

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Bakalářská práce**

**2012**

**Marek Svoboda**

**Česká zemědělská univerzita v Praze**

**Technická fakulta  
Katedra jakosti a spolehlivosti strojů**

**Alternativní konstrukce spalovacích motorů**

**Bakalářská práce**

**Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Josef Pošta, CSc.  
Vypracoval: Marek Svoboda**

**Praha 2012**

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Marek Svoboda**

obor Silniční a městská automobilová doprava

Vedoucí katedry Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu ČZU v Praze čl. 16 určuje tuto bakalářskou práci.

Název práce: **Alternativní konstrukce spalovacích motorů**

## Osnova bakalářské práce:

1. Úvod
2. Cíl práce a metodika
3. Současný stav řešené problematiky
4. Očekávané trendy vývoje konstrukcí spalovacích motorů
5. Popis konstrukce, funkce a vlastností vybraného alternativního řešení
6. Závěr
7. Seznam literatury
8. Přílohy

Rozsah hlavní textové části: 30 - 40 stran

Doporučené zdroje:

ČSN ISO 690: Bibliografické citace

Časopis Autoexpert, Vogel Publishing, Praha, ISSN 1211-2380

Časopis AUTOservis, AUTOservis akademie, Turnov, ISSN 1210-8243

<http://www.bosch.cz/content/language1/html/index.htm>

Další Internetové zdroje podle vlastního průzkumu

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Josef Pošta, CSc.**

Termín zadání diplomové práce: listopad 2009

Termín odevzdání bakalářské práce: duben ~~2011~~ 2012

*opak. roč.  
řř,*

*Pošta*

Vedoucí katedry



*[Signature]*

Děkan

V Praze dne: 30. 11. 2009

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. Josefa Pošty, CSc.  
a použil jen uvedených pramenů a literatury.

Souhlasím, aby moje práce byla k dispozici ČZU v Praze.

V Praze, dne .....

.....

vlastnoruční podpis

## Poděkování

Úvodem mé práce bych chtěl poděkovat všem, jenž mi při tvorbě této práce pomohli, zejména pak panu prof. Ing. Josefu Poštovi, CSc. za cenné náměty a připomínky. Dále pak mé rodině za morální a časovou podporu ve studiu.

**Anotace:** Cílem této práce je seznámení čtenáře s alternativními konstrukcemi spalovacích motorů, a to především motorů, které se používají pro pohon osobních a nákladních vozidel. V prvních kapitolách je popsána historie a současný stav vývoje motorů, které se používají v běžné výrobě a jejich základní rozdělení. V hlavní kapitole „Vývoj konstrukcí spalovacích motorů: funkce, vlastnosti a popis“ je dopodrobna popsána každá jednotlivá alternativní konstrukce, její základní charakteristiky a funkce. Dále pak výhody oproti běžným motorům ale také nedostatky, kvůli kterým je její použití nevýhodné. V poslední části práce je uvedeno shrnutí s uvedením možností budoucího uplatnění.

**Klíčová slova:** konstrukce motorů, hybridní pohon, LCE, OPOC, pětiodobý motor, Hefley X2, Split-Cycle Engine, MCE-5, Wankel, Hüttlin-Kugelmotor, Tour engine, WDG, Capstone, Stirling

### ***Alternative construction of combustion motor***

**Abstract:** The aim of this paper is to introduce readers with alternative designs of combustion engines, especially engines used to power cars and trucks. In the first chapters describes the history and current state of development of engines that are used in current production and basic division. In the main chapter "Development of design of combustion engines: functions, properties and description" is described in detail every single alternative structure, its basic characteristics and functions. Furthermore, the advantages over conventional engines, but also deficiencies for which its use is not viable. The last part is a summary indicating the possibility of future applications.

**Keywords:** construction of engines, hybrid drive, LCE, OPOC, five-stroke engine, Hefley X2, Split-Cycle Engine, MCE-5, Wankel, Hüttlin-Kugelmotor, Tour engine, WDG, Capstone, Stirling

Úvod.....	- 1 -
1. Vznik, vývoj a současný stav konstrukcí spalovacích motorů.....	- 2 -
1.1 Vznik a vývoj spalovacích motorů .....	- 2 -
1.2 Současný stav spalovacích motorů .....	- 4 -
1.2.1 Motory s vnitřním spalováním .....	- 4 -
1.2.2 Motory s vnějším spalováním .....	- 4 -
2. Vývoj konstrukcí spalovacích motorů: funkce, vlastnosti a popis .....	- 5 -
2.1 Lineární spalovací motor-generátor LCE-02 .....	- 5 -
2.2 Motor OPOC.....	- 7 -
2.3 Pětidobý motor .....	- 9 -
2.4 Hefley X2 .....	- 11 -
2.5 Split-Cycle Engine .....	- 12 -
2.6 MCE-5 - motor s proměnnou kompresí .....	- 15 -
2.7 Wankelův motor .....	- 18 -
2.8 Hüttlin-Kugelmotor .....	- 21 -
2.9 Tour Engine .....	- 23 -
2.10 WDG (Wave Disc Generator) .....	- 25 -
2.11 Mikroturbína Capstone .....	- 28 -
2.12 Stirlingův motor .....	- 29 -
3. Shrnutí .....	- 33 -
4. Závěr .....	- 34 -
5. Seznam použité literatury .....	- 36 -
5.1 Seznam obrázků: .....	- 40 -



## Úvod

Na konci 18. století byl poprvé sestrojen parní stroj. Od té doby začal intenzivní výzkum a vývoj nových agregátů, které měli v prvopočátku spíše usnadňovat práci lidem v továrnách v podobě transformace namáhavé manuální výroby na poloautomatizovanou výrobu. První motory byly proto využity jak v průmyslovém odvětví, tak hlavně v zemědělské výrobě a vlastně všude tam, kde usnadňovali a zefektivňovali lidskou práci.

Dnes se motory využívají v největším měřítku v dopravě a neustále jich přibývá. Největší světoví výrobci pohonných agregátů (Toyota, General motors, Volkswagen Group a další.) i samotní řidiči si kladou základní otázku, jak přes rostoucí výrobu automobilů snížit spotřebu paliva a tím i emise. Stále přísnější emisní limity tlačí automobilky k šetrnějším řešením a nutí je přinášet nová technická řešení.

Motory obvyklé konstrukce založené na klikovém mechanismu, se používali už u parního stroje. Od té doby se tato základní myšlenka zachovala a všechny znalosti v daném oboru byly použity k vylepšování ostatních komponent, které jsou buď nezbytné pro funkčnost motoru (vysokotlaké vstřikovače, proměnné časování ventilů), anebo které zvyšují jeho účinnost (přepřňování). Tato a další vylepšení určitě značně zvedla účinnost klasického motoru. Dnes je již ale zřejmé, že je potřeba se podívat na daný problém z jiného úhlu a využít současných technologií ke zkonstruování a vyrobení nového mechanismu, který by sám o sobě měl vysoký potenciál stát se nástupcem pohonných jednotek v automobilovém průmyslu a soustředit se na jeho inovaci.

# 1. Vznik, vývoj a současný stav konstrukcí spalovacích motorů

## 1.1 Vznik a vývoj spalovacích motorů

Sedmdesát devět let po popsání principu parního stroje Denisem Papinem (1690) došlo k významným událostem, kterými začala epocha motorových vozidel.

**Nicolas Joseph Cugnot** byl francouzský vynálezce a dělostřelecký důstojník. Je označován za vynálezce prvního samostatně se pohybujícího mechanického vozidla, a to parního traktoru pro dělostřelectvo k vlečení těžkých děl. Měl tříkolový podvozek. Před předním kolem byl velký mosazný kotel vážící 5 tun. Parovůz si již vezl vlastní ohniště a páru vyráběl za jízdy. Dosahoval rychlosti až 4 km/h.

Anglický konstruktér **James Watt** svými vynálezy ukázal, že parní stroje mohou být značně výkonné a mohou se využívat v mnoha odvětvích. Bezprostřední význam pro vývoj motorových vozidel měly až vysokotlaké parní stroje amerického konstruktéra **Olivera Ewansa**. Tři roky po vynálezu mnohem výkonnějších strojů, než byly Wattovy nízkotlaké parní stroje, uplatnil Ewans novinky v konstrukci parních strojů v dopravě. V roce 1803 sestrojil motorové vozidlo určené i k plavbě.

Mezi prvními průkopníky parních motorových vozidel byl též Čech. Vynálezce **Josef Božek** své vozidlo vlastní konstrukce předvedl 17. srpna 1815 v Praze.

Od začátku minulého století se rychle objevovaly nové druhy vozidel, které využívaly jiný pohon. Angličan **George Medhurst** zažádal v roce 1800 o patent na vůz, který poháněl stlačený vzduch. V roce 1802 přihlásil švýcarský občan **Issac de Rivaz** k patentování raketový vůz, který měl pohánět hořící střelný prach. V roce 1835 přišel holandský technik **Sibrandus Stratingh** s prvním elektromobilem.

V roce 1860 vynalezl Belgičan **Jean Joseph Etienne Lenoir** dvoutaktní spalovací motor na svítíplyn. Lenoirův další vůz s plynovým pohonem dosahoval na trati dlouhé 18 km průměrnou rychlost až 6 km/h. Jeho vynálezu použili konstruktéři ke stavbě dalších typů vozidel se spalovacími motory. Zvláště nadějně vypadaly pokusy o sestrojení motorů poháněných tekutými palivy o velké výhřevnosti. Při konstrukci spalovacích motorů se vynálezci snažili používat jako palivo kromě svítíplynu i petrolej, benzín a líh.

Vídeňský mechanik **Siegtied Marcus** vyzkoušel v roce 1864 na malém vozíku motorek poháněný petrolejovými parami. O rok později měl již vozidlo pro dvě osoby a po dalších letech předvedl vozidlo s benzínovým motorem chlazeným vodou, s elektromagnetickým zapalováním a ručním řazením rychlosti.

V roce 1885 obdržel německý mechanik **Gottlieb Daimler** patent na "*vozidlo na kolech poháněné plynovým nebo petrolejovým motorem, umístěným pod sedadlem a mezi zadními nápravami*". Téhož roku dostal jeho krajan **Karl Benz** patent na "*kočár bez koní poháněný benzínovým motorem*". Řešení jejich vozidel byla východiskem ke stavbě dnešních automobilů.

Na přelomu 19. a 20. století se těšil elektromobil velké oblibě a v Americe byl rozšířenější než automobil se spalovacím motorem. O prosazení automobilu s benzínovým motorem se zasloužil americký konstruktér **Henry Ford**. V roce 1903 vytvořil na břehu Michiganského jezera se svým vozem nazvaným 999 nový světový rychlostní rekord - 146km/hod.

Když si Thomas Alva Edison prohlížel u Henry Forda náčrt připravovaného automobilu, prohlásil: "*Váš automobil bude nezávislý, nepotřebuje oheň a páru jako parní vozy, nekouří a nebude tak těžký jako elektromobil. Pracujte na něm!*".[32, 33]

## 1.2 Současný stav spalovacích motorů

Spalovací motory se dají dělit na mnoho podskupin ale spousta z nich je zaměřeno na konstrukci, počet dob pracovního cyklu anebo na použité palivo.

Podle způsobu přívodu tepelné energie můžeme spalovací motory rozdělit na dva druhy:

### 1.2.1 Motory s vnitřním spalováním

U těchto motorů probíhá spalování paliva přímo v pracovním prostoru motoru. Pro své vhodné vlastnosti se tyto motory prosadily hlavně jako pohonné jednotky dopravních prostředků.

**Přímočarý vratný pohyb pístu:**

- čtyřdobý motor
- dvoudobý motor

**Rotační pohyb pístu:**

- Wankelův motor

**Reakční motory:**

- pulzační motor
- spalovací turbína
- raketový motor

### 1.2.2 Motory s vnějším spalováním

U těchto motorů probíhá spalování paliva mimo pracovní prostor motoru. Médiem pro přenos energie je vodní pára, vzduch a některé plyny, např. helium.

- Stirlingův motor
- parní stroj
- parní turbína. [1]

## 2. Vývoj konstrukcí spalovacích motorů: funkce, vlastnosti a popis

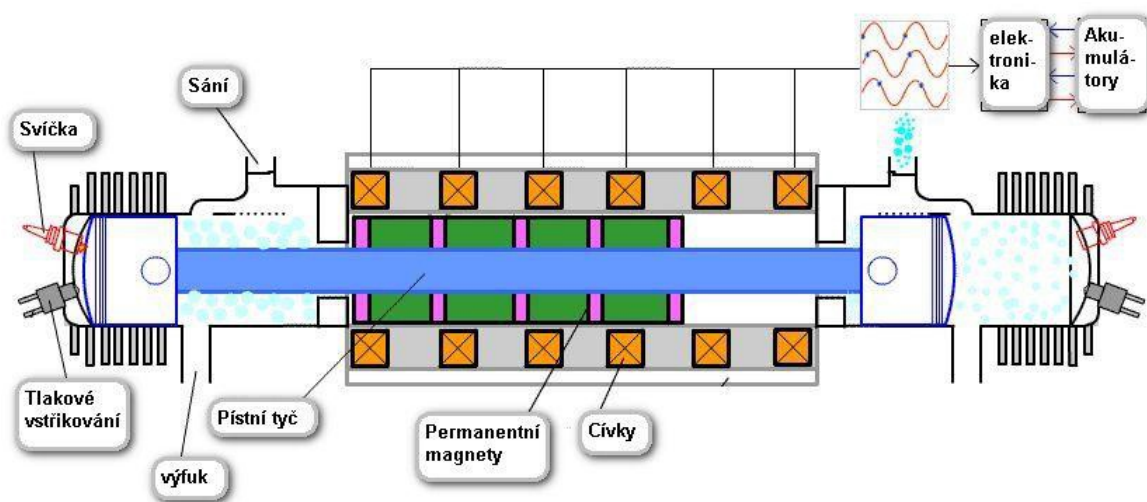
Konstrukční řešení, která se zdají být perspektivní pro budoucí využití v přeměně energie získané spalováním na energii kinetickou.

### 2.1 Lineární spalovací motor-generátor LCE-02

Projekt vznikl pod vedením doc. Ondřeje Vysokého na Katedře řídicí techniky Fakulty elektrotechnické ČVUT ve spolupráci s Výzkumným centrem spalovacích motorů a automobilů Josefa Božka.

Tento typ motoru nemá žádný mechanický výstupní hřídel, výstupem je přímo elektrická energie. Princip spočívá v přímém spojení dvou protiběžných pístů, bez použití klikového mechanismu viz Obr. 1. Na spojovací tyči jsou umístěny silné magnety, které se pohybují v magnetickém poli cívek a kmitavý pohyb pístů je převáděn na elektrickou energii na základě tzv. Faradayova zákona (takové uspořádání se nazývá lineární elektrický motor či generátor). Protože zařízení neobsahuje klikový mechanismus, nejsou ani přesně vymezeny úvratě pístní tyče. Proto se této koncepci často také říká motor s volnými písty. [2]

Obr. 1: Základní schéma motoru s volnými písty.[2]



Princip těchto motorů je znám již několik desetiletí, dodnes však je jejich využití v průmyslu velmi omezené a okrajové. Důvodem je především komplikované řízení těchto motorů, které bez možností současné technologie mikro počítačů a prvků výkonové elektroniky bylo dříve prakticky

nerealizovatelné. V současné době zájem naopak roste, protože dnešní technologické možnosti umožňují konstrukci adekvátních řídicích systémů a dají se proto využít ostatní výhodné přednosti těchto motorů.

Za základ termodynamické části prototypu motoru LCE-02 na ČVUT byly použity písty a válce motoru Aprilia SR 50 spolu s jednotkami systému přímého vstřikování paliva s pomocí stlačeného vzduchu technologie DITECH. Stlačený vzduch o tlaku 0,75 MPa vzniká přímo pohybem pístní tyče, kde jsou přes speciální vačky poháněny malé kompresorky pro každý válec. Chlazení motoru SR 50 je kapalinové, a proto byl navržen kapalinový systém s termostatem pro každý válec. Nucený oběh chladicí kapaliny je zajištěn nezávislým elektrickým čerpadlem, společně pro oba válce.

Hlavy dvoutaktních spalovacích motorů jsou v případě zážehové verze stroje opatřeny zapalovacími svíčkami a tlakovými elektronickými vstřikovači plynného nebo kapalného paliva. U vznětové verze stroje jsou v hlavách tlakové vstřikovače nafty a veškeré další elementy pro zajištění optimálního spalování. Na sacím potrubí může být umístěno turbodmychadlo propojené s elektromotorem spojeným s řídicí jednotkou.

Elektrická část je složena z lehkého duraluminového rotoru s vlepenými permanentními magnety a dvou statorových vinutí po obou stranách rotoru. Statorová vinutí jsou rovněž chlazena kapalinově. Bohužel, nelze použít společný chladicí okruh termodynamickou částí stroje. Důvodem je požadavek nižší dovolené teploty pro elektrickou část (600 °C proti 1 100 °C benzinové části). Proto je elektrická část chlazena nezávislým okruhem, který je konstrukčně prakticky stejný jako okruh benzinové části. Oba chladiče jsou umístěna vedle sebe na boku stroje a každý má individuálně ovládaný ventilátor.

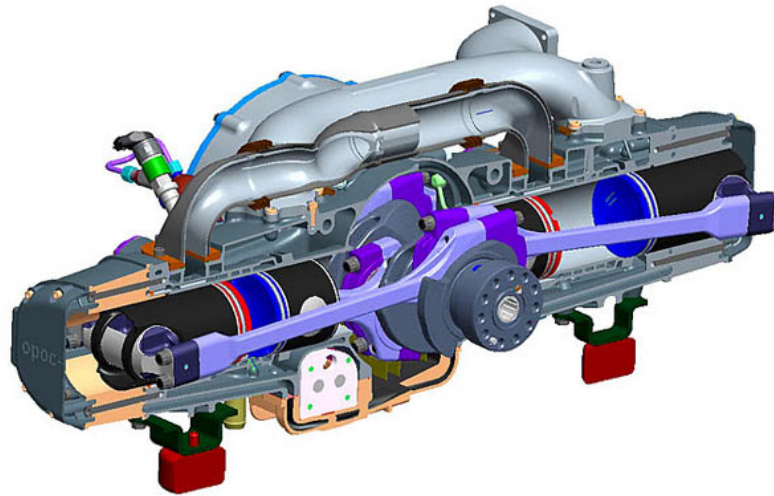
Tento motor je nadějnou jednotkou pro sériová hybridní vozidla. Pracuje při konstantních podmínkách, a pokud je odebíraný výkon menší, v jednom termodynamickém cyklu se zastavuje. Nemusí pracovat při běhu naprázdno, a když pracuje, tak v oblasti, kde vykazuje nejvyšší termodynamickou účinnost. Přechodové stavy jako rozjezd vozidla nebo rekuperační brzdění je zajištěno spoluprací s dalšími palubními zdroji s vysokou výkonovou hustotou, například se superkondenzátory.[4, 35]

## 2.2 Motor OPOC

Motor OPOC je čtyřválcový dvoudobý motor s proti sobě jdoucími písty, každý v jednom válci, které jsou taktéž umístěny proti sobě. Proti současným agregátům je výrazně menší a jeho celkové rozměry se dají velmi dobře stupňovat. Může mít výkon 55 kW a mít délku cca 400 mm a šířku 220 mm v nejširší části. Hliníková verze váží pouze 136 kg (běžné motory do auta váží třikrát víc). K dispozici by ale mohla být také miniaturní verze s výkonem 7 - 12 kW, která poslouží jako malý přenosný generátor. Takový výkon vystačí pro celý dům. Co je důležité, může pracovat na benzin, naftu, bioethanol nebo biodiesel.[3]

Zkratka OPOC znamená Opposed Pistons – Opposed Cylinders, což je koncepce známější spíše jako motor s protiběžnými písty. Někteří konstruktéři pohonných jednotek jsou toho názoru, že má dostatečný potenciál nejen prodloužit život spalovací jednotce, ale také soupeřit s dalšími alternativními koncepcemi. Svou stavbou a pracovním principem by OPOC mohl přispět k významnému snížení emisí CO<sub>2</sub> u různých druhů vozidel. Podle inženýrů americké společnosti EcoMotors International z Allen Parku, která se vývojem tohoto motoru delší čas zabývá, lze zvýšit jeho účinnost do té míry, že se spotřeba proti klasickému čtyřdobému motoru v běžném provedení sníží v rozpětí 15 – 50 %. Vedle toho je novinka lehčí, tedy s menšími prostorovými nároky (poněkud vadí pouze jeho značná šířka) a výroba může být výrazně levnější. Princip motoru OPOC oprášil Peter Hofbauer, bývalý šéf vývoje pohonných jednotek Volkswagen, který byl u zrodu prvního TDI, přeplňovaného vznětového motoru pro osobní vozy, a také netradičního agregátu VR6 s úhlem rozevření válců pouhých 15°, dovolující používat jejich společnou hlavu. Když pracoval u tak velké automobilky, nebyly na potřebné dlouhodobé experimenty podmínky, neboť byl plně vytížen jinými úkoly, ale nyní se motoru OPOC věnuje ve zmíněné společnosti EcoMotors, již v roce 2008 založil a stal se tedy jejím ředitelem.

Obr. 2: Motor OPOC.[3]



Motor s protiběžnými písty lze konstruovat v různých provedeních. Není problém využít jeden nebo dva klikové hřídele, či jej navrhnout jako zážehový nebo vznětový. Pracovat může jak s atmosférickým plněním, tak s přepříváním turbodmychadlem; zpravidla však jako dvoudobý. Jeho princip vychází z jednoho válce, v němž se proti sobě pohybují dva písty, sahá až do pionýrských dob stavby motorů. Patentován byl již v roce 1877 a první pokusný exemplář, postavený na základě tohoto patentu, je z roku 1907. Nové motory EcoMotors OPOC blízke sériové výrobě jsou typy EM 65 a EM 100; bližší technické informace ale firma zveřejnila pouze u většího typu, spalující naftu. Dvoudobá jednotka EM 100 má průměr válců 100 mm, váží kolem 135 kg a vykazuje maximální výkon 240 kW při 3 500 ot/min<sup>-1</sup> a největší krouticí moment 900 N.m při 2 100 ot/min<sup>-1</sup>. Výkonová hmotnost činí zhruba 1,8 kW/kg, což vývojáři EcoMotors označují za velký úspěch.

Inovativní stroj pracuje s přepříváním turbodmychadlem a využívá dva pracovní válce, v nichž se pohybují celkem čtyři písty. Jeho velkou předností jsou menší tepelné ztráty. Díky zdvojenému počtu zdvihů je možné snížit pracovní objem válců, což vede k menším třecím ztrátám. U dvoudobého motoru s protiběžnými písty odpadají také díly s velkou hmotností, jako jsou hlava válců nebo kompletní pohon ventilů. Navíc pro dobré vyrovnaní setrvačných sil tohoto mechanismu nejsou zapotřebí žádná dodatečná opatření a ve prospěch jednotky OPOC hovoří i snadné přizpůsobení různým druhům paliv. Jelikož ve válci pracují dva písty, každý z nich se pohybuje po poloviční dráze. Díky tomu lze zvýšit otáčky, a tím i výkon. Spolu s dalšími úpravami se tak navýší účinnost proti konvenčnímu dvoudobému motoru asi o 15 %.



Pro úplnost se musíme zmínit o komplikacích, jež přináší dvoudobý pracovní cyklus obecně, a dalších konkrétně pro uspořádání OPOC. Výfukovými kanály odchází více pevných částic než u motoru čtyřdobého, což má souvislost s větší spotřebou motorového oleje. Tuto překážku již má Peter Hofbauer údajně pod kontrolou. Lze také očekávat, že životnost pohonné jednotky může být snížena vyšším tepelným zatížením. Celý je sice velmi krátká a nízká, vadí však její nadměrná šířka. Kritické připomínky jsou i k nepříznivému tvaru spalovacího prostoru, protože vstřikovací trysky a zapalovací svíčky nemohou být umístěny uprostřed, ale pouze na boku.

Ve vývojovém stádiu je rovněž přeplňování turbodmychadlem s integrovaným elektromotorem. Plnicí tlak lze vytvářet buď prouděním výfukových plynů, anebo v kombinaci s elektromotorem, čímž se odstraní nepříjemná prodleva nástupu tlaku (turboefekt). Elektromotor se navíc může v některých fázích využívat jako generátor pro dobíjení akumulátoru.

Ve prospěch dalšího vývoje a uplatnění motoru OPOC svědčí zájem automobilových koncernů, především General Motors, Chrysler Group a Ford Motor Company. Byly uzavřeny dohody s čínským partnerem Zhongding o využití OPOC u nákladních vozů již od roku 2013 a později u osobních automobilů s plánovanou produkcí až 600 tisíc kusů ročně.[19]

## 2.3 Pětidobý motor

V motoru jsou tři válce, dva menší (vysokotlaké), které pracují v klasickém čtyřdobém cyklu a mezi nimi je jeden větší válec (nízkotlaký) pracující v dvoudobém cyklu (dochází jen k expanzi a výfuku). Spaliny, které produkují dva menší válce, nejdou do výfuku, ale jdou střídavě do válce středního (z každého jednou za 2 otáčky), kde vykonávají další práci, čímž se zvětšuje termodynamická účinnost motoru. Spaliny tedy jdou do výfuku až ze středního válce.[5]

Zkušební tříválec firmy Ilmor s přeplňováním turbodmychadlem má zdvihový objem 700 cm<sup>3</sup> a výkon je 97 kW při 7 000 ot.min<sup>-1</sup>, tj. 138 kW/l, a největší točivý moment 166 N.m při 5 000 ot.min<sup>-1</sup>. Po dokončení vývojových prací na dynamometru, týkajících se doladění rozvodu a turbodmychadla by měl dosahovat 112 kW. Podle Steveho O'Connora, manažera technického oddělení firmy Ilmor, je motor teprve na začátku vývoje. Ilmor zatím nezveřejnil údaje o složení emisí. K uvedeným výkonnostním parametrům je třeba dodat, že prototyp měl olejové a vodní čerpadlo poháněna nezávisle elektricky.

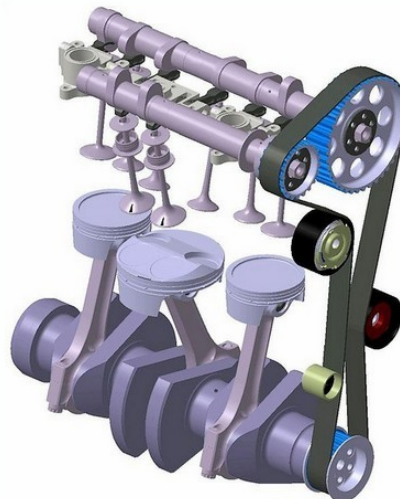
Motor pracuje se dvěma vačkovými hřídeli v hlavě válců a konvenčním rozvodem s ventily ovládanými pružinami. Vačkový hřídel vysokotlakých válců pracuje s polovičními otáčkami klikového hřídele, zatímco vačkový hřídel nízkotlakého válce se otáčí otáčkami klikového hřídele.

Celkový expanzní poměr motoru je 14,5 : 1, což v tomto případě není totéž jako kompresní poměr, a přetlak od turbodmychadla je 3 bary. Specifická spotřeba je 226 g/kW.h, což je o 10 % více než u čtyřdobého motoru o stejném výkonu. Konstrukce přináší úsporu hmotnosti asi o 20 % v porovnání se stejně výkonným konvenčním motorem. Přitom nový motor přináší zásadní výhodu v tom, že jde o zcela konvenční koncepci nevyžadující použití žádných nových výrobních technologií.[24]

Motor tedy pracuje s pěti cykly, které začínají u malých válců:

- 1) sání
- 2) komprese
- 3) expanze
- 4) výfuk z malých válců je zároveň plněním a expanzí ve středním válci
- 5) konečný výfuk ze středního válce.[5]

*Obr. 3: Pětiodobý motor.[5]*



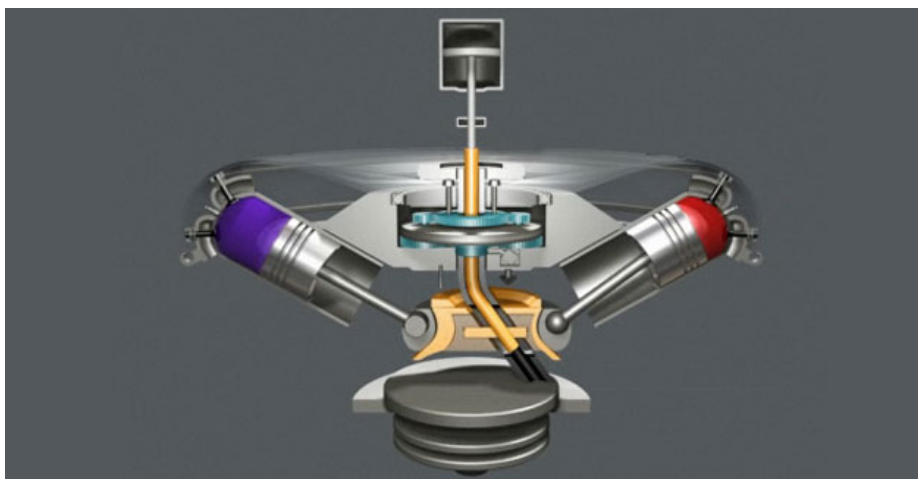
## 2.4 Hefley X2

Vynálezce Carl Hefley vlastní patent na unikátní motor s proměnlivým zdvihovým objemem. Tento motor využívá jakéhosi přesazeného klikového hřídele se vsazeným vybouleným segmentem, jenž dokáže aktivně nastavovat zdvih pístů v závislosti na aktuálních požadavcích řidiče. Zdvihový objem tím lze výrazně snížit, čímž může rapidně klesnout spotřeba paliva. Tvůrce tohoto systému tvrdí, že jej lze při stávající situaci použít do tří až osmiválcových konfigurací s rozptylem výkonu 35 – 1100 kW. Právě zkoušený prototyp bude moci spalovat více druhů paliv včetně těch „ekologických.“[6, 23]

Válce u Hefleyho motoru jsou uspořádány hvězdovitě. Nejsou však v rovině, nýbrž s ní svírají úhel zhruba 30°. Podobně jako u některých klasických hvězdicových pístových motorů pak na klikovou hřídel přenáší výkon excentr. Právě speciální konstrukce hřídele a excentru umožňují měnit zdvihový objem motoru a v upravené variantě i kompresní poměr. Hřídel má totiž kliku vytvořenou vlastně jen jednoduchým zalomením hřídele samotné. Na ní je usazen excentr, který má ale svou rovinu kolmou na osu hřídele, nikoli zalomené kliky. Po klíce se ale může excentr posouvat.

Na excentru samotném je pak nasazen ložiskový prvek, který má v sobě uloženy ojnice pístů. Tím, jak se tedy excentr posune po klíce, stáhne s sebou i ojnice. Posunem ojnic se mění délka ramena kliky a tím dochází ke změně zdvihového objemu. Zdvihový objem by se podle vynálezce měl měnit podle aktuální potřeby výkonu a také přání řidiče. V případě nepotřeby výkonu se automaticky zdvihový objem sníží, čímž klesne spotřeba motoru.

Obr. 4: Hefleyho motor X2.[6]



Vylepšená varianta motoru pak ještě umožňuje měnit i kompresní poměr. V tomto případě se ještě excentr může vždy v posunuté pozici pootočit (normálně se neotáčí) a tím změní velikost prostoru mezi hlavou pístu a hlavou válců.

Hefley navíc tvrdí, že ve variantě s proměnným kompresním poměrem lze spalovat téměř jakékoli palivo od nafty po benzín a veškerá alternativní paliva. Řidič by si prakticky kdykoli mohl vybrat libovolné palivo. I to je samozřejmě teoreticky možné, jenže pak by motor musel mít pravděpodobně několik různých vstřikovačů a palivových systémů nebo by musel být navržen vstřikovač s výrazně proměnlivými parametry a palivový systém, který by umožnil rychlou záměnu paliv.[23]

## 2.5 Split-Cycle Engine

Přes průběžné vylepšování vlastností motorů jsou cykly sání, komprese, expanze a výfuku stále aktuální. Zdá se sice, že čtyřdobý motor už nemůže přijít s nějakým zásadním konstrukčním provedením, jež by zvedlo jeho relativně nízkou účinnost, ale nemusí to být kapitola uzavřená. Američan italského původu Camillo Scuderi, specialista na kompresorovou techniku, se v devadesátých letech začal zabývat rovněž zážehovým motorem. Inspiraci našel v patentu Split-Cycle Engine (motor s rozdělenými cykly) uděleném J. Koenigovi v září 1914. Spoustu věcí však už řešil jinak, a tak vznikl rovněž patentovaný Scuderi Split-Cycle Engine, na jehož dalším vývoji pracuje nová společnost Scuderi Group od roku 2001.

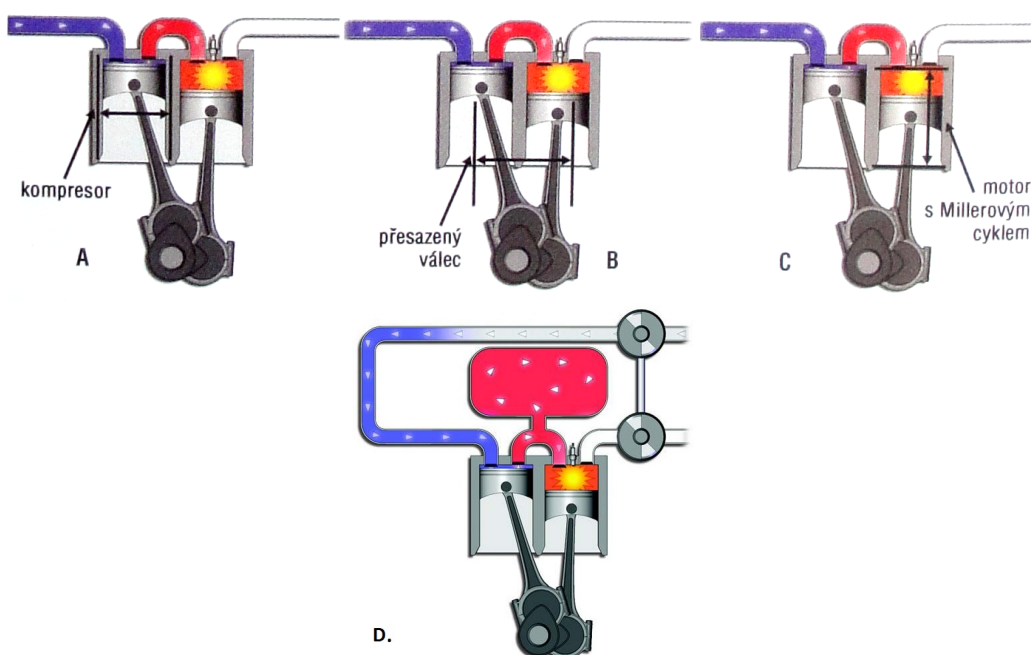
Motor Split-Cycle rozděluje čtyři pracovní doby do dvou válců. První z nich vzduch nasává, stlačuje a poněkud složitým systémem ventilů přesouvá do druhého válce. Tam vstříknuté palivo hoří a vzniklé spaliny jsou vytlačeny do výfuku. Z konstrukčního hlediska pracuje takový motor na jedné straně jako kompresor a na druhé jako spalovací komora.

Dřívější pokusy s rozdělenými motory Split-Cycle narážely na problémy malého množství nasávaného vzduchu (nízká plnicí účinnost) a malou tepelnou účinnost, takže jejich parametry nebyly srovnatelné s motory klasické konstrukce. Problémy s plněním způsoboval stlačený vzduch uzavřený v kompresním prostoru válce, který při nasávání dalšího vzduchu ve válci expandoval, aby byl vzápětí pístem opět stlačen. Promyšlenější nová konstrukce ventilů (zavírají se shora) umožňuje minimální mezeru 1mm mezi dnem pístu a hlavou válců, takže se prakticky veškerý stlačený vzduch vytlačí do převáděcího potrubí. Pokud jde o tepelnou účinnost, u Split-Cycle

dosavadní konstrukce dochází k zažehnutí směsi obdobně jako u motorů klasického provedení, tedy před horní úvratí pístu. Uvolněním stlačeného vzduchu v převáděcím potrubí dochází k jeho expanzi do pracovního válce, zatímco píst se pohybuje směrem nahoru a vzduch znova stlačuje, aby byla směs zažehnuta před horní úvratí. Jde tedy vlastně o dvojitý stlačování, které tepelnou účinnost motoru zhoršuje. U motoru Scuderi je naopak směs zažehnuta za horní úvratí, což umožňuje kombinace stlačeného vzduchu v převáděcím kanálu a velká turbulence v pracovním válci. Tlak vzduchu vytvořený kompresním poměrem 75 : 1 přesahuje u atmosférického plnění 50 barů (u běžného zážehového motoru to jsou asi 3 bary), což při proudění do pracovního válce vytváří důkladnou turbulenci a rychlost hoření v tomto prostředí překonává všechny dosud uváděné hodnoty. Kombinací vysokého tlaku s mimořádnou rychlostí se získá vyšší tepelná účinnost (údajně až o 20%) a větší výkon než má zážehový motor obvyklého uspořádání.

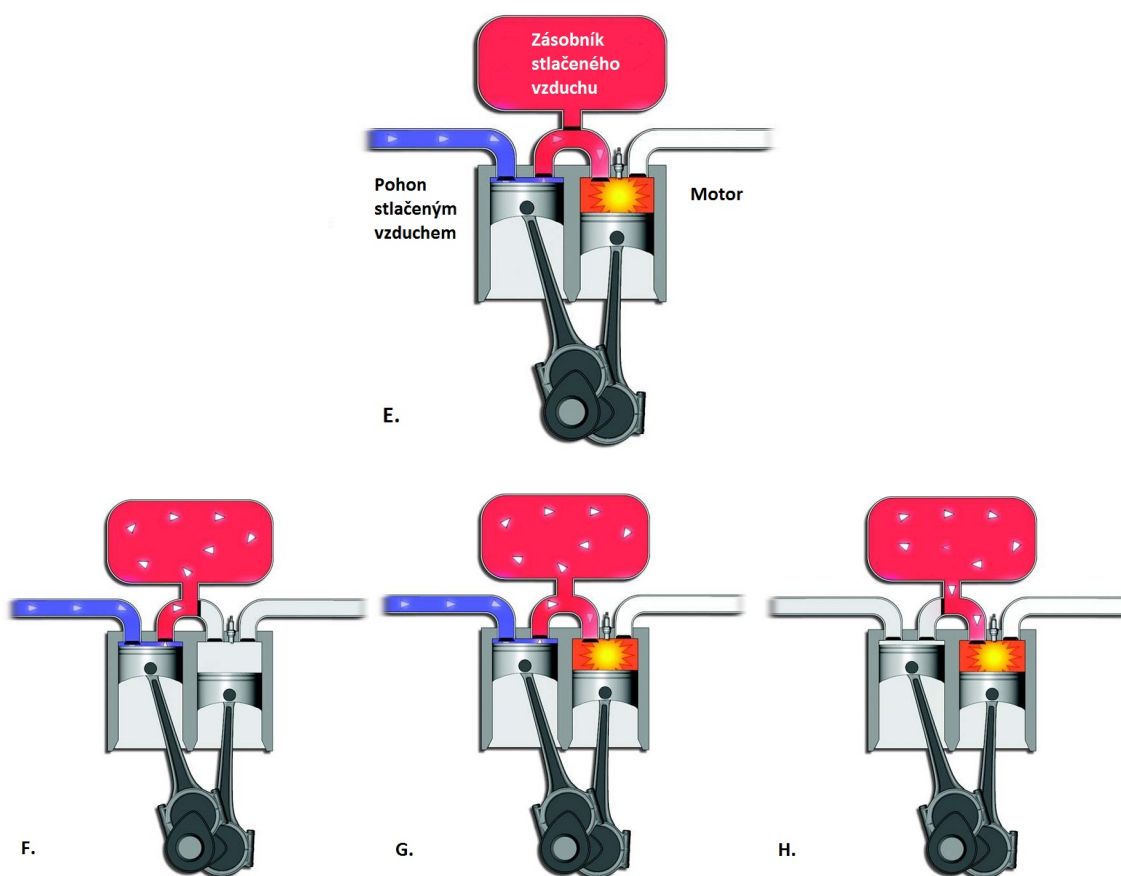
Tvůrci motoru Scuderi poukazují na jeho mimořádnou konstrukční flexibilitu – viz *Obr. 5*, kdy je možné změnou průměru kompresního válce měnit potřebné stlačení vzduchu viz (A), přesazením obou válců se zmenšuje tření mezi pístem a stěnou válce (B), prodloužení pracovního válce motor pracuje v pro spotřebu výhodném Millerově cyklu (C) s prodlouženou expanzní fází. Také není problémem přeplňování turbodmychadlem, kdy je stlačený vzduch zaváděn do kompresního válce a dále do zásobníku stlačeného vzduchu (D).

*Obr. 5: Konstrukční flexibilita.[18]*



Motor Scuderi Split-Cycle nabízí i možnost pracovat v různých režimech – viz *Obr. 6*. Vzhledem k oddělení obou válců je s využitím vzduchu v tlakové nádobě a vhodným ventilovým rozvodem možno přejít na hybridní systém, využívající kromě spalovacího motoru také ekologický pohon stlačeným vzduchem (E). Jede-li vůz setrvačností, či řidič brzdí, pracovní válec se odpojí, kompresní válec dodává vzduch do sběrné tlakové nádoby (F) a vzduch se pak využívá pro rozjezd automobilu, anebo navýšení výkonu (G). Jakmile je ve sběrné nádobě dosaženo jisté hranice tlaku, kompresní válec se odpojí a jeho energetická ztráta se minimalizuje (H).

*Obr. 6: Konfigurace motoru se zásobníkem stlačeného vzduchu.[18]*



Podle posledních zpráv se v laboratořích Scuderi Group zkouší prototyp motoru o objemu 1,0 l, jenž byl vystaven na IAA 2009 ve Frankfurtu. Zveřejnění výsledků testů motoru Scuderi Split-Cycle, provedených jak na verzi s atmosférickým plněním, tak s přeplňováním, je ale hodně povrchní. Výkon při 6 000 ot.min<sup>-1</sup> je obdobný jako u motoru běžné konstrukce (s přeplňováním však až 101 kW), účinnost při plném zatížení obvyklá (s přeplňováním o 10 - 15 % vyšší), účinnost při dílčím zatížení vyšší o 5 - 10 % (s přeplňováním o 15 - 20 %), emise Nox v obou případech nižší o 80 %, pracovní tlak v motoru 50 - 65 barů (s přeplňováním 110 - 130 barů) a vstřikovací tlak benzínu u obou způsobů plnění asi 200 barů. [18]

Firma údajně jedná se 14 z 20 největších světových výrobců o poskytnutí licence na výrobu tohoto motoru. Zda uspěje, to prozatím zůstává otázkou. Motor Scuderi totiž nemá jen samé výhody. Problémy představuje především chlazení pracovního válce. Nedochozí u něj ke klasickému proplachu čerstvým studeným vzduchem. Otázkou také zůstává, nakolik realistická je hodnota kompresního poměru 100 : 1 v prvním válci, protože tak vysoká hodnota kompresního poměru vyžaduje výrazně zesílenou konstrukci. Oba tyto problémy mohou výrazně omezit maximální otáčky agregátu. Teoretická čísla tak mohou být v praxi daleko méně optimistická.[7]

## **2.6 MCE-5 - motor s proměnnou kompresí**

Dnešní motory jsou vybaveny řadou čidel, která informují řídicí jednotku o tom, jak jejich jednotlivé funkční celky pracují, a podle toho jsou tyto funkce optimalizovány tak, aby plnily požadavky řidiče na potřebný výkon při co nejmenší spotřebě a výfukových emisích. Řídicí jednotka tedy ovlivňuje mnoho parametrů chodu motoru, ale jeden je stále mimo její účinný dosah. Jde o kompresní poměr, který patří k nejdůležitějším údajům motoru, ale konstruktéři musí při jeho volbě přejít na kompromisní řešení. Protože je kompresní poměr konstantní, znamená to u zážehové varianty motoru nepříjemnou technickou bariéru v ovlivnění tepelné účinnosti.

Stejně jako u většiny motorových technologií je i variabilní kompresní poměr VCR (Variable Compression Ratio) záležitostí, kterou principiálně řešili konstruktéři už v minulosti, ale praxe je poněkud složitější. První patent proměnné komprese z roku 1928 se do praxe vůbec nedostal. Úspěšné nebyly ani další (a nedávné) návrhy automobilek Saab, PSA Peugeot Citroën nebo Volkswagen, jež lákalo snížení spotřeby až 30 %. Jejich prototypy měly problémy s nedostatečnou životností, značnými prostorovými nároky a také vysokou hlučností, takže přednosti variability komprese přicházely nazmar, přičemž splněny nebyly ani nutné požadavky pro zavedení sériové výroby. Dnešní snahy po přiblížení funkce zážehového a vznětového motoru, tzn. u zážehového dosáhnout účinnosti vznětového a na druhé straně u vznětového snížit emise na úroveň zážehového, variabilitu komprese opět ožívují.

Francouzská společnost MCE-5 Development si po jedenáctiletém vývoji s problémem variabilní komprese údajně poradila a jako důkaz předvedla vůz Peugeot 407, osazený zážehovým řadovým čtyřválcem MCE-5 VCRi o objemu 1,5 litru s dvoustupňovým přeplňováním turbodmychadly, přímým vstřikem paliva a proměnným časováním ventilů, který dosahuje výkonu 160 kW při neuvedených otáčkách a točivém momentu 420 N.m při 1 500 ot.min<sup>-1</sup>. Kompresní poměr

je u tohoto motoru proměnný v rozmezí od 6 : 1 do 15 : 1; spotřeba v provedení roku 2009 byla v kombinovaném provozu změřena hodnotou 6,7 l /100 km, letos po dalším vývoji by měla klesnout dokonce pod 6 l/100 km (emise CO<sub>2</sub> méně než 140 g/km), přičemž výkony jsou srovnatelné s klasickým šestiválcovým motorem o objemu 3l.

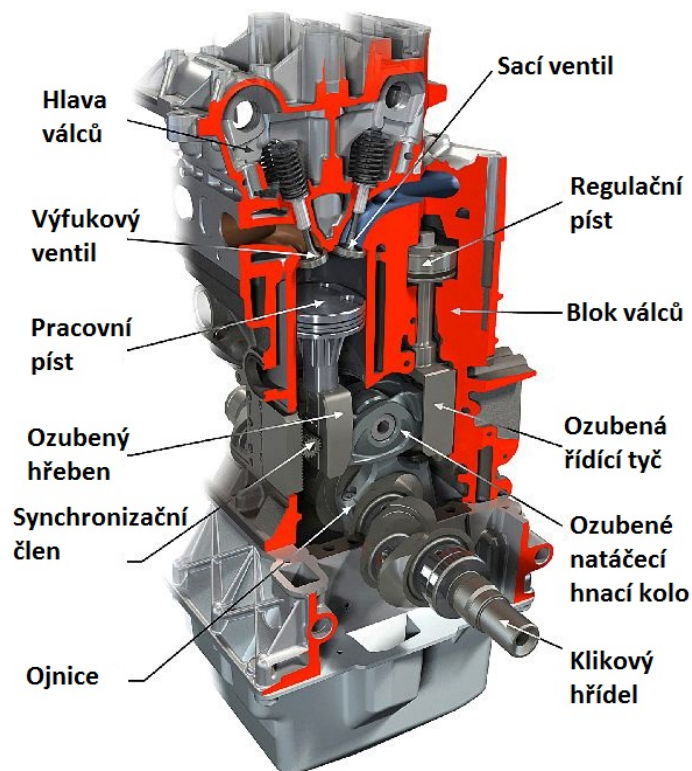
Základem revoluční technologie VCRI je změněný přenos síly z pístu na klikovou hřídel. Kliková hřídel totiž není s pístem spojena přímo ojnicí, napojení se uskutečňuje přes jakési vahadlo s ozubeným kolem.

Vahadlo je ovládáno mechanismem zabudovaným v bloku motoru a tím je umožněna změna kompresního poměru. Mechanismus pracuje na hydraulickém principu, ale k činnosti nepotřebuje žádné elektromagnetické ventily, což výrazně zvyšuje jeho spolehlivost. Pro každý válec lze navíc nastavovat kompresní poměr zcela individuálně, což u mnohých obdobných motorů nejde.

System má i další výhody. Píst je ve své dráze veden ozubenými koly, což znamená, že na něj nejsou vyvíjeny radiální tlaky, které normálně způsobuje ojnice. To znamená, že nedochází k nerovnoměrnému vybrušování válce do eliptické podoby, jako je tomu u běžných motorů. To zvyšuje životnost motoru a dovoluje použít daleko vyšší přeplňovací tlaky. Díky mechanismu přenosu síly pomocí ozubeného kola vedeného vahadlem navíc mohl být zmenšen poloměr kliky u klikové hřídele. To znamená, že hřídel může být menší, přitom je ale pevnější než v běžném motoru.[21]



Obr. 7: Řez motorem MCE-5 a popis.[22]



Prohlédneme-li si pečlivě revoluční motor s variabilní kompresí, pak uvidíme ozubený element (jeho tvůrci jej nazývají obecně ozubeným kolem), kterému je přidělena nejdůležitější role. Slouží totiž jak k přenosu točivého momentu, vyvinutého expanzí v pracovním válci, na ojnici a dále na klikový hřídel, tak k realizaci variabilního kompresního poměru. Je natáčecí a na jedné straně zasahuje do ozubené tyče (hřebenu) prodloužení pracovního pístu, na druhé straně pak do ozubené řídicí tyče, jejíž poloha je ovlivněna tlakovými poměry v motoru a určuje tak zdvih pístu pracovního válce, čímž se mění kompresní poměr. Tento přesný odlitek se musí vyrovnat nejen s mnohonásobnou změnou směru přenášené síly během jediné sekundy, přičemž silové maximum přesahuje hodnotu 550 kN. Dnes již byl vybrán materiál odpovídající vysoké odolnosti a vyvinuta optimalizovaná technologie výroby, takže při velkosériové produkci by cena tohoto dílu neměla přesáhnout 15 eur.

Obr. 8: Ozubený element.[22]



Francouzská vývojová společnost MCE-5 Development už má k dispozici prognózy o tomto motoru, na jehož vývoji, jenž dosud přišel na 30 miliónů eur, se podílelo přes 60 různých firem. Dvanáct evropských společností mezinárodního významu by mělo zajistit sériovou výrobu motoru v letech 2016 – 2017, a to v množství asi 2000 jednotek denně. Pokud nejsou čísla poněkud optimistická jak v dosažení úrovni spotřeby paliva, tak ve finanční kalkulaci na náročnější výrobu, pak lze uvažovat o snížení spotřeby v rozmezí 20 - 35 % (podle velikosti vozu) a o výrobních nákladech vyšších asi o 500 eur v porovnání obvykle řešeným zážehovým motorem (pro kompaktní osobu vůz). Proti motoru vznětovému, splňující připravenou emisní normu EU6, by se naopak údajně ušetřilo až 500 eur. Tyto výpočty ještě zmiňují, že hybridní pohon je o 3 000 - 5 000 eur dražší než odpovídající automobil s moderním zážehovým motorem. Necháme se překvapit, zda a jaké skutečné uplatnění tento revoluční motor s proměnnou kompresí najde v budoucnu.[20]

## 2.7 Wankelův motor

Felix Wankel vymyslel princip svého rotačního motoru již v roce 1951, do dnešní doby je však jeho konstrukce v sériové výrobě poměrně vzácná. Do sériové výroby se motor dostal v roce 1964 a přesto, že se nikdy významně nerozšířil, najdeme jej pod kapotou alespoň jednoho vozu prakticky nepřetržitě až dodnes.

Příčný profil vnitřku motorové skříně tvoří válcová plocha mající profil křivky zvané zkrácená epitrochoida. Tento profil zaručuje, že všechny vrcholy rotoru jsou vždy v kontaktu se stěnou tělesa. Uvnitř skříně koná krouživý pohyb píst trojúhelníkovitého tvaru, jehož boky tvoří válcové plochy tvořené třemi stejnými oblouky. V každém ze tří uzavřených objemů se uskuteční během jedné otáčky pístu pracovní oběh odpovídající oběhu klasického čtyřdobého motoru. To znamená, že během jedné otáčky pístu se vykonají tři oběhy. Vzhledem k převodovému poměru mezi pístem a výstupním hřídelem motoru 3 : 1 se hřídel otáčí třikrát rychleji než píst. Za jednu otáčku hřídele se uskuteční jeden oběh tak, jak u dvouválcového čtyřdobého motoru. Z tohoto hlediska jsou oba motory ekvivalentní.[26, 30]

Obr. 9: Wankelův motor – jednotlivé doby.[34]



Výstupní hřídel je pro každý rotor opatřen excentrickou vačkou, která zaručuje onu dráhu rotoru. O správný směr rotace se starají ozubená kola.

Narozdíl od pístového motoru, který může provádět v daném okamžiku jen jednu činnost – sání, stlačení, expanzi a pak výfuk, v případě motoru Wankel jsou všechny čtyři doby prováděny současně.

**Mezi výhody Wankelova motoru ve srovnání s klasickým pístovým motorem patří:**

- klidnější chod, neboť hlavní části jen rotují a jsou navíc dokonale dynamicky vyváženy,
- lepší ukazatele výkonové hmotnosti,
- menší zastavěný prostor,
- menší počet součástí,
- menší hmotnost,
- menší obsah Nox.

**Mezi nevýhody Wankelova motoru ve srovnání s klasickým pístovým motorem patří:**

- problémy s utěsněním spalovacích prostorů, které je zapříčiněny nízkou životností těsnících lišt,
- velké kluzné rychlosti radiálních těsnících lišt (omezují nejvyšší otáčky motoru),
- nevhodný tvar spalovacího prostoru (velký měrný povrch-vysoké tepelné ztráty),
- malá dosažitelná hodnota kompresního poměru,
- velká měrná spotřeba (důsledek nízkého kompresního poměru a malé tepelné účinnosti),
- vyšší spotřeba oleje v důsledku nutnosti mazání těsnících lišt,
- vyšší emise HC, CO a CO<sub>2</sub>. [26, 31]

Wankelův motor je poměrně vhodný pro přímé vstřikování paliva. Jednotlivé fáze spalovacího cyklu totiž paradoxně trvají déle než u klasického pístového čtyřdobého motoru, což znamená, že je zde více času na vstříknutí i několika dávek paliva. Zatím ale žádný sériový Wankel pod kapotou automobilu přímé vstřikování neměl.

Setkali jsme se s ním pouze pod kapotou konceptu Mazda Taiki. Ze stejných důvodů se zdá být wankel poměrně vhodný i pro vodíkový pohon.

Jediná z větších automobilek, která vidí potenciál v této koncepci motoru je Mazda. Už od roku 1967 investovala do vývoje značné sumy a postupem času dokázala zbavit motor s rotačním pístem většiny známých neduhů. Zůstala jen vyšší spotřeba oleje a benzínu. Nicméně na závodní dráze sklízel Wankelův motor úspěchy a například při závodu 24h Le Mans v roce 1991 s ním Mazda

787B zvítězila. Bylo to první, ale také jediné vítězství jiného než klasického spalovacího pístového motoru v Le Mans a dodnes je rotační motor Wankel používán ve voze Mazda RX-8.[8]

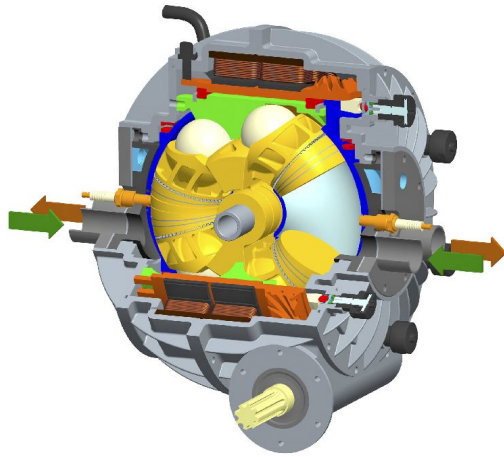
Jako poslední připravovaný model motoru je bivalentní rotační motor na vodík a benzín Mazda RX-8 Hydrogen RE. Spalování vodíku má velkou přednost u rotačních motorů, protože komprese a spalovací proces jsou v samostatných komorách, nebude tedy docházet k samovolnému vznícení vodíku od horkých částí spalovacího prostoru, jako je tomu u pístových motorů. A další výhodou je nižší kompresní poměr, který se stejně musí u vodíkových motorů snížit.[17, 30]

## **2.8 Hüttlin-Kugelmotor**

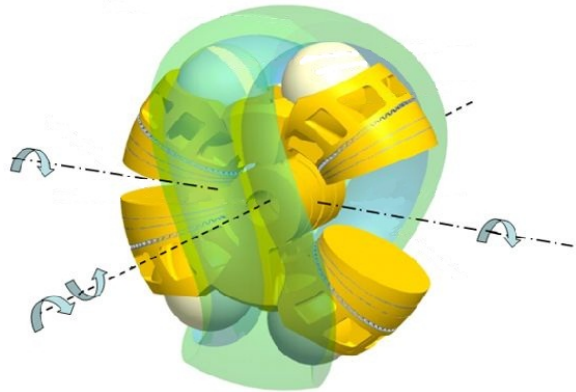
Myšlenka kulového nebo také rotačního motoru není nová, už v roce 1961 si jej patentoval Američan Frank Berry. O mnoho let později začali princip rotačního motoru rozvíjet také další. Od roku 1991 mimo jiné i Herbert Hüttlin. Ten v roce 1998 společně s dalšími partnery založil ve Švýcarsku společnost Innomot AG. Ta se má zabývat vývojem, výrobou a možnostmi komerčního nasazení motoru Hüttlin-Kugelmotor. V současné době už má vyvinuté prototypy, které se hodí pro využití v různých aplikacích, od automobilového průmyslu přes vytápění domácností až po větrné elektrárny.

Motor kulového tvaru má ve svých útrobach rotor s vybráním pro uložení dvou zdvojených zakřivených válcových pístů, do oblouku se otáčejících ve dvou rozměrných válečkových ložiscích. V kulových vybráních obou zdvojených pístů jsou dvě duté titanové koule, které se odvalují kolmo k ose systému na obou vodících drahách segmentu pevně spojeného se skříní motoru. Oba ve stejné rovině proti sobě mířící zdvojené písky vytvářejí spalovací prostory tak, aby pracovaly v rytmu čtyřdobého motoru. Rozevíráním a zavíráním zdvojených pístů dochází k odvalování rotoru, resp. koulí ve vodících drahách, čímž se získává potřebný otáčivý pohyb - viz Obr. 11 vyvedený na výstupní hřídel.

Obr. 10: Hüttlin-Kugelmotor.[9]



Obr. 11: Hüttlin-Kugelmotor – rotační pohyby.[9]



První prototyp motoru o obsahu 1,18l má výkon 74 kW při 3 000 ot.min<sup>-1</sup> a točivý moment 290 Nm. Váží 62 kg a skládá se z 62 součástí. Dr. Hüttlin navíc předpokládá, že jeho účinnost dokáže v průběhu následujících měsíců zlepšit o dalších 40 %.

Kulový motor lze využít jako hybridní jednotka Hüttlin Range-Extender, kdy je uložen spalovací motor v kulovém tělese společně s motorgenerátorem, spojený s jeho rotorem. Jednotka pracuje stále v oblasti nejlepší účinnosti a vyrobený elektrický proud je veden k elektromotorům, umístěným buď přímo v nábojích kol, anebo k trakčnímu elektromotoru určenému pro pohon obou kol jedné nápravy. Nebo v provedení hybridního pohonu (Hüttlin-Hybridmotor) už je přenos točivého momentu na hnací kola zcela konvenční přes spojku, převodovku, spojovací hřídel, diferenciál a hnací hřídele. Také u hybridu se počítá s rekuperací energie.

V současné době už má vyvinuté prototypy, které se hodí pro využití v různých aplikacích, od automobilového průmyslu přes vytápění domácností až po větrné elektrárny. S menšími konstrukčními úpravami lze princip kulového motoru využít i jako kompresor. [9, 29]

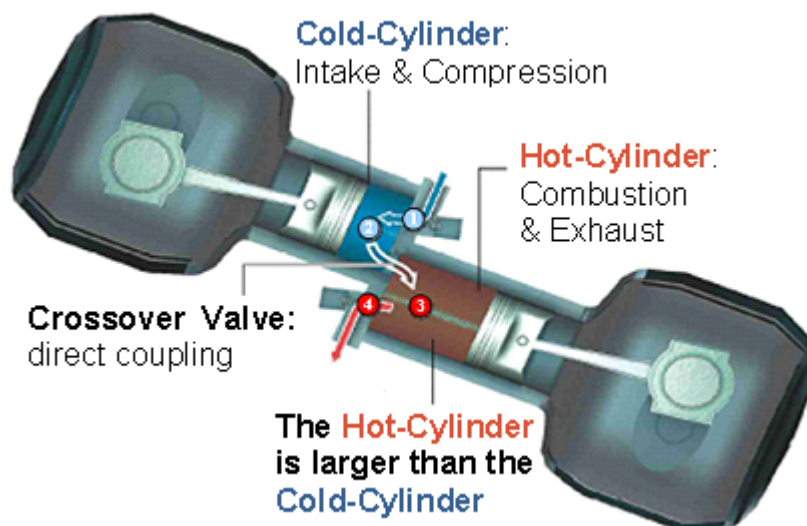
## 2.9 Tour Engine

Principiálně není Tour Engine žádnou revoluční novinkou, veškeré postupy, kterých využívá, jsou už delší dobu známy. Zajímavé je ale především technické řešení, které má přinést vysokou reálnou účinnost při poměrně jednoduché konstrukci samotného motoru. Z laického hlediska může být motor Tour jakousi kombinací již dříve popisovaných netradičních motorů OPOC a Scuderi.

Od prvního ze zmiňovaných si bere uspořádání s protilehlými písty a válci. Písty motoru tak proti sobě leží v jedné ose jako u motorů typu boxer, oproti nim je tu ale zásadní rozdíl v tom, že "hlava" válce se vlastně nachází uprostřed. Motor Scuderi pak připomíná díky filozofii, která je základem tohoto druhu motorů. Jeden válec tedy slouží pro sání a kompresi, druhý pro práci a výfuk.

Oproti Scuderi se ale Tour liší tím, že prakticky zcela eliminuje mrtvý objem přepouštěcích kanálů, který zbytečně snižuje účinnost. Toho motor Tour dosahuje právě protiběžným uspořádáním válců. Vznikne tak jedna integrovaná hlava uprostřed a dva hřídele na stranách viz Obr. 12.

Obr. 12: Tour Engine – základní uspořádání.[10]

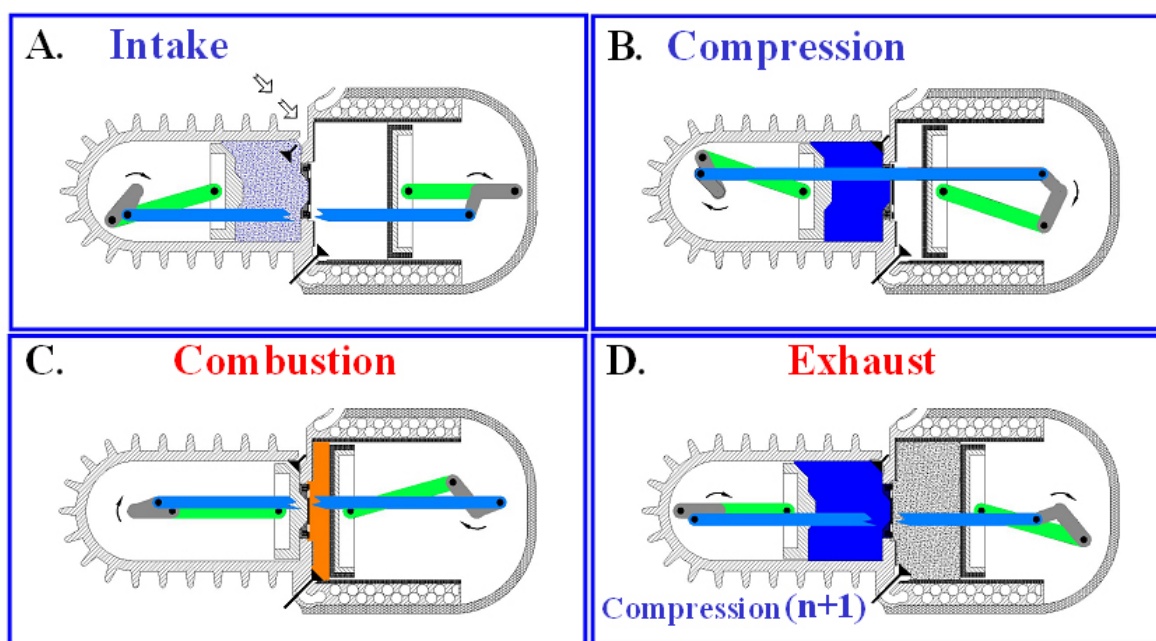


Jednotlivé válce k sobě nepřiléhají přesně v ose, jsou trochu přesazené. To aby se vždy na kraj hlavy vešel ventil. Jeden z válců má pouze sací ventil, druhý válec pak zase jenom ventil výfukový.

Pracovní cyklus je následující: první válec nasaje vzduch a stlačí jej s kompresním poměrem 8 : 1. Během stlačování se asi ve třech čtvrtinách zdvihu otevře plochý přepouštěcí ventil a stlačený vzduch začne proudit do druhého, pracovního válce. Asi při čtyřech pětinach kompresního zdvihu je do pracovního válce vstříknuto palivo, které se mísí se vzduchem díky vysoké turbulenci. Po dokončení kompresního zdvihu zůstává ventil stále otevřen, stlačený vzduch nadále proudí do pracovního válce. V tuto chvíli je směs paliva se vzduchem zažehnuta. Přepouštěcí ventil se zavírá až chvíli po zážehu, kdy už je veškerý vzduch vpuštěn do pracovního válce a za vysokých tlaků probíhá expanze.

Expanzní poměr druhého válce je v případě prototypu 16 : 1, tedy dvakrát větší než poměr kompresní. To podobně jako u motorů s Atkinsonovým cyklem pomáhá lépe využít veškerou energii spalované směsi a více z ní přetvořit v energii kinetickou. Během expanze pracovního pístu už kompresní píst opět nasává vzduch a připravuje se na další cyklus.

Obr. 13: *Tour Engine* – jednotlivé doby.[10]



V současné konfiguraci má motor tepelnou účinnost asi 50,6 %, což je v porovnání se zhruba maximálně 40 % u běžných spalovacích motorů výrazný nárůst. Simulace přitom prý ukazují, že při zvětšení expanzního poměru na trojnásobek poměru kompresního (tedy v případě prototypu na 24 : 1) by účinnost měla stoupnout na zhruba 55,6 %.



Výhodou motoru Tour je také poměrně jednoduchá konstrukce. Jedinou komplikací je nutnost propojení výstupní klikové hřídele pracovního válce s hřídelí válce kompresního. Technici také pracují na dokonalejším přepouštěcím ventilu, který se musí otevírat a zavírat co nejrychleji a nemá působit jako nežádoucí škrticí prvek. Ventil má být také co nejmenší, co se zástavbových poměrů týče, čímž se dosáhne minimalizace mrtvého objemu.

Tour Engine také velmi zjednodušuje chlazení. Kompresní válec nemusí být chlazen vůbec, nároky na chlazení válce expanzního pak nejsou tak vysoké jako v případě běžných motorů. Díky výrazně větší expanzi se totiž válec ochladí sám.

Podle autorů jde motor snadno přizpůsobit téměř jakémukoli palivu a podle potřeby se kompresní poměr může pohybovat i třeba na úrovni 20 : 1. Tour Engine tedy může fungovat i jako vznětový motor, což by opět mohlo zvýšit celkovou účinnost.

Nevýhody příliš autoři nezmiňují, ale jistě jich bude také několik. Téměř jistě nebude podobný motor žádný vysokootáčkový stroj, takže je otázkou, jak moc vhodný bude pro přímý pohon automobilu.

Tour Engine by ale díky vysoké účinnosti a naladění na ideální otáčky mohl fungovat jako jednoduchý a spolehlivý generátor v takzvaných elektromobilech s prodlouženým dojezdem. Právě v takovém případě by se asi nejvíce projevila úspora paliva, snížení emisí CO<sub>2</sub>, ale i emisí nespálených uhlovodíků a oxidu uhelnatého a oxidů dusíku. O snížení spotřeby se stará především vyšší účinnost. Emise CO<sub>2</sub> a nespálených uhlovodíků klesají díky dokonalejšímu spálení směsi prodloužením expanzního zdvihu a emise oxidů dusíku by měly klesnout oproti běžným spalovacím motorům vlivem nižších teplot při spalování.

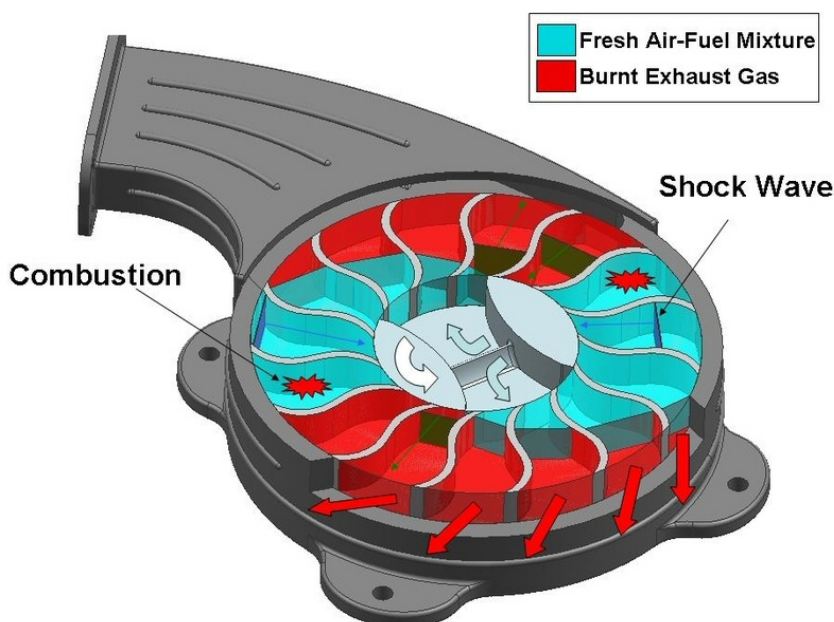
Společnost Tour Engine Inc. momentálně jedná s řadou automobilek o možnostech využití a společného vývoje jejího vynálezu.[11]

## **2.10 WDG (Wave Disc Generator)**

Motor z dílen Michiganské státní univerzity nenahradí běžné spalovací motory, je určen pouze pro hybridní automobily. Má vysokou účinnost, nízké emise, je lehký. Má být levný a dokáže pracovat s různými druhy paliva, včetně vodíku.

Wave Disk Generátor (WDG) patří mezi turbínové motory, které využívají tlak expandujících plynů na lopatky oběžného kola rotoru. Tato technologie není nová, spatřila světlo světa už v roce 1906. Převážnou část dosavadních aplikací (1940 - Brown Boveri Company - vysokotlaká plynová turbína pro pohon lokomotiv, 1986 - turbodmychadla Comporex pro automobily, plynové turbíny v elektrárnách, mikroturbína použitá pro pohon automobilu, letecké motory) tvoří ovšem axiální turbíny, kde spaliny proudí ve směru osy otáčení přes lopatky oběžného kola. Naproti tomu v radiální turbíně vstupuje plyn ve středu rotoru a proudí mezi lopatkami kolmo k ose otáčení směrem k obvodu turbíny.[13]

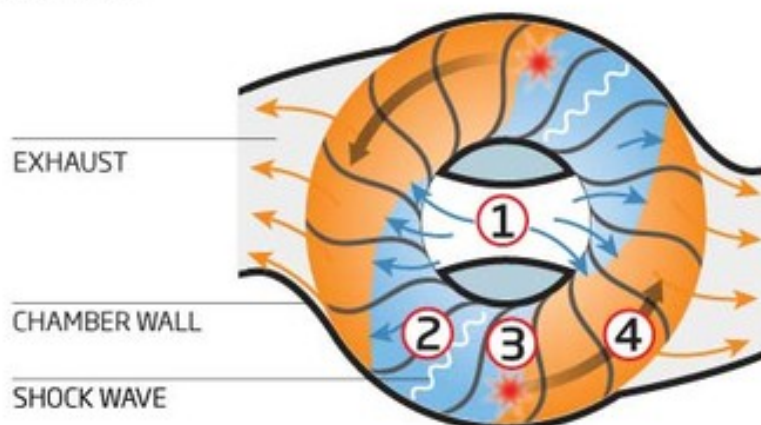
Obr. 14: WDG – směry proudění.[14]



Výzkumný tým předvedl prototyp motoru grantové komisi amerického ministerstva energetiky v březnu a počítá, že do konce roku (2011) bude mít připravenou produkční verzi motoru s výkonem 25 kW. Ta by již mohla do sériové výroby. Přesto nelze očekávat, že se diskový motor-generátor objeví v autech už během dalšího roku.

Motor má tvar disku, ve kterém je turbína s esovitě prohnutými lopatkami. Palivo se vzduchem přichází ze středu, na obvodu jsou pak dva výfukové kanály. Jakmile se směs paliva a vzduchu pootočením rotoru dostane do uzavřené části komory, vzroste tlak a vznikne rázová vlna. Ta následně natlakovanou směs paliva zažehne a dalším pootočením rotoru se plyny dostanou do výfukového kanálu, kterým plyny opustí vysokou rychlostí motor a zachovávají tak jeho pohyb.

Obr. 15: WDG – jednotlivé fáze.[14]



Podle výzkumného týmu motor dokáže přeměnit až 60 % paliva na energii, u konvenčních pístových motorů je to přitom jen okolo 15 %. S tím souvisí i výrazně nižší emise, podle autorů jsou až o 90 % nižší. Výhodou diskového motoru je absence mnoha pohyblivých částí, které má klasický pohon automobilů, snižuje se tak ztrátové tření. Motor nemá písty, ventily a s nimi související rozvody a není zde ani převodovka nebo kliková hřídel. Odpadá také vodní chladicí systém a systém olejového mazání, které jsou u pístových motorů nezbytné. Na vysoké účinnosti se výrazně podílí i optimalizovaný tvar kanálů mezi lopatkami rotoru.[12, 13]

Na druhou stranu se u takového motoru mnohem obtížněji regulují otáčky. I z tohoto důvodu má být motor určen jako generátor elektrické energie pro hybridní automobily, nikoliv pro přímý pohon jako je tomu u konvenčních pohonných jednotek. Kombinace elektrického pohonu se spalovacím generátorem elektrické energie je navíc dnes často zmiňovaný a (do budoucna) preferovaný způsob pohonu hybridních automobilů.

Současně prodávané hybridní automobily, jako je třeba Toyota Prius, totiž kombinují elektrický pohon a tradiční pístový motor. Oba motory jsou ale spojené s převodovkou a pohání přímo kola. S ohledem na malou kapacitu baterií tak současné hybridní auto stále po většinu jízdy používá k pohonu konvenční pohonnou jednotku.

Kombinací elektrického motoru a diskového generátoru WDG by tak odpadla část pohonného ústrojí, čímž by se snížila hmotnost celého auta. Podle výzkumného týmu by se mohlo ušetřit až 500 kg.[12]

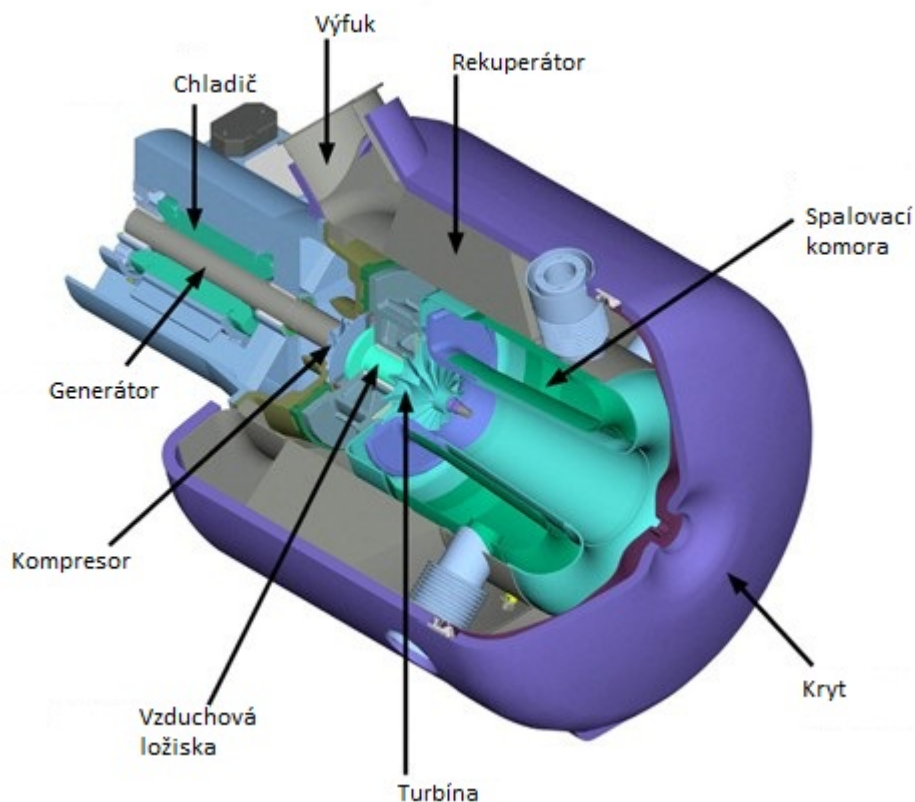
## 2.11 Mikroturbína Capstone

Tento miniaturní tryskový motor, který dosahuje až  $96\,000\text{ ot.min}^{-1}$ , je překvapivě tichý, splňuje přísnou emisní normu státu Kalifornie a v nouzi, při výpadku elektrické sítě, lze zaparkovaný vůz použít jako generátor pro napájení rodinného domu elektrickou energií.

Tento inovativní pohon byl předveden na autosalonu Auto Show v Los Angeles, a to na prototypu sportovního vozu CMT-380 s hybridním pohonem. Jedná se o sportovní elektromobil s akumulátory, jejichž dobíjení zajišťuje právě generátor poháněný mikroturbínou.

Použitá mikroturbína Capstone C30 o výkonu 30 kW je již delší dobu používána pro pohon hybridních autobusů. Ke svému pohonu může použít většinu komerčních paliv, jako jsou benzín, nafta, bionafta, etanol, metanol, tryskové palivo, propan a stlačený zemní plyn. Verze turbíny poháněné zemním plynem se uplatňují například v záložních generátorech, silnější verze až do výkonu 1 MW se používají k výrobě elektrické energie v bioplynových stanicích a plynových elektrárnách. Účinnost turbíny se pohybuje mezi 15 - 30 %. Avšak v kombinované výrobě tepla a elektrické energie tzv. kogenerační systém, lze dosáhnout účinnosti vyšší než 80 %.[15, 17]

Obr. 16: Mikroturbína Capstone C30 – popis.[16]



Díky kompaktnímu řešení, kdy elektrický generátor, kompresor i turbína jsou na jedné hřídeli, je C30 lehčí než spalovací motor se srovnatelným výkonem. Celá mikroturbína je chlazená nasávaným vzduchem, takže nepotřebuje vodní chlazení. Vzduch pod tlakem slouží i jako "mazivo" v ložiscích hřídele, neboť jsou využity tzv. vzduchová ložiska. U těchto ložisek je ztráta výkonu ve vysokých otáčkách 0,5 % oproti kuličkovému ložisku, kde je 5 - 10 %. I spolehlivost vůči kuličkovému ložisku je dvacetinásobně větší.[17, 19]

Nespornou výhodou mikroturbíny je ovšem kontinuální spalování a vysoké otáčky, které zajišťují výborný poměr výkonu ke hmotnosti. Právě díky kontinuálnímu spalování má mikroturbína nízké emise a splňuje i emisní standardy státu Kalifornie (Partial Zero Emissions Vehicle - PZEV) i amerického úřadu EPA 2010 a to i bez použití katalyzátoru či jiné úpravy výfukových plynů. Mikroturbíny na naftu vytváří emise NOx výrazně nižší než tradiční spalovací motor a vyžadují méně údržby.[17, 19]

Elektrická energie vyrobená mikroturbínou slouží k dobíjení lithio-polymerových akumulátorů. Ty je možné dobíjet doma i v dobíjecích stanicích. Na plně nabité akumulátory vůz ujede 130 km. Při určité úrovni vybití je automaticky spuštěna mikroturbína, která začne akumulátory dobíjet a tím se prodlouží maximální dojezd až 800 km.

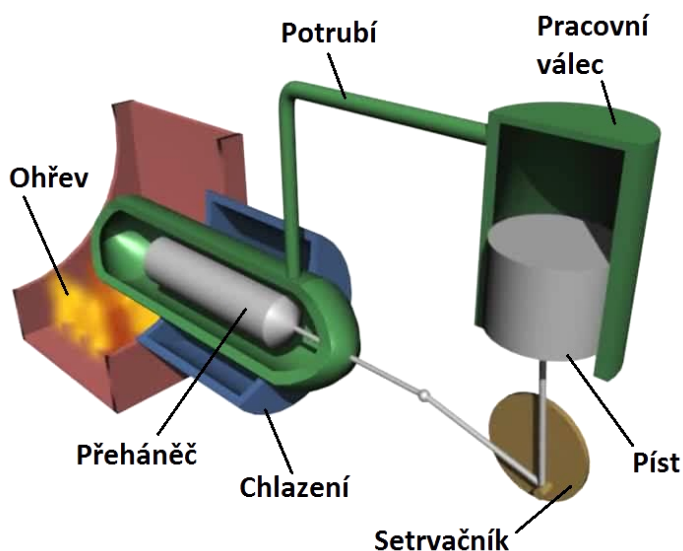
Spotřeba vozu při plném výkonu a současném dobíjení baterií se pohybuje v rozmezí 5,3 - 6,2 l/100 km, při režimu jízdy 50 % dobíjení baterií ku 50 % jízdy na baterie je výsledná spotřeba 3,14 l/100 km. Přepočtená hodnota spotřeby při provozu pouze na energii z baterií (tj. bez dobíjení mikroturbínou) vychází na 1,12 l/100 km nafty.[15]

## **2.12 Stirlingův motor**

Stirlingův motor vynalezl v roce 1816 skotský pastor Robert Stirling. Motor má dva pracovní prostory, mezi nimiž může volně proudit plyn. Jeden z prostorů je studený, druhý horký. Toho je docíleno buď přímým ohříváním a chlazením komor, nebo, a to častěji, vnějším ohřívacem a chladičem. Může být motorem spalovacím s vnějším spalováním nebo využívat tepelný rozdíl získaný jiným způsobem (odpadní teplo, geotermální energie, sluneční energie aj.).

Motor se skládá z dlouhého válce, v němž se s velkou vůlí pohybuje lehké duté uzavřené těleso, tzv. přeháněč. Jedna strana tohoto válce je ohřívána (např. ohněm), druhá je chlazená (např. vodou). Ve válci je uzavřeno jisté množství plynu. Nyní přesuneme přeháněč uvnitř válce směrem doprava. Téměř veškerý plyn ve válci obteče přeháněč a nashromáždí se vlevo. Protože je tato část válce vyhřívána, ohřeje se i plyn. Plyn má snahu se rozpínat. Tím se zvýší jeho tlak. Plyn o tomto vyšším tlaku je potrubím veden do pracovního válce, kde tlačí na píst a přes klikový mechanismus roztáčí setrvačnick. Tím koná práci. Jenže na stejnou kliku je napojena ojnice pohybující přeháněčem. Ještě dříve, než píst pracovního válce dokončí zdvih a ocitne se ve spodní úvratě, přesune se přeháněč v ležatém válci vlevo. Tím odtud vytlačí horký plyn. Ten obteče přeháněč doprava do studené části válce. Tam se ochladí, jeho tlak výrazně poklesne i pod úroveň okolního atmosferického tlaku. V celém válci nastane podtlak. Podtlak se potrubím přenesse i do pracovního válce a nasaje píst zpět do horní úvratě. Tím se ovšem opět koná práce a roztáčí setrvačnick. Jeden pracovní cyklus je dokončen. Setrvačnick se však otáčí dál a přesouvá přeháněč opět doprava. Tím se studený vzduch dostává opět vlevo do ohřáté komory, ohřeje se a zvýší svůj tlak. To se stále periodicky opakuje a motor se trvale otáčí.[17, 26]

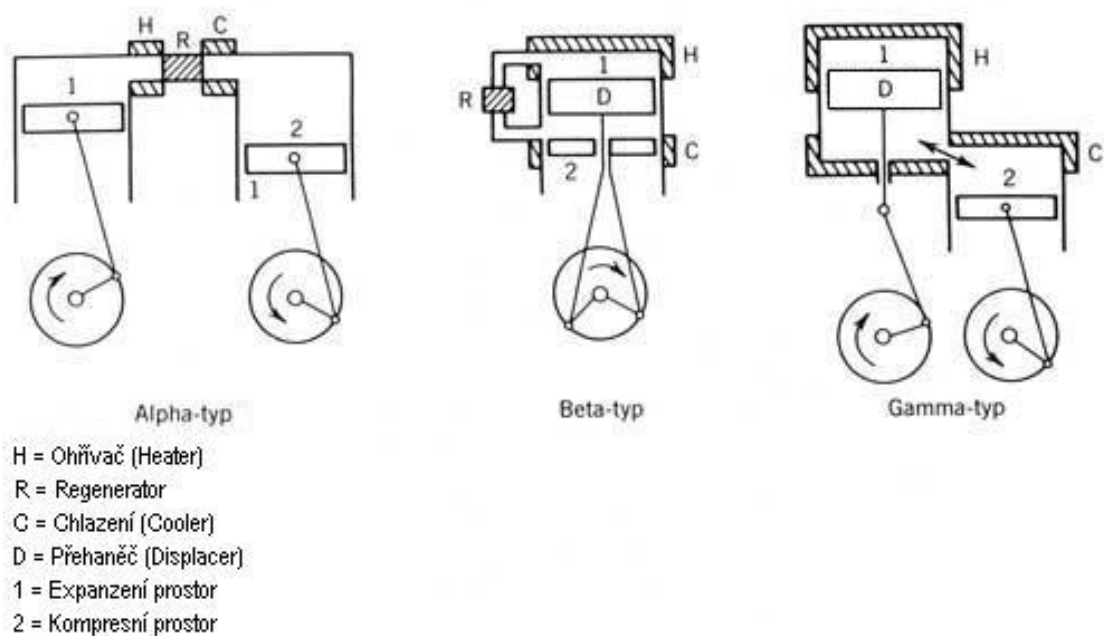
Obr. 17: Popis konstrukce základního principu.[28]



Tohoto motoru existuje mnoho modifikací – písty mohou být v samostatných válcích, nebo v jednom válci společném, kdy jeden z pístů pracuje v dvojčinném režimu.

Mechanickou konfiguraci motoru Stirling je možno obecně rozdělit do tří skupin známých jako  $\alpha$ ,  $\beta$  a  $\gamma$ . Motor  $\alpha$  má dva písty v samostatných válcích, které jsou spojeny v sérii zapojeným ohřivačem, regenerátorem a chladičem. Oba systémy motoru  $\beta$  a  $\gamma$  potřebují řídicí pístové uspořádání,  $\beta$  motor s oběma písty v jednom válci, zatímco motor  $\gamma$  používá oddělené válce.[17]

Obr. 18: Základní typy mechanické konfigurace.[25]



Motor  $\alpha$  je nejjednodušší uspořádání Stirlingova motoru, ale má nevýhodu v tom, že oba písty musí mít těsnění obsahu pracovního plynu.

Motor  $\beta$  je klasický Stirlingův motor, který se těší popularitě od jeho vzniku až do dneška. Toto uspořádání je vlastně patentem Stirlinga z roku 1816, na který G. Schmidt učinil první rozumné analýzy v roce 1871.

Motor  $\gamma$  má pracovní a řídicí píst, podobně jako  $\beta$  motor, ale ve dvou válcích. To umožňuje pohodlné, úplné oddělení výměníku tepla válce kompresního a expanzního, které mívají o něco větší mrtvý objem, než motory  $\alpha$  nebo  $\beta$ . Navíc průběh procesu expanze probíhající v kompresním

prostoru vede ke snížení měrného výkonu. Motor  $\gamma$  je proto oproti motoru, který má samostatné válce nevýhodný.[17]

Současné aplikace používající Stirlingův motor směřují především ke kombinované výrobě elektrické a tepelné energie. Jako zdroje tepla pro ohřívák se nejčastěji používá spalování nejrůznějších paliv, a to většinou plyných (zemní plyn, LPG, bioplyny). Začínají se objevovat informace o připravovaných aplikacích spalujících biomasu, ale žádná firma zatím nenabízí komerční produkt. Největší budoucnost Stirlingova motoru je bezesporu ve výrobě elektrické energie právě z odpadního tepla z technologických procesů a z obnovitelných zdrojů energie, jako je např. biomasy či sluneční záření. V případě použití biomasy je výhoda Stirlingova motoru v tom, že spalování probíhá vně motoru, což je výhodnější ve srovnání s klasickými pístovými motory či turbínami, kdy spaliny působí přímo na píst či lopatky stroje. V případě slunečního záření je zase Stirlingův motor jediným pístovým motorem, který dokáže teplo slunečního záření přeměnit přímo na elektrickou energii. Navíc dosahuje v porovnání se solárními elektrovoltaickými panely vyšší účinnosti.[27]



### 3. Shrnutí

V této bakalářské práci byly popsány současný stav vývoje motorů, druhy motorů včetně jejich konstrukce a možnosti využití se zaměřením na jejich výhody a nevýhody v praktickém použití.

Práce vytváří přehled spalovacích motorů, které buď výrazně vylepšují stávající konstrukci klikového mechanismu motoru, nebo jsou z konstrukčního hlediska naprosto odlišné. Většina motorů má nesporné výhody především v oblasti účinnosti a s tím i souvisejícími emisemi (OPOC, Scuderi). Bohužel spousta z nich má omezený rozsah užitečného výkonu (Tour Engine, WDG), nebo nemají výstupní hřídel pro přenos točivého momentu (Lineární motor). Proto se s nimi počítá jako se zdrojem elektrické energie do elektromobilů s prodlouženým dojezdem, nikoliv pro přímý pohon jako je tomu u konvenčních pohonných jednotek. Kombinace tohoto hybridního pohonu, kdy je použito elektromotorů k pohonu kol a spalovacího generátoru elektrické energie je navíc dnes často zmiňovaná a (do budoucna) preferovaná koncepce automobilů.

Naopak jiná konstrukční řešení umožňují použití alternativních zdrojů energie, ať už se jedná o biopaliva, vodík, stlačený vzduch nebo sluneční energii (Stirlingův motor) a dokonce jejich záměnu v provozu podle daných podmínek jízdy. To buď změnou kompresního poměru (MCE-5, Hefleyho motor) nebo konstrukcí nezávislé na typu paliva (mikroturbína Capstone).

## 4. Závěr

Největší část automobilů, které dnes spatříme na ulicích, jsou poháněna stejně jako dříve klasickým spalovacím motorem. Nepřetržitá oblíbenost tohoto typu motoru není žádná náhoda: nabízí nejvyspělejší techniku, nejvyšší dojezd, vysoký komfort a to vše za dostupnou cenu. Přesto ale budou mít auta s benzínovým nebo dieselovým motorem stále vysoké emise a v dlouhodobém horizontu se budou potýkat s velmi nepříjemnou závislostí na ropě.

Odpovědí na tuto situaci je neustálé zlepšování současných palivových forem (biopaliva) a také vývoj forem nových: od hybridních pohonů, přes palivové články až k elektromobilům.

Vedle dalšího vývoje spalovacích motorů automobilky již několik let pracují na možnosti přechodu k alternativním zdrojům energie. Největší krok k masové produkci již v tomto smyslu mají za sebou tzv. hybridy. Hybridní automobil kombinuje spalovací motor s elektromotorem. Cílem je snížení spotřeby a emisí. Rychlejší přísun cenově dostupných hybridů na masový trh, než je tomu u aut poháněných pouze baterií, spočívá v tom, že technologie hybridů vychází z již ozkoušených postupů.

Přednosti mají hybridy oproti spalovacím motorům zejména v městském provozu: při krátkých úsecích, malých rychlostech a častějším brzdění dochází k efektivní spolupráci obou typů motorů. Například energie vzniklá při brzdění může být s pomocí hybridní technologie získána zpět a uložena do baterie. A naopak u větších vzdáleností a při vyšších rychlostech pracuje především klasický spalovací motor, což má za následek zvýšení spotřeby paliva, protože váha elektromotoru je zde jen jako zátěž navíc.

Dnes můžeme na silnicích vidět hybridy druhé generace. Jejich baterie je výkonnější a auto může být nabíjeno přímo ze zásuvky. Tyto hybridy mají také spalovací motor, který ale slouží pouze k vytvoření elektrické energie pro baterie a tím k prodloužení dojezdu vozu.

Velký potenciál je připisován elektromobilům, které jsou plně napájeny pomocí proudu z baterie. Zejména v městských aglomeracích s hustým provozem, a tudíž množstvím emisí, mohou elektromobily přispět k znatelnému odlehčení životnímu prostředí a zvýšení kvality lidského života. Během jízdy elektromobilu nevznikají žádné přímé emise, ale logicky musejí vznikat emise nepřímé. Tyto nepřímé emise vznikají v elektrárnách. Tudíž chceme-li nazývat elektromobily ekologickým dopravním prostředkem, musíme zajistit, aby tomu odpovídala i výroba energie.

Mimo to se elektromobily se svým současným dojezdem cca 150 km hodí především pro kratší vzdálenosti, které uskutečňujeme ve městech.

Dokud dojezd nepřekračuje rámec naší cesty, představují elektromobily skutečnou a reálnou alternativu již dnes. Elektromobily se také proto postupně stávají středem pozornosti.

## 5. Seznam použité literatury

1. Spalovací motor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 12. 3. 2012 [cit. 2012-03-17]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/Spalovac%C3%AD\\_motor](http://cs.wikipedia.org/wiki/Spalovac%C3%AD_motor).
2. *Lceproject* [online]. 2006 [cit. 2011-03-05]. LCE. Dostupné z: <http://www.lceproject.org>.
3. *Hybrid.cz* [online]. 4. 8. 2010 [cit. 2011-03-05]. Bill Gates investoval do výrobce revolučních úsporných motorů. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/novinky/bill-gates-investoval-do-vyrobce-revolucnich-uspornych-motoru>.
4. VYSOKÝ, Petr a Ondřej VYSOKÝ. Řízení spalovacího motoru. *Automatizace* [online]. 1. 4. 2006, roč. 49, č. 4 [cit. 2011-03-05]. Dostupné z: <http://www.automatizace.cz/article.php?a=1182>.
5. *Moto-svet.cz* [online]. 31. 8. 2009 [cit. 2011-03-05]. Pětitačtní motor Ilmor. Dostupné z: <http://www.moto-svet.cz/technika/novinky-z-techniky/petitaktni-motor-ilmor.html>.
6. *Autorevue.cz* [online]. 3. 4. 2009 [cit. 2011-03-05]. Hefley vyvinul motor s proměnným zdvihovým objemem. Dostupné z: <http://www.autorevue.cz/hefley-vyvinul-motor-s-promennym-zdvihovym-objemem>.
7. VOKÁČ, Luděk. Motor Scuderi: jeden válec pro sání a kompresi, druhý pro práci. *Idnes.cz* [online]. 2. 8. 2009 [cit. 2012-03-04]. Dostupné z: [http://auto.idnes.cz/motor-scuderi-jeden-valec-pro-sani-a-kompresi-druhy-pro-praci-p57-/automoto.aspx?c=A090426\\_132238\\_automoto\\_vok](http://auto.idnes.cz/motor-scuderi-jeden-valec-pro-sani-a-kompresi-druhy-pro-praci-p57-/automoto.aspx?c=A090426_132238_automoto_vok).
8. *Autoweb.cz* [online]. 2010 [cit. 2011-12-29]. Wanklův motor s rotačním pístem. Dostupné z: <http://www.autoweb.cz/autonovinky-nova-auta/wankeluv-motor-s-rotacnim-pistem/18027/>.
9. BISKUP, Pavel. Hüttlin-Kugel Motor - Tajemná koule. *Automobil revue*. 2011.
10. *Tour Engine Inc.* [online]. [cit. 2012-02-17]. Dostupné z: <http://www.tourengrine.com>.

11. VOKÁČ, Luděk. Fyzice navzdory: motor s oddělenými cykly slibuje vysokou účinnost. [online]. 2. 11. 2011[cit. 2012-02-17]. Dostupné z: [http://www.auto.idnes.cz/fyzice-navzdory-motor-s-oddelenymi-cykly-slibuje-ucinnost-az-55-psr-/automoto.aspx?c=A111023\\_171338\\_automoto\\_vok](http://www.auto.idnes.cz/fyzice-navzdory-motor-s-oddelenymi-cykly-slibuje-ucinnost-az-55-psr-/automoto.aspx?c=A111023_171338_automoto_vok).
12. NOVÁK, Adam. Naděje pro hybridy: turbínový motor vyrobí energii efektivně. *IDNES.cz* [online]. 2011[cit. 2012-02-26]. Dostupné z: [http://auto.idnes.cz/nadeje-pro-hybridy-turbinovy-motor-vyrobi-energii-efektivne-pt0-/ak\\_aktual.aspx?c=A110422\\_010928\\_ak\\_aktual\\_ada](http://auto.idnes.cz/nadeje-pro-hybridy-turbinovy-motor-vyrobi-energii-efektivne-pt0-/ak_aktual.aspx?c=A110422_010928_ak_aktual_ada).
13. Konec éry pístových motorů. *Infojet.cz* [online]. 2011[cit. 2012-02-26]. Dostupné z: <http://www.infojet.cz/index.php/clanky/scitech/1212-konec-ery-pistovych-motoru>.
14. *Michigan State University* [online]. [cit. 2012-02-26]. Dostupné z: <http://www.msu.edu>.
15. 96 tisíc otáček za minutu. *Infojet.cz* [online]. 16. 12. 2009[cit. 2012-03-03]. Dostupné z: <http://www.infojet.cz/index.php/clanky/scitech/1036-cmt-380-hybrid-96-tisic-otacek-za-minutu>.
16. Capstone Turbine Corporation. [online]. [cit. 2012-03-03]. Dostupné z: <http://www.capstoneturbine.com>.
17. KAMEŠ, Josef. *Speciální motorová vozidla*. Vyd. 2. V Praze: Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta, 2002, 193 s. ISBN 8021308958.
18. BISKUP, Pavel. Další pokus: revoluční motor Scuderi. *Automobil revue*. 2010, roč. 54, č. 3. DOI: 1211-9555.
19. BISKUP, Pavel. Dva proti sobě: Ecomotors OPOC-Motor. *Automobil revue*. 2011, roč. 55, č. 11. DOI: 1211-9555.
20. BISKUP, Pavel. S proměnnou kompresí: revoluční motor MCE-5. *Automobil revue*. 2010, roč. 54, č. 2. DOI: 1211-9555.

21. VOKÁČ, Luděk. Unikátní motor 1,5 litru: výkon šestiválce, spotřeba 6 litrů. *Idnes.cz* [online]. 13. 3. 2009[cit. 2012-03-04]. Dostupné z: [http://auto.idnes.cz/unikatni-motor-1-5-litru-vykon-sestivalce-spotreba-6-litru-pmj-/automoto.aspx?c=A090228\\_182905\\_automoto\\_vok](http://auto.idnes.cz/unikatni-motor-1-5-litru-vykon-sestivalce-spotreba-6-litru-pmj-/automoto.aspx?c=A090228_182905_automoto_vok).
22. MCE-5 DEVELOPMENT. [online]. [cit. 2012-03-04]. Dostupné z: <http://www.mce-5.com/>.
23. VOKÁČ, Luděk. Motor s proměnlivým objemem jede na benzin i naftu. *Idnes.cz* [online]. 15. 6. 2009, 15.6.2009 [cit. 2012-03-05]. Dostupné z: [http://auto.idnes.cz/motor-s-promenlivym-objemem-jede-na-benzin-i-naftu-fsk-/automoto.aspx?c=A090423\\_220813\\_automoto\\_vok](http://auto.idnes.cz/motor-s-promenlivym-objemem-jede-na-benzin-i-naftu-fsk-/automoto.aspx?c=A090423_220813_automoto_vok).
24. RYBECKÝ, Vladimír. Ilmor připravuje revoluci - pětidobý motor. *Autoweek.cz* [online]. 25. 10. 2009 [cit. 2012-03-05]. Dostupné z: <http://www.autoweek.cz/trendy-presun-priorit-255>.
25. Teplovzdušné motory. In: *Stirling.xf.cz* [online]. [cit. 2012-03-07]. Dostupné z: <http://stirling.xf.cz/index1.htm>.
26. HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory*. 1. vyd. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2011, 151 s. ISBN 978-80-213-2168-7 (BROŽ.) .:
27. ŠKORPÍK, Jiří. Stirlingův motor, *Transformační technologie*, 2009. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/stirlinguv-motor.html>.
28. Robert Stirling. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001, 4. 1. 2012 [cit. 2012-03-17]. Dostupné z: [http://nl.wikipedia.org/wiki/Robert\\_Stirling?uselang=cs](http://nl.wikipedia.org/wiki/Robert_Stirling?uselang=cs).
29. HORČÍK, Jan. Hüttlin Kugelmotor - geniální sférický motor pro hybridní auta, větrné elektrárny i domácnosti. *Hybrid.cz* [online]. 23. 9. 2011[cit. 2012-03-18]. Dostupné z: <http://www.hybrid.cz/huettlin-kugelmotor-genialni-sfericky-motor-pro-hybridni-auta-vetrne-elektrarny-i-domacnosti>.

30. VOKÁČ, Luděk. Wankelův rotační motor. Jak to vlastně funguje?. *Idnes.cz* [online]. 8. 4. 2008[cit. 2012-03-19]. Dostupné z: [http://auto.idnes.cz/wankeluv-rotacni-motor-jak-to-vlastne-funguje-f47-/ak\\_aktual.aspx?c=A080401\\_015114\\_ak\\_aktual\\_vok](http://auto.idnes.cz/wankeluv-rotacni-motor-jak-to-vlastne-funguje-f47-/ak_aktual.aspx?c=A080401_015114_ak_aktual_vok).
31. LÁNÍK, Ondřej. Mazda Renesis: Motor roku 2003 (detailní pohled). *Auto.cz* [online]. 5. 5. 2004[cit. 2012-03-19]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/mazda-renesis-motor-roku-2003-detailni-pohled-16979>.
32. Historie automobilu. *AUTA* [online]. [cit. 2012-03-30]. Dostupné z: <http://www.autamilda.estranky.cz/clanky/historie-automobilu.html>.
33. HROMÁDKO, Jan. *Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. 1. vyd. Praha: Grada, 2011, 296 s. ISBN 978-80-247-3475-0 (BROŽ.).
34. Mazda's rotary rocket ready for launch. *CarReview* [online]. 21.1 2009[cit. 2012-04-04]. Dostupné z: <http://reviews.carreview.com/mazdas-rotary-rocket-ready-for-launch>.
35. VYSOKÝ, Ondřej. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ, Katedra řídicí techniky, Praha 2, CZ. *Lineární motorgenerátor s volnými písty* [patent]. Česká republika. CZ 302310 B6. Uděleno 16. 2. 2011.

## **5.1 Seznam obrázků:**

*Obr. 1: Základní schéma motoru s volnými písty.[2]*

*Obr. 2: Motor OPOC.[3]*

*Obr. 3: Pětidobý motor.[5]*

*Obr. 4: Hefleyho motor.[6]*

*Obr. 5: Konstrukční flexibilita.[18]*

*Obr. 6: Konfigurace motoru se zásobníkem stlačeného vzduchu.[18]*

*Obr. 7: Řez motorem MCE-5 a popis.[22]*

*Obr. 8: Ozubený element.[22]*

*Obr. 9: Wankelův motor – jednotlivé doby.[34]*

*Obr. 10: Hüttlin-Kugelmotor.[9]*

*Obr. 11: Hüttlin-Kugelmotor – rotační pohyby.[9]*

*Obr. 12: Tour Engine – základní uspořádání.[10]*

*Obr. 13: Tour Engine – jednotlivé doby.[10]*

*Obr. 14: WDG – směry proudění.[14]*

*Obr. 15: WDG – jednotlivé fáze.[14]*

*Obr. 16: Mikroturbína Capstone C30 – popis.[16]*

*Obr. 17: Popis konstrukce základního principu.[28]*

*Obr. 18: Základní typy mechanické konfigurace.[25]*