy nezahrnují účinnost přeměny energie na elektrickou. K objektivnímu porovnání je nezbytná analýza celého procesu energetických přeměn. Výhodní se jeví analýza WTW.

11.2.6. Energetická analýza elektromobilu

Jak vyplývá z ČSN EN 13447, mohou být elektricky poháněná silniční vozidla charakterizována více způsoby. Pokud jde o kombinaci pohonů (např. hybridní vozidla), je nutné při analýze zohlednit vlastnosti dvou, nebo více způsobů přeměny energie na kinetickou.

Energie potřebná k překonání jízdních odporů zjištěných podle metody uvedené v *kap. 8. Hodnota jízdních odporů* bude analyzována stejnou metodou jako v případě vozidla se spalovacím motorem (viz *kap. 10. Příklad výpočtu energetické náročnosti*).

Při zjišťování jízdních odporů elektromobilu je třeba brát v úvahu následující možné rozdíly:

- **Odpor vnitřního tření**, definovaný jako účinnost mechanismů η , bude u elektromobilu nižší a účinnost tedy vyšší. Podle různých konstrukcí se tato účinnost pohybuje v rozmezí 75 – 95 %. Konstrukce s elektromotorem v kole vozidla i více.
- **Hmotnost m** [kg] a z ní tíha G [N] může být rozdílná podle toho, jde-li o elektromobil se zásobou energie na palubě nebo vně vozidla. Hmotnost elektromobilu s akumulátory bývá větší.
- **Odpor zrychlení** O_z je u elektromobilu nižší, zejména pokud je elektromotor konstruován v kole vozidla. V elektromobilu zpravidla není urychlováno tolik rotačních částí jako ve vozidle se spalovacím motorem.

11.2.6.1. Příklady energetické analýzy elektromobilu

Výpočet výkonu elektromobilu

Vypočtete skutečný příkon elektromotoru pro pohon vozidla. Parametry motoru (údaj na štítku výrobce) jsou:

- střídavý elektromotor třífázový,
- jmenovité napětí $U = 400 \text{ V}$,
- jmenovitý proud $I = 161 \text{ A}$,
- $\cos \varphi = 0,945$.

Výpočet:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ [W]} \quad (11.22)$$

$$P = 1,73 \cdot 400 \cdot 161 \cdot 0,95 = 105 \text{ kW}$$

Pozn. 1: Veličina SQRT pro třífázový motor je $\sqrt{3} = 1,73$.

Pozn. 2: Výpočet platí pro nepřetížený provoz.

Výpočet rychlosti elektromobilu

Vypočtěte rychlost elektromobilu s momentem o výkonu 105 kW (podle odst. a). Parametry vozidla jsou shodné s příkladem z kap. 10.1.

- tíha $G = 10 \text{ kN} = 10\,000 \text{ N}$,
- součinitel odporu vzduchu $c_x = 0,5$,
- hustota vzduchu $\rho = 1,25 \text{ kg.m}^3$,
- čelní plocha vozidla $S_x = 1,6 \text{ m}^2$,
- součinitel valivého odporu $f = 0,03$,
- účinnost mechanismů $\eta = 0,9$.

Vozidlo jede v rovině rovnoměrnou rychlostí (nezrýchluje) za bezvětří.

Výpočet:

Pro určení maximální rychlosti vozidla jedoucího rovnoměrnou rychlostí v rovině podle výkonu platí vztah

$$P = O_C \cdot v \text{ [W]}, \text{ kde} \quad (11.23)$$

O_C celkový odpor vozidla [N]

v rychlost vozidla [m.s^{-1}]

Protože při rovnoměrné rychlosti v rovině za bezvětří je celkový odpor součtem odporu valení O_f a odporu vzduchu O_v zvýšením o účinnost η platí

$$P = \frac{O_f + O_v}{\eta} \cdot v \quad (11.24)$$

Hodnoty seřadíme do *tab. 11-7*:

v	0	10	20	30	40	50	60	70	[m.s ⁻¹]
$\frac{O_v + O_f}{\eta}$	0,31	0,39	0,56	0,83	1,22	1,72	2,33	3,05	[kN]
P	0	3,9	11,2	24,9	48,8	86,0	139,8	213,5	[kW]

Tab. 11-7

Interpolací funkce výkonu v závislosti na rychlosti bychom určili, že vozidlo s elektromotorem o výkonu 105 kW by za daných podmínek vyvinulo rychlost cca 54 m.s⁻¹, tj. 194,4 km.h⁻¹.

11.2.6.2. Měření spotřeby elektromobilu

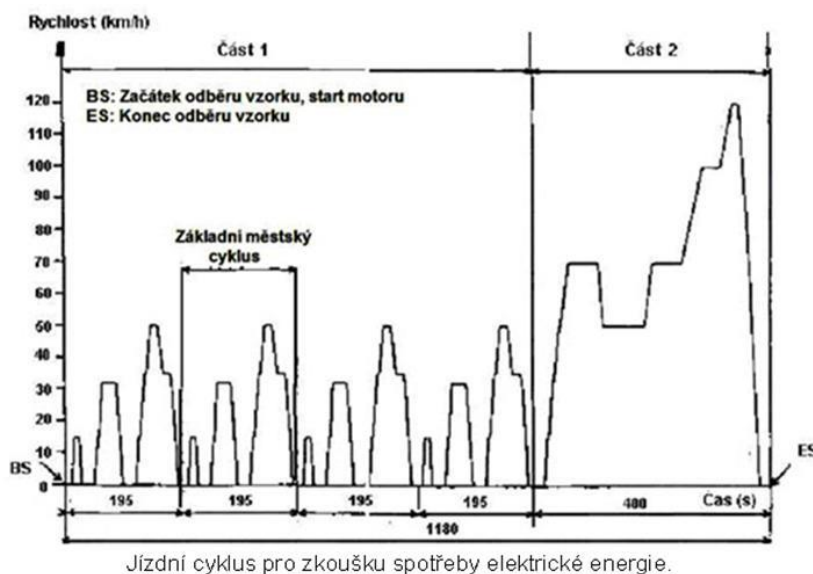
Metoda měření spotřeby elektromobilu je legislativně určena předpisem EHK č. 101. Podle této metody jsou elektromobily schvalovány (homologovány). Uvedený předpis zahrnuje i metody pro neelektrická vozidla a hybridní vozidla.

Podmínky zkoušky

- Stav vozidla odpovídá technickým podmínkám výrobce. Kontrolují se: hmotnost, stav a huštění pneu, viskozita olejů, stav tachometru.
- Hmotnost vozidla pohotovostní (ISO MO6) + 100 kg (řidič daného vozidla + závaží).
- Teplota okolí 20 – 30 °C.
- El. příslušenství, které není nezbytné pro jízdu, je vypnuté.
- Vozidlo a zásobníky el. energie musí před zkouškou během sedmi dnů ujet nejméně 300 km.

Postup zkoušky

- Počáteční nabití (doplnění) zásobníků energie. Před nabíjením jsou zásobníky vybity. Nabíjení probíhá předepsanou metodou.
- Projetí dvou jízdních cyklů v průběhu čtyř hodin. Jízdní cyklus odpovídá grafu 11-19. Jízda se uskuteční na vozidlovém dynamometru, jehož setrvačná hmotnost je nastavena podle hmotnosti vozidla.



Graf 11-17: Jízdní cyklus pro zkoušku spotřeby elektrické energie [7]

- Nabití zásobníku energie. Zásobníky se nabíjejí připojením na zařízení (sít') k tou určenému. Nabíjecí energie E a doba nabíjení je měřena. nabíjení započne do 30 minut po ukončení jízdních cyklů a ukončí se do 24 hodin po zapojení.
- Výpočet spotřeby energie.

Spotřeba el. energie se vypočte podle vztahu

$$C = \frac{E}{D}, \text{ kde} \quad (11.25)$$

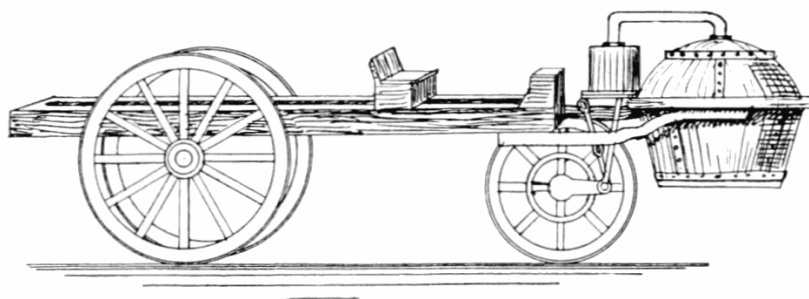
C	spotřeba el. energie [Wh/km]
E	el. energie potřebná k nabití akumulátoru [Wh]
D	ujetá dráha [km]

11.3. Parní motor

11.3.1. Historie

Zařízení přeměňuje tepelnou energii vodní páry na kinetickou.

Parní motor (parní stroj) je považován za historicky první prostředek motorizace dopravy. Vynález je (ne zcela právem) připisován Jamesi Wattovi (1765). James Watt se zasloužil o zdokonalení tohoto stroje a zejména o jeho vědecký popis. První dopravní prostředek poháněný parním motorem je připisován Nicolasi Josephu Cugnotovi (1769). Je to vůbec první doložený dopravní prostředek s motorickým pohonem.



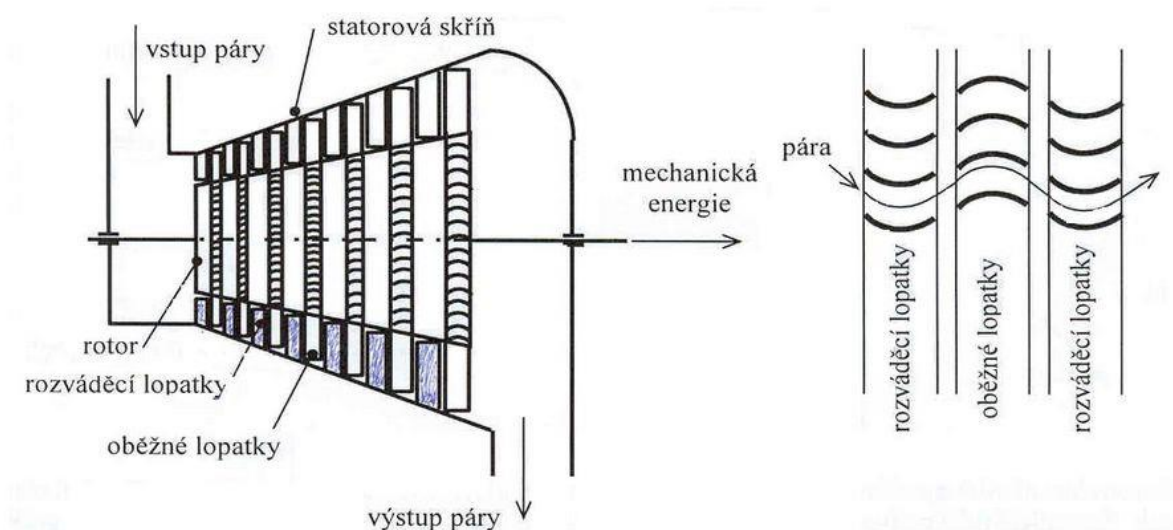
Obr. 11-51: Cugnotův parní vůz [39]

Na rozhraní 19. a 20. století v dopravě převládaly automobily s parními motory a spolu s elektromobily a spalovacími motory soupeřily o převahu v dopravě. Do dějin parních automobilů se zapsal i český technik Josef Božek (1815). Automobily s parními motory se sériově vyráběly ve dvacátých letech (Delling, Doble) i ve třicátých (Sentinel). Návrat do dopravy byl očekáván i u švédské firmy Saab (1980) nebo u GM a Ford. V současnosti se v rámci projektu ZEE věnuje vývoji parního motoru institut IAV.

11.3.2. Druhy parních motorů

Parní turbína

Parní turbína je rotační motor, ve kterém je využito tlaku expandující páry na lopatky rotoru.

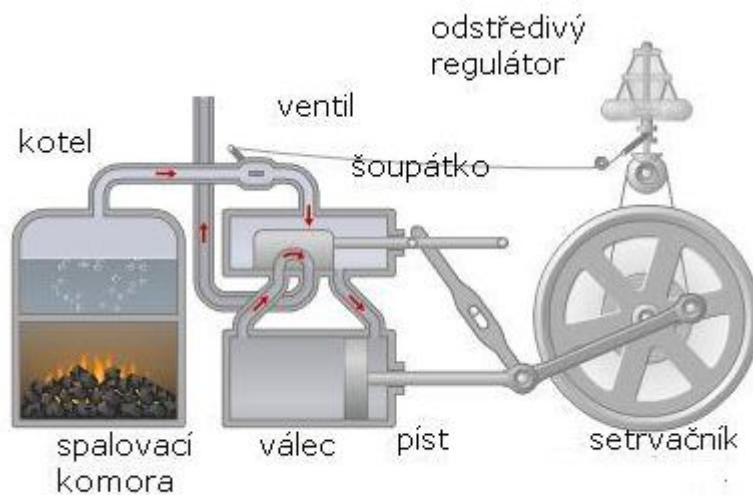


Obr. 11-56: Parní turbína [30]

V pozemní dopravě není parní turbína využívána. Nejobvyklejší využití je ve výrobě elektřiny. Parní turbíny mohou být impulsní nebo reakční. Bližší popis a funkce nejsou předmětem této publikace.

Parní stroj pístový s přímočarým pohybem

Principiálně sestává z pracovního válce, ve kterém se přímočaře pohybuje píst. Pohyb je pomocí klikového hřídele proveden na rotační a ten dále na kolo dopravního prostředku. Základní schéma je na obr. 11-57.

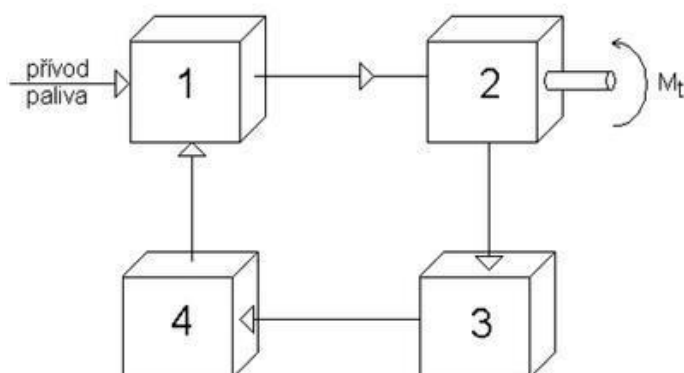


Obr. 11-57: Schéma parního stroje [29] včetně popisku

Jde o zobrazení primitivního stroje z počátků vývoje a současné parní motory jsou v mnohém dokonalejší.

11.3.3. Princip činnosti

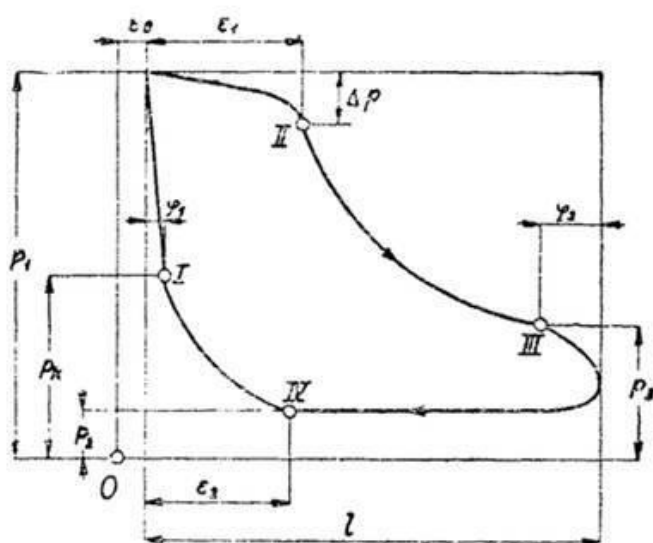
Princip práce moderního parního motoru s uzavřeným oběhem je patrný z *obr. 11-58*.



Obr. 11-58: Princip práce parního motoru

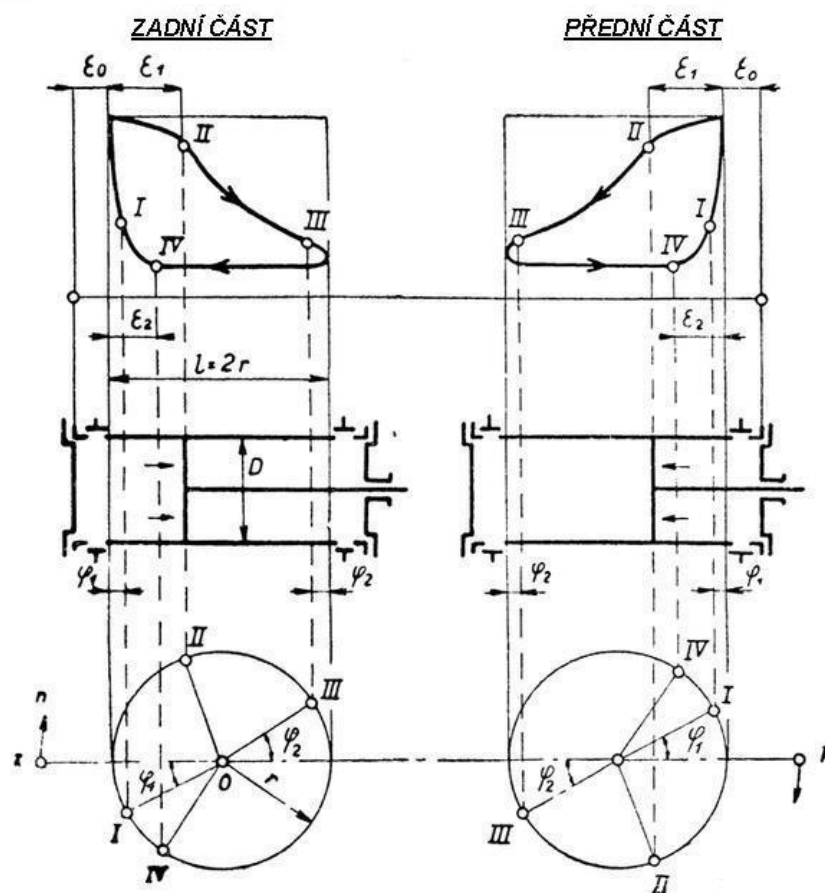
K přeměně chemické energie paliva na energii kinetickou dochází v uzavřeném oběhu za součinnosti čtyř členů:

- Hořák, kotel, přehříváč – v tomto zařízení je energie paliva s výhřevností Q_v [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$] přeměněna na teplo, které je předáno mediu oběhu. Nejčastěji jde o vodu, ale používají i jiné směsi. Změna skupenství (z vody na přehřátou páru) umožní v následujícím zařízení expanzi.
- Parní motor – expanzí páry je píst přetlačen z jedné úvratí do druhé. Tyto zdvihy jsou pracovní a vnitřní energie (entalpie) páry je takto přeměněna na kinetickou (viz p - V diagram na *grafu 11-20*). Přímý pohyb pístu je dále převeden na rotační. Moderní parní motory mají oba směry pohybu pístu pracovní (dvojčinný píst).
- Kondenzátor, chladič – v tomto zařízení dochází ke zpětné změně skupenství. Pára je zkapalněna, zbytkové teplo je předáno výměníku a zmařeno nebo dále využito.
- Čerpadlo – zařízení zajišťující oběh media.



Graf. 11-20: Indikátorový diagram [31]

Představu o termodynamické změně podává obr. 11-59.



Působení páry po obou stranách pístu.

Obr. 11-59: p-V diagram dvojčinného parního motoru [31]

Pracovní oběh je v p - V diagramu určen čtyřmi body:

- Počátek plnění pracovního válce přehřátou párou. Před horní úvratí pístu (obdoba předstihu u zážehových motorů) je do válce vpuštěna pára „plného“ tlaku.
- Konec plnění (admise).
- Počátek vyprazdňování válce. Před dolní úvratí je otevřen ventil výstupu páry do kondenzátoru.
- Počátek komprese. Ventil výstupu páry je uzavřen.

Mezi body II. a III. probíhá expanze páry. Jde o termodynamickou změnu, nejlépe charakterizovanou adiabátou. Platí vztah:

$$p \cdot V^{\kappa} = konst., \text{ kde} \quad (11.1)$$

κ Poissonova konstanta, pro přehřátou páru bývá 1,3

Exponent κ je jedním z určujících faktorů účinnosti přeměny energie. závisí též na stupni přehřátí páry.

11.3.4. Parametry (indikované) parního motoru

Z p-V diagramu (obr. 11-55) lze odvodit následující parametry:

práce je úměrná velikosti plochy ohraničené křivkami termodynamických změn. Platí vztah

$$W_{už} = \int p \cdot dV_{\alpha}, \text{ kde} \quad (11.26)$$

$W_{už}$ = užitečná práce [J]

V_{α} = objem pracovního válce v závislosti na úhlu natočení klikového hřídele [m³]

výkon vypočtený z indikovaných veličin

$$P_i = \frac{W_{už}}{t}, \text{ kde} \quad (11.27)$$

t = doba jednoho oběhu [s]

tlak

$$p_i = \frac{W_{už}}{V_z}, \text{ kde} \quad (11.28)$$

V_z = zdvihový objem [m³]

účinnost

Celková (efektivní) účinnost η_{ef} je součinem účinnosti několika členů soustavy. Nejméně jsou to hořák (kotel), motor, kondenzátor (chladič) a čerpadlo. Dále má smysl rozdělit účinnost podle teplotních ztrát.

Účinnost kotle η_K – poměr entalpie páry ($i_1 - i_0$) ku výhřevnosti paliva

$$\eta_K = \frac{i_1 - i_0}{H_u}, \text{ kde} \quad (11.29)$$

i_1 = entalpie páry na výstupu z kotle [J.kg⁻¹]

i_0 = entalpie vody na vstupu do kotle [J.kg⁻¹]

H_u = dolní výhřevnost paliva [J.kg⁻¹]

Pozn. 1: η_K moderních kotlů a ohříváčů bývá > 0,9.

Pozn. 2: V η_K může být zahrnuta též účinnost chladiče. Pokud je tento využit dále, nutno jeho využití též zahrnout.

Účinnost motoru termická

Poměr teoretické práce ku přivedenému teplu. Též vyjádřitelná jako poměr ploch p-V diagramu skutečného k ideálnímu (oběh Clausius-Rankinův).

$$\eta_t = \frac{W_i}{Q}, \text{ kde} \quad (11.30)$$

W_i	práce indikovaná [J]
Q	přivedené teplo [J]

Pozn.: η_t oběhů se uvádí v rozmezí 0,2 – 0,4.

Účinnost motoru termodynamická – poměr efektivního výkonu P_{ef} ku ideálnímu výkonu (teoretickému) P_o

$$\eta_i = \frac{P_{ef}}{P_o}, \text{ kde} \quad (11.31)$$

P_{ef} výkon zjištěný na hřídeli motorové brzdy, vypočtený ze vztahu

$$P_{ef} = M_t \cdot n \text{ [W]}$$

P_o výkon teoretický, vypočtený

Pozn.: η_i se uvádí v rozmezí 0,5 – 0,8

Účinnost mechanismů (mechanické ztráty)

$$\eta_m \approx 0,85 - 0,95$$

Účinnost celková (efektivní) η_{ef}

Poměr energie odvedené ku energii přivedené. Lze vyjádřit jako poměr efektivního výkonu ku energii paliva.

$$\eta_{ef} = \frac{P_{ef}}{M_p \cdot H_u}, \text{ kde} \quad (11.32)$$

P_{ef} výkon zjištěný na hřídeli motorové brzdy, vypočtený

M_p hmotnost spotřebovaného paliva [kg]

H_u dolní výhřevnost paliva [J.kg⁻¹]

Celková účinnost je tedy součinem účinností jednotlivých částí. Platí

$$\eta_{ef} = \eta_K \cdot \eta_t \cdot \eta_i \cdot \eta_m \quad (11.33)$$

Dále možno η_{ef} vyjádřit také

$$\eta_{ef} = \frac{3600}{m_{pe} \cdot H_u}, \text{ kde} \quad (11.7)$$

3 600 tepelný kvocient jedné kWh [kJ]

m_{pe} měrná spotřeba paliva [kg.kWh⁻¹]

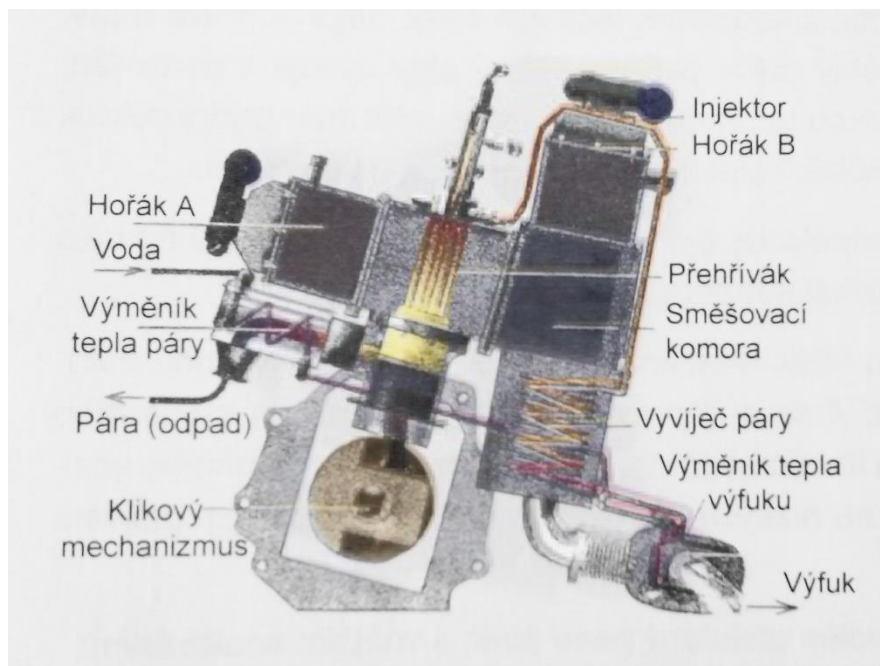
Pozn.: η_{ef} parního motoru se uvádí v rozmezí 0,10 – 0,25.

11.3.5. Parní motor IAV GmbH

V rámci projektu nulových emisí (exhalací) z dopravy byl v institutu IAV vyvinut parní motor pro osobní automobil střední třídy. V roce 2009 byly publikovány výsledky, z nichž uvádíme: [32].

11.3.5.1. Konstrukce motoru

Podle obr. 11-60.



Obr. 11-60: Konstrukce motoru [33]

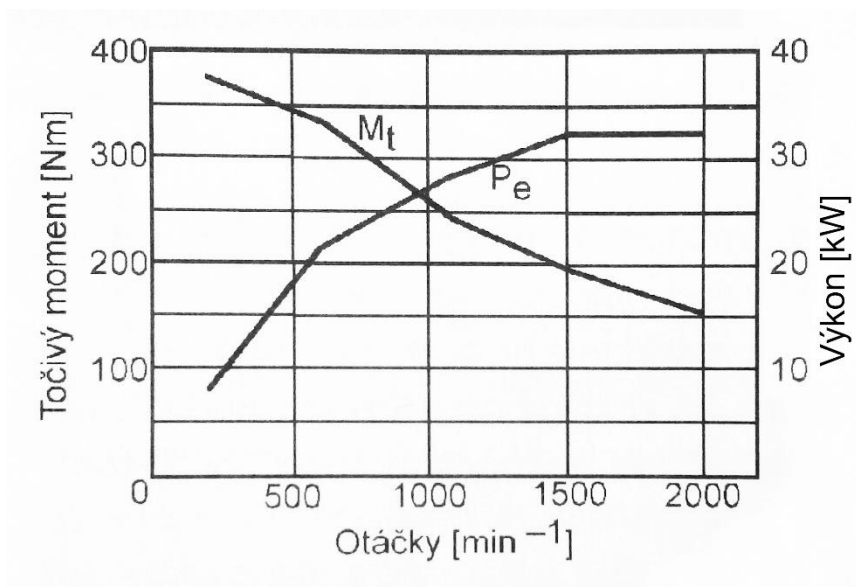
Tříválcový motor s jednočinnými písty má vrtání 90 mm a zdvih 52 mm. Celkový objem 992 cm³. Uzavřený oběh vody a přehřáté páry sestává z několikastupňového ohřevu uskutečněného jak hořáky, tak výměníky tepla. Do válce je dopravena přehřátá pára (900 °C) s tlakem 50 MPa. Tomu odpovídá vysoká entalpie.

Účinnost ohřevu je dosažena velkou plochou vedení média se zdroji tepla (větší množství tenkých trubek). Pohotovost motoru k jízdě je do 20 s po vznícení.

11.3.5.2. Parametry motoru

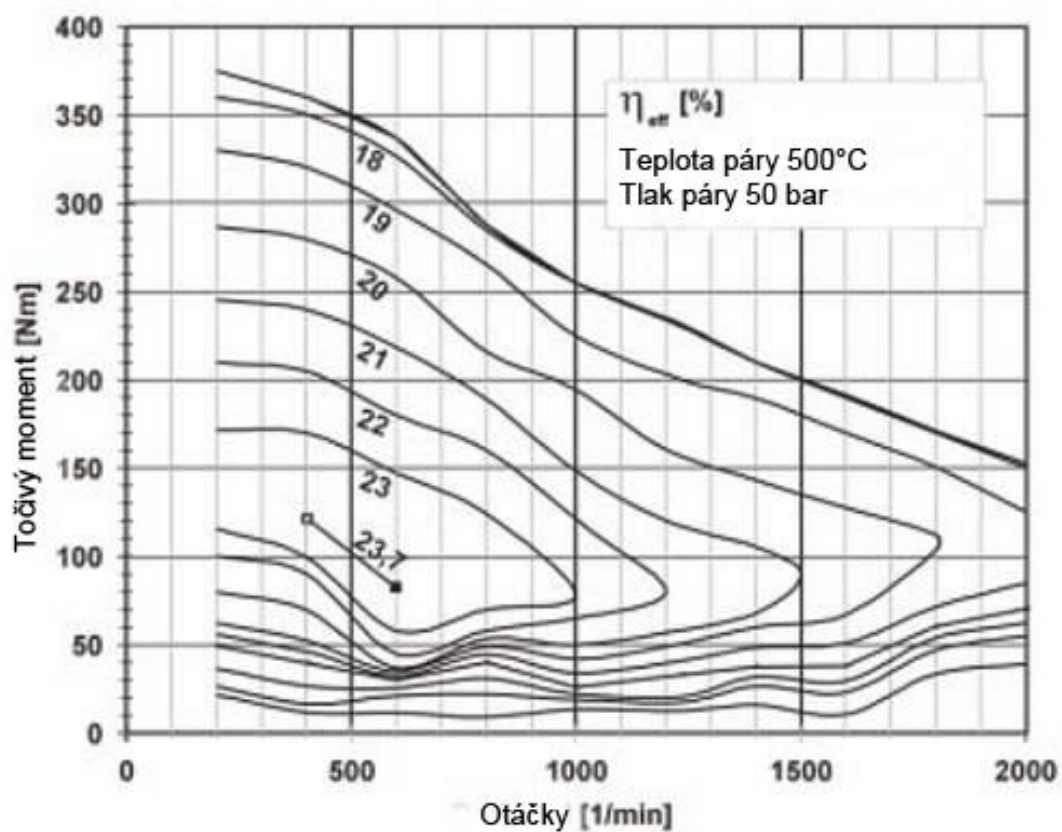
- počet válců 3
- zdvihový objem 992 cm³
- max. výkon $P_e = 32$ kW
- otáčky max. výkonu 2 000 min⁻¹
- otáčky maximální 2 500 min⁻¹
- max. točivý moment $M_t = 500$ N.m
- otáčky max. točivého momentu M_t 200 min⁻¹
- účinnost $\eta_{ef} = 18 - 24$ %

Průběh výkonu a točivého momentu je patrný z obr. 11-61.



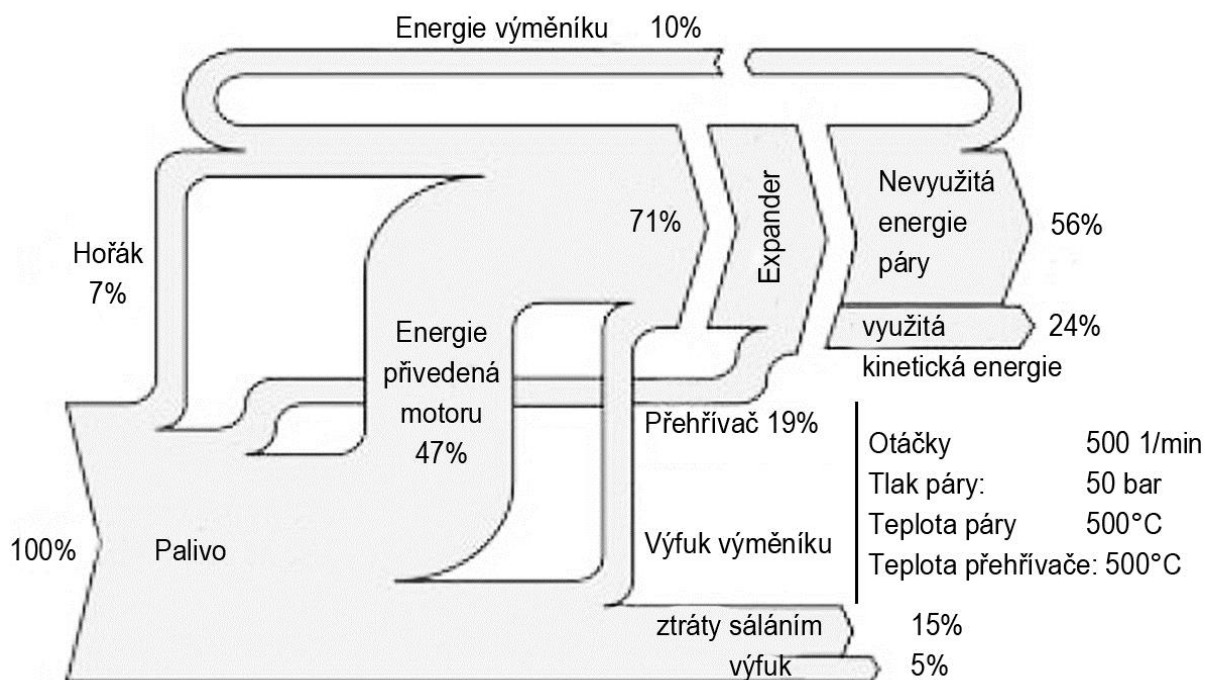
Obr. 11-61: Průběh výkonu a točivého momentu [33]

Úplná charakteristika motoru a pole účinnosti jsou patrné z grafu 11-21:



Graf 11-12: Úplná charakteristika motoru a pole účinnosti [33]

Tepelná bilance vyjádřená jako Sankeyův diagram je na obr. 11-62.



Obr. 11-62: Tepelná bilance jako Sankeyův diagram [33]

11.4. Kompresní motor

Též pneumický nebo motor na stlačený vzduch. Motor s vnitřní expanzí vzduchu. Zařízení, ve kterém je přeměněna vnitřní energie stlačeného vzduchu (entalpie) na kinetickou.

Je známo několik druhů

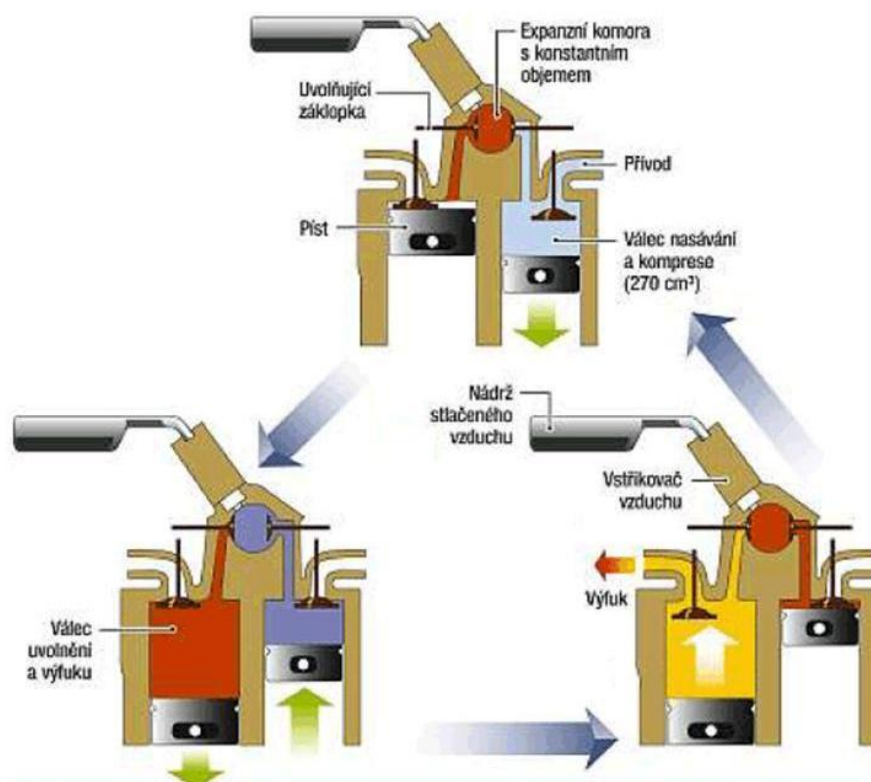
- s přerušovanou expanzí (pístové s přímočarým pohybem pístu a rotační),
- s nepřerušovanou expanzí (turbína).

11.4.1.1. Kompresní motor MDI

Jde o pístový motor s přímočarým pohybem pístu, vyvinutý firmou MDI a použitý v automobilech TATA Motors.

11.4.1.2. Princip činnosti

Princip činnosti je patrný z obr. 11-63.



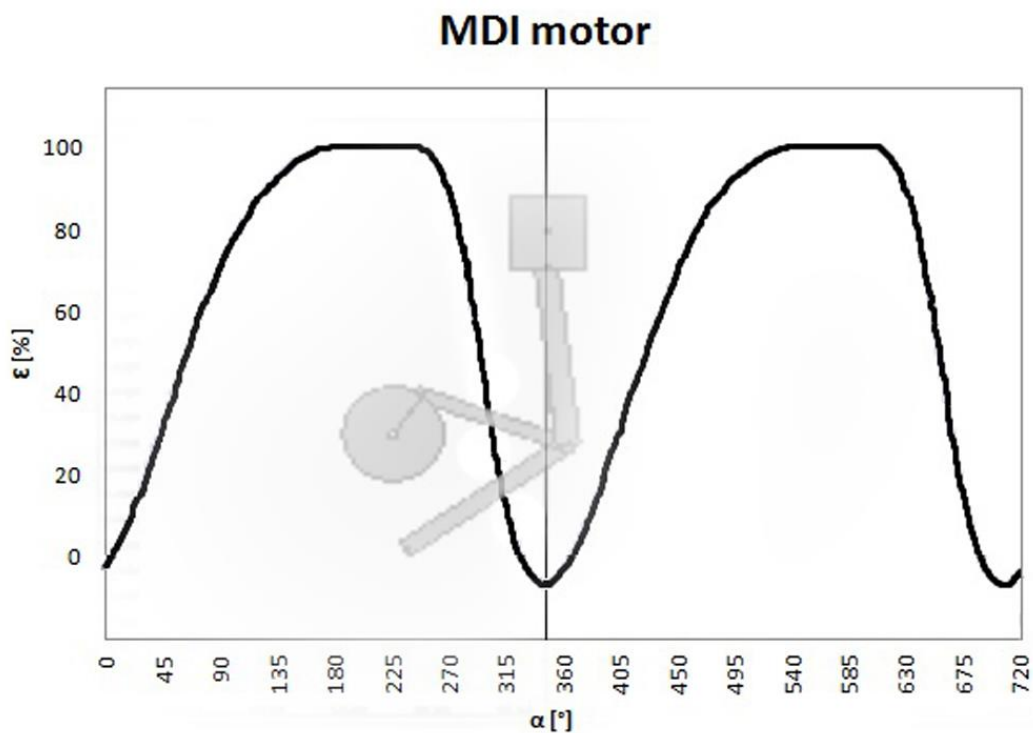
Obr. 11-63: Princip činnosti kompresního motoru [34]

Systém sestává ze dvou konstrukčních skupin:

Vlastní motor – je rozeznáváno více způsobů práce. Vyobrazený motor je sestaven ze dvou válců, z nichž jeden je kompresní a druhý pracovní. První válec nasává a stlačuje atmosférický vzduch. Ten je stlačen cca na 20 barů. Přitom je přemístěn do komory oddělené ventilem. Jeho teplota po stlačení stoupne na cca 400 °C. Do takto stlačeného a zahřátého vzduchu je vpuštěn (vstříknut) vzduch ze zásobníku. Teplota tohoto vzduchu je cca 20 °C a tlak ca 50 barů. Je uvolněn ventil do pracovního válce a dochází k expanzi. Pracovní válec je stlačen a koná práci. Tento zdvih je pracovní. Vzduch ze zásobníku má teplotu okolí, ale vysoký tlak. Po jeho vstříknutí do zahřátého prostředí (rozdíl teplot je cca 380 °C) přijme teplotu prostředí a dochází k prudké expanzi.

Zásobník energie – tlaková nádoba se vzduchem stlačeným na cca 300 barů. K doplnění zásobníku je využit kompresor mimo vozidlo.

Konstrukční systém přídavných ojníc způsobí zpoždění pohybu pístu tak, že v určité poloze (v horní úvratí) setrvá déle, čímž je prodloužena izochorická část termodynamické změny.



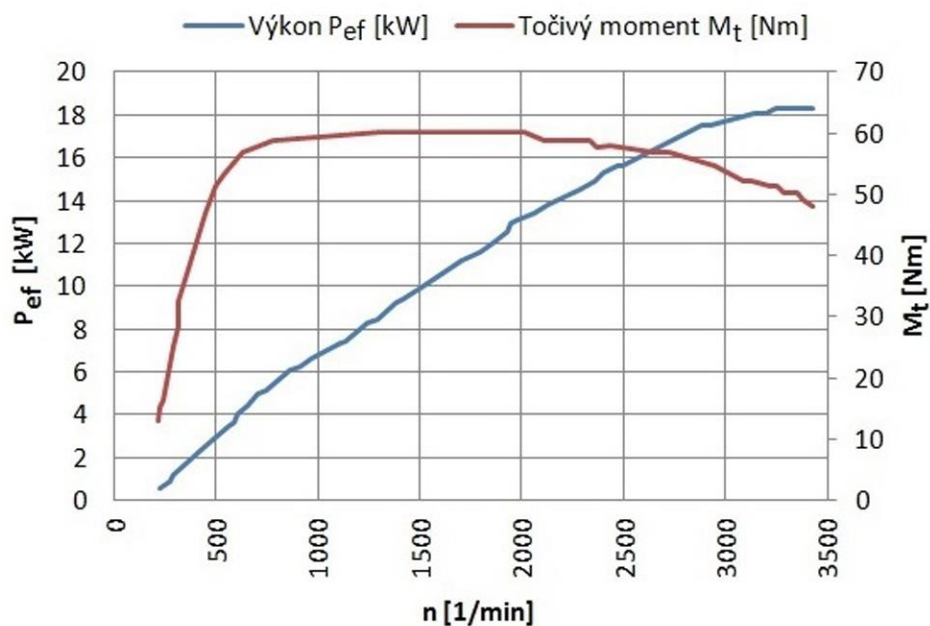
Obr. 11-64: Konstrukční systém kompresního motoru [34]

11.4.1.3. Charakteristika kompresního motoru MDI

Pozn.: Uvedeny jsou parametry konkrétního typu motoru (MDI), lze je však zobecnit pro kompresní motory podobné koncepce.

Výkon P a točivý moment M_t

Průběh obou veličin je patrný z grafu 11-22.



Graf 11-22: Charakteristika kompresního motoru MDI [34]

Z grafu je patrný výhodný průběh točivého momentu. Své nejvyšší hodnoty dosahuje už při nízkých otáčkách a setrvává na této hodnotě až do blízkosti otáček největšího výkonu. Jde tedy o motor s vysokou pružností (hodnota $\varphi_n = 0,23$), jakou lze očekávat u parních motorů.

Pozn.: Pružnost motoru φ_n je hodnocena jako poměr otáček maximálního točivého momentu M_t ku otáčkám maximálního výkonu P . Čím je hodnota menší, tím je motor pružnější a nevyžaduje vícestupňovou rychlostní skříň. Dynamika motoru může být vyjádřena ještě jinými způsoby.

Výrobce deklarované parametry

- objem válce 566 cm³,
- objem motoru 1 132 cm³,
- max. výkon/otáčky 20 kW / 350 min⁻¹,
- max. točivý moment/otáčky 63 kN / 800 – 1300 min⁻¹,
- objem zásobníku stlačeného vzduchu 300 dm³,
- objem vzduchu v zásobníku (při atm. teplotě) 90 m³,
- tlak vzduchu v zásobníku 300 bar,
- max. rychlost vozidla 130 km.h⁻¹,
- akční rádius (dojezd na jednu náplň) 200 – 300 km,
- doba doplnění zásobníku zabudovaným kompresorem 3 – 4 h,
- doba doplnění zásobníku z veřejné tlakovací stanice (úvaha budoucnosti) 2 – 3 min.



Obr. 11-65: Koncept automobilu TATA [35]

11.4.1.4. Účinnost pístových kompresních motorů

Energetickou analýzu kompresního motoru je nezbytné provést ve dvou procesech:

- stlačování vzduchu do zásobníku,
- expanzní proces v motoru, přeměna entalpie vzduchu na kinetickou energii.

Celková účinnost přeměny energií na kinetickou je pak výsledkem analýzy WTW.

Stlačení vzduchu do zásobníku

Podmínky procesu stlačování

- Zařízením pro stlačení je kompresor. Kompresorů je více druhů, od pístových, přes kombinované až po rotační turbíny.

- Žádné z uvedených zařízení není schopné stlačit vzduch na potřebný tlak jedním procesem (jedním stupněm). Proto je použito vícestupňových kompresorů, s různými účinnostmi.
- Tlak potřebný v zásobníku je různý. Aby účinnost motoru byla co nejvyšší, a akční rádius také, je žádoucí vysoký tlak i objem. Optimální se jeví tlak 300 bar.
- Pro následnou analýzu bude uvažován třístupňový pístový kompresor s přímočarým pohybem pístu. Zařízení pracuje s dvoudobým cyklem sání – stlačení. Poháněn je elektromotorem s účinností $\eta_{el\text{mot}} > 90 \%$.
- Do analýzy není zahrnuta účinnost při výrobě el. energie potřebné k provozu kompresoru.

Účinnost stlačování

Účinnost je možné vyjádřit jako poměr výkonu kompresoru ku příkonu jeho elektromotoru. Výkon je součinem hmotnosti stlačeného vzduchu a měrné technické práce za předpokladu izotermické změny. Platí vztah

$$\eta_i = \frac{\dot{m} \cdot a_t}{P_c}, \text{ kde} \quad (11.34)$$

η_i	účinnost izotermické změny [-]
$\dot{m}$	hmotnostní výkonnost kompresoru [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$]
a_t	měrná technická práce kompresoru (viz dále) [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]
P_c	celkový příkon [W]

Technická práce je vyjádřitelná více způsoby, mimo jiné též integrací plochy v p - V diagramu, tedy $\int_1^2 V dp$ nebo jako měrná veličina pomocí vztahu

$$a_t = r \cdot T_1 \cdot \frac{p_2}{p_1}, \text{ kde} \quad (11.35)$$

r	měrná plynová konstanta vzduchu [$287 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
T_1	teplota nasávaného vzduchu [K]
p_1	tlak v sacím potrubí [Pa]
p_2	tlak za kompresorem [Pa]

Pozn.: Izotermická účinnost kompresoru η_i se uvádí podle druhu kompresoru a mechanismu pohonu 0,5 – 0,6.

Expanzní proces v motoru

Podmínky expanze v pracovním válci motoru:

- komprese v motoru a expanze mají adiabatický průběh,
- teplota vzduchu uloženého v zásobníku je shodná s okolím (cca 293 K, tj. 20 °C),
- v zásobníku je konstantní tlak.

Účinnost kompresního motoru

Tato může být vyjádřena jako poměr energie odvedené ku energii vyčerpané ze zásobníku.

Celková energie obsažená ve stlačeném vzduchu v zásobníku je dána vztahem

$$E = m \cdot i = m \cdot c_p \cdot T, \text{ kde} \quad (11.36)$$

E	energie v zásobníku [J]
m	hmotnost vzduchu v zásobníku [kg]
i	měrná entalpie [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
c_p	tepelná kapacita při stálém tlaku [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
T	termodynamická teplota [K]

Celkovou hmotnost vzduchu lze vypočítat pomocí vztahu

$$M = \frac{p_z \cdot V_z}{r \cdot T_z}, \text{ kde} \quad (11.37)$$

p_z	tlak v zásobníku [Pa]
V_z	objem zásobníku [m^3]
r	měrná plynová konstanta [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] (pro vzduch 287)
T_z	teplota vzduchu v zásobníku [K]

Celková účinnost motoru pak bude vyjádřena

$$\eta_{ef} = \frac{P_{ef}}{M_p \cdot i}, \text{ kde} \quad (11.38)$$

η_{ef}	= celková účinnost motoru [-]
P_{ef}	= výkon motoru na brzdě [W]
M_p	= hmotnost spotřebovaného vzduchu [kg]
i	= měrná entalpie [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]

Pozn.: Celková účinnost procesu stlačení vzduchu do zásobníku a poté jeho využití v motoru se pohybuje v rozmezí $\eta_c = 0,15 - 0,25$.

Celý děj kompresního motoru sestává ze tří dějů, které je možno považovat za samostatné. Jsou to:

- stlačení vzduchu do zásobníku η_i ,
- stlačení atmosférického vzduchu v prvním válci η_{t1} ,
- expanze vzduchu po vstřiku ze zásobníku η_{ef} .

Celková účinnost tedy bude součinem

$$\eta_c = \eta_i \cdot \eta_{t1} \cdot \eta_{ef} \quad (11.39)$$

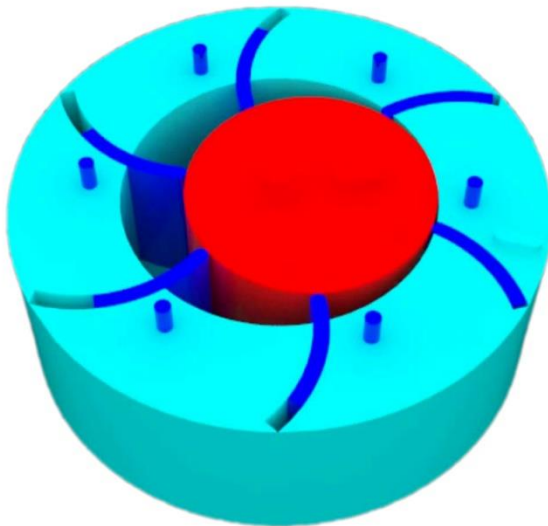
Pozn.: Výhodou kompresního motoru je téměř bezemisní provoz. Vzhledem k výrazné absorpci teploty okolí při „škrčení“ vstřikovaného vzduchu vychází z motoru velmi chladný vzduch (uvádí se až -30°C).

11.4.1. Kompresní motory rotační a reaktivní

Přeměny energii stlačeného vzduchu na energii kinetickou může být dosaženo i v motorech, které pracují na principu turbíny (ať už rotační nebo reaktivní). Vzhledem k neznámému použití v pozemní dopravě není zde systém uveden.

Některé systémy kompresních motorů s rotujícími nebo krouživými písty jsou výjimečně v dopravě použity.

Příkladem může být motocykl s motorem systému „diPietro“.



Obr. 11-66: Motor diPietro [36]

Motocykl, který je provozován na stlačený vzduch, je na obr. 11-67.



Obr. 11-67: Motocykl na stlačený vzduch [37]

Pozn.: K přeměně energie stlačeného vzduchu nebo jiného plynu na energii kinetickou mohou být využity různé systémy motorů, které mají „komory“ s proměnlivým objemem. Tyto systémy jsou uvedeny na str.78.

12. Použitá literatura a internetové zdroje

- [1] Tůma J.: Velký obrazový atlas dopravy. Artia, 1980.
- [2] Augusta P. a kol.: Velká kniha o energii. L.A. Consulting Agency, 2001. ISBN: 80-238-6578-1.
- [3] www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=energeticka_narocnost_dopravy&site=doprava
- [4] Duchoň B. a kol.: Ekonomika zavádění alternativních paliv v dopravě a možnosti internalizace externích nákladů dopravy v České republice. Roční zpráva k řešení projektu MD ČR. FD ČVUT v Praze, 2005.
- [5] Bolochovitinov, V.: Vyprávění o ruských vynálezcích a objevitelích, Mopodaja gvardija, Moskva 1950
- [6] Vlk F.: Dynamika motorových vozidel, VUT Brno, 2003. ISBN: 80-239-0024-2.
- [7] First. J. a kol.: Zkoušení automobilů a motocyklů. ČVUT v Praze. S&T CZ, 2008. ISBN: 978-80-254-1805-5.
- [8] Křen K., Košťál J.: Moderní automobil v obrazech, Naše vojsko – Praha. 1972.
- [9] Supermoto, č. 2/2001, str. 57.
- [10] Schenck – firemní literatura, id. číslo prospektu: L 3210/1
- [11] Macek J.: Spalovací motory, ČVUT, nakladatelství ČVUT, 2007.
- [12] AutoEXPERT 6/2004, str. 9 přílohy, vydavatelství AutoPRESS. ISSN 1211 – 2380.
- [13] AutoEXPERT 7,8/2004, str. 8, vydavatelství AutoPRESS. ISSN 1211 – 2380.
- [14] cs.autolexicon.net/articles/emisni-norma-euro
- [15] AutoEXPERT 10/2006 str. 11 příloha, vydavatelství AutoPRESS. ISSN 1211 – 2380.
- [16] Kovařík L.: Motory Wankelovy a jim příbuzné, SNTL, 1970.
- [17] www.aqpl43.dsl.pipex.com/museum/power/unusual/ICeng/rotbloclC/rotbloclC.htm#murray
- [18] www.google.com/oatebts/vs6305345figure2a3
- [19] Moto Revue 1956
- [20] http://cs.wikipedia.org/wiki/Stirling%C5%AFv_motor
- [21] www.transformacni-technologie.cz/stirlinguv-motor.html
- [22] http://cs.wikipedia.org/wiki/Ericsson%C5%AFv-Brayton%C5%AFv_cykus
- [23] Šíbllová K.: Návrh spalovací turbíny pro osobní automobil, VUT Brno, 2013.
- [24] www.motory-gymceon.vyrobce.cz/reak.html
- [25] www.driversweb.cz/clanky/Blog/elektricky_valcik_jak_se_naucit_nebat_se_zasuvky
- [26] ČSN EN 13447
- [27] <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromotor>
- [28] Roubíček, O.: Elektrické motory a pohony, Praha 2004. ISBN 80-7300-092-x.
- [29] <http://www.parnistroj.czweb.org/schema.html>
- [30] http://eamos.pf.jcu.cz/amos/kat_fyz/modules/low/kurz_text.php?identifik=kat_fyz_7356_t&id_kurz=&id_kap=8&id_teach=&kod_kurzu=kat_fyz_7356&id_kap=8&id_set_test=&search=&kat=&startpos=3
- [31] Klág. J.: Parní stroje, SNTL 1959.
- [32] MTZ (Motortechnische Zeitschrift) 62, 2001.
- [33] Kameš J.: Alternativní pohon automobilů, Nakladatelství BEN – Technická literatura, 2004.
- [34] www.autonavzduch.cz/bodymotor.html
- [35] <http://incredibleengineering.com/wp-content/uploads/2013/10/airpod-tata-motors.jpg>
- [36] <https://www.youtube.com/watch?v=Z1Jgq9C82Bc>; autor: Marek Krzyzowski
- [37] www.motorcycle-usa.com/48282/Motorcycle-Photo-Gallery-Photo/Green-Speed-Air-Motorcycle.aspx
- [38] Archiv Jiří First
- [39] Wikimedia Commons

Obrázek na titulní straně a CD; Autor: J.M.W. Turner – Rain, Steam and Speed – The Great Western Railway (1844), zdroj: Wikimedia Commons