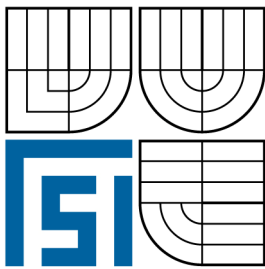


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO  
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## PROMĚNNÝ KOMPRESNÍ POMĚR U SPALOVACÍCH MOTORŮ

VARIABLE COMPRESSION RATIO FOR AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

JAN DRAGOUN

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. LUBOMÍR DRÁPAL

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství

Akademický rok: 2009/2010

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Jan Dragoun

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Proměnný kompresní poměr u spalovacích motorů**

v anglickém jazyce:

#### **Variable compression ratio for an internal combustion engine**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zhodnocení vlivu velikosti kompresního poměru na účinnost spalovacího motoru, přehled použitých konstrukčních řešení proměnného kompresního poměru.

Cíle bakalářské práce:

Zhodnoťte vliv velikosti kompresního poměru na účinnost a další sledované parametry pístového spalovacího motoru. Uveďte historii aplikací mechanismu proměnného kompresního poměru, soudobá konstrukční řešení a jejich zhodnocení. Nastiňte další možný vývoj v této oblasti.

Seznam odborné literatury:

- [1] RICARDO, H., HEMPSON, J. G. G. The High-Speed Internal-Combustion Engine. Blackie & Son Limited, London and Glasgow, Fifth editon, 1968.
- [2] ASSANIS, D. A. Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engines. SAE International, 2003, ISBN: 978-0-7680-1123-4.
- [3] KOŠŤÁL, J., SUK, B. Pístové spalovací motory. Nakladatelství Československé akademie věd, První vydání, Praha, 1963.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lubomír Drápal

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/10.

V Brně, dne 27.11.2009

L.S.



prof. Ing. Václav Pištěk, DrSc.  
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá popisem výhod a nevýhod konstrukcí s proměnným kompresním poměrem použitých v minulosti, současnosti a reálně použitelných do budoucnosti v závislosti na současném trendu moderního vývoje v konstrukci motorů.

## **Klíčová slova**

Proměnný kompresní poměr, účinnost, motor, hybridní pohon, koncept

## **Abstract**

This bachelor thesis describes the advantages and disadvantages of structures with variable compression ratio used in the past, present, and realistically applicable in the future depending on the current trend of modern developments in engine design.

## **Key words**

Variable compression ratio, efficiency, engine, hybrid drive, concept

## **Bibliografická citace práce:**

DRAGOUN, J. *Proměnný kompresní poměr u spalovacích motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 37 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Lubomír Drápal.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Proměnný kompresní poměr u spalovacích motorů** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně 28. 5. 2010

.....  
Jan Dragoun

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce ing. Lubomíru Drápalovi za vedení, cenné připomínky a rady v průběhu vypracování mé práce a Bc. Kateřině Rosákové za jazykovou korekturu.



## **Obsah**

### **Úvod**

### **1 Definování základních pojmů**

#### **1.1 Kompresní poměr**

#### **1.2 Změna kompresního poměru**

##### 1.2.1 Možnosti změny kompresního poměru:

#### **1.3 Vliv kompresního poměru na účinnost motoru**

##### 1.3.1 Tepelná účinnost

##### 1.3.2 Mechanická účinnost

##### 1.3.3 Vliv měnícího se kompresního poměru na účinnost motoru

##### 1.3.4 Mechanická účinnost

##### 1.3.5 Tepelná účinnost

##### 1.3.6 Celková účinnost

### **2 Možné změny kompresního poměru**

### **3 Současná a předchozí řešení konstrukce motorů s proměnným kompresním poměrem u konkrétních firem**

#### **3.1 SAAB**

##### 3.1.1 Způsob změny komprese

##### 3.1.2 Způsob změny komprese po mechanické stránce

##### 3.1.3 Koncept SAAB 1,6 SVC a jeho uplatnění v provozu.

#### **3.2 MCE-5 (PSA)**

##### 3.2.1 Způsob změny komprese

##### 3.2.2 Způsob změny komprese po mechanické stránce

##### 3.2.3 Budoucnost konceptu MCE-5

#### **3.3 FEV Motortechnik**

##### 3.3.1 Způsob změny komprese

##### 3.3.2 Způsob změny komprese po mechanické stránce

##### 3.3.3 Dvoustupňové VCR

#### **3.4 Ford**

##### 3.4.1 Způsob změny komprese

##### 3.4.2 Způsob změny komprese po mechanické stránce

##### 3.4.3 Budoucnost HCCI s měnitelným kompresním poměrem

#### **3.5 Mercedes – Benz**

##### 3.5.1 Provoz agregátu DiesOtto

##### 3.5.2 Změna po mechanické stránce

##### 3.5.3 Budoucnost zajištěna

#### **3.6 Lotus**

##### 3.6.1 Funkce konceptu Lotus

##### 3.6.2 Konstrukční řešení Lotusu

##### 3.6.3 Současnost u Lotusu

### **4 Budoucnost a ubírající se směr motorů s proměnným kompresním poměrem**

#### **4.1 Předkomůrka v benzínovém motoru**

#### **4.2 Motor fungující na benzín i naftu**



**4.3 Lineární motor**

**5 Závěr**

**6 Seznam použitých zdrojů**

**7 Seznam použitých zkratek a symbolů**





## Úvod

Začátkem vývoje spolu zážehový motor spalující benzín a vznětový motor spalující naftu nesoupeřily a každý měl svoje určení. Zážehové motory byly používány do osobních automobilů a vznětové do nákladních automobilů. Dlouhou dobu byly zážehové motory montovány do osobních automobilů pro větší kultivovanost chodu a vyšší výkon dosahovaný z jednoho litru zdvihového objemu, i když jejich spotřeba paliva byla vyšší. Zato vznětové motory se produkovaly s velkými objemy pro nákladní automobily s lepším průběhem točivého momentu při nižších otáčkách a menší závislosti spotřeby paliva na zatížení motoru. S úbytkem fosilních paliv, a tím jejich následné vyšší ceně, se lidé začali obávat o svůj komfort dopravy a výrobci v reakci na to začali hledat alternativu v pohonu osobních automobilů. Rychlý pokrok výrobních technologií podpořil výrobu osobních automobilů se vznětovými motory. S pomocí neustálého vývoje se vznětové motory dostaly k vysokým výkonům, odpovídajícím zážehovým motorům při vesměs vyšším točivém momentu. O úspěchu moderních naftových motorů svědčí i prodejní statistiky, kdy prodej nových naftových vozů je už na 40% celkového prodeje.

Současní výrobci ale neustále vidí veliký potenciál v benzínových motorech a tak začali rychle modernizovat zážehové motory, aby dohnali současný technický pokrok naftových motorů. Ať už to jsou systémy proměnného časování ventilů, přímého vstříku nebo poslední dobou preferované moderní přeplňované motory. K uplatňování nových mnohdy i netradičních systému výrobce vedou i neustále zpřísňující se emise. Jedním z mnoha řešení je proměnný kompresní poměr, který řeší právě problém s nadměrnými emisemi zcela bezpečně i při méně kvalitním palivu. Kompresní poměr mají současné automobily nastavený jako kompromis pro danou třídu a využití automobilu. Proměnný plynule měnitelný kompresní poměr by zaručoval menší nároky na kvalitu paliva a dosahoval by vyšší využitelnosti potenciálu motoru při nízkých emisích.

Současný vývoj moderních zážehových motorů vede k tomu, aby se minimalizoval objem válců, ale zároveň maximalizoval výkon a točivý moment, kterého by bylo možné dosáhnout při co nejnižších otáčkách. Zároveň ale současná společnost požaduje minimální dopad na životní prostředí a tedy minimální emise. Jednou z cest, jak zdokonalit motory, je vzít dobré vlastnosti zážehového a vznětového motoru a pokusit se je spojit v jeden celek. Jedním z rozdílných parametrů je i kompresní poměr. Proto se někteří výrobci, snažící se zdokonalit benzínový motor, uchýlili k pokusům s proměnným kompresním poměrem, aby sjednotili výhody zážehu a vznětu v jeden celek.



## 1 Definování základních pojmů

### 1.1 Kompresní poměr

Kompresní poměr, neboli stupeň stlačení směsi  $\varepsilon$ , je poměr celého pracovního objemu válce k objemu spalovacího prostoru, tedy poměr směsi nasáté ku směsi stlačené. Kompresní poměr zážehových motorů je od 8:1 do 13:1, zatímco u vznětových bývá 14:1 až 23:1. I když jsou tato čísla velice relativní, kdyby měla být zhodnocena před 30. lety, byla by jiná. Aktuální kompresní poměr se vyvíjí s požadavky a postupem zlepšování vývoje. Poměr hraje důležitou roli pro využití energetického potenciálu paliva při nízkých emisích výfukových plynů, proto je důležité zvolit kompromis pro daný způsob určení.

#### Výpočet kompresního poměru

Vzorec pro výpočet kompresního poměru z geometrického hlediska je následující:

$$\varepsilon = \frac{V_v + V_p}{V_p} \quad (1)$$

#### Objem válce

Objem válce  $V_v$  je rozmezí mezi HÚ a DÚ vrchní hrany pístu a vypočítá se:

$$V_v = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot (HU - DU) \quad (2)$$

#### Objem spalovacího prostoru

Objem spalovacího prostoru  $V_p$  se odvíjí od tvaru spalovacího prostoru. Rozdělíme-li si ho na části  $V_{p1}$  a  $V_{p2}$ .

#### $V_{p1}$

Pod pojmem  $V_{p1}$  budeme rozumět část válce, která zbývá mezi HÚ a okrajem válce. Vzorec bude podobný jako pro objem válce:

$$V_{p1} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v \quad (3)$$

#### $V_{p2}$

Pojem  $V_{p2}$  pak značí hlavní spalovací prostor v hlavě válců, popřípadě v pístu. Jeho vzorec podléhá tvaru spalovacího prostoru.

### 1.2 Změna kompresního poměru

Při konstrukci nového agregátu se konstruktéři musí potýkat s otázkou, jakým způsobem bude motor zatěžován. Bude-li určen do městského či silničního provozu, nebo se bude jednat o čistě sportovní vůz, anebo bude-li motor používán do více modelů možná i více automobilkami, a tak bude muset být čistě univerzální, lehce a levně vyrobitelný. Ohled se musí brát i na stále se zpříšňující emise výfukových plynů a případně dovybavit agregát příslušenstvím na jejich úpravu. Výrazný je také tlak konkurence a žádost trhu o co nejvyšší výkon a točivý moment při malém objemu válců a nízké spotřebě paliva. Jednou z voleb je i volba kompresního poměru. Bude-li příliš



vysoký, bude motor velice náchylný na detonační hoření a bude dostatečně výkonný při vysokých zatíženích, ale s vyšší spotřebou. Bude vhodný do městského provozu a malých automobilů. Naopak zvolí-li se poměr příliš malý, bude vhodný pro vysoká zatížení, ale při nízkých zatíženích bude velice neekonomický. Takový motor bude lepší do výkonných velkoobjemových motorů pro jízdu mimo město a sportovní vozy. Do jisté míry režimy jízdy město a mimo město splňovaly spolehlivě vznětové vozy spalující naftu. Řešením, jak se svojí charakteristikou vyrovnat dieslovým motorům, je mechanismus umožňující měnit během jízdy plynule kompresní poměr. Mohli bychom tak při nízkém zatížení pro efektivní naplnění válce zvětšit kompresi na maximum pod detonační hoření a při vysokém zatížení zvětšit poměr na minimum maxima naplnění válce, aby bylo možné při maximálním otevření škrticí klapky a stříknutém palivu docílit homogenní směsi o stechiometrickém poměru.

### 1.2.1 Možnosti změny kompresního poměru:

- zvětšováním a zmenšováním průměru válce  $d$  (značně nepravděpodobné)
- nekonstantní polohou  $HÚ$  a  $DÚ$
- změnou výšky válce ve  $V_{p1}$
- poslední z možností je změna objemu hlavního spalovacího prostoru  $V_{p2}$

#### Změna polohy $HÚ$ a $DÚ$

Pokud budeme měnit pouze polohu  $DÚ$ , bude rovnice kompresního poměru:

$$\varepsilon = \frac{\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot (HÚ - DÚ) + (V_{p1} + V_{p2})}{(V_{p1} + V_{p2})} \quad (4)$$

$$DÚ = f(x)$$

kde  $DÚ$  je funkce proměnných vnějších vlivů.

Pokud budeme měnit polohu  $HÚ$ , bude rovnice kompresního poměru:

$$\varepsilon = \frac{\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot (HÚ - DÚ) + (\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v + V_{p2})}{(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v + V_{p2})} \quad (5)$$

$$HÚ = f(x)$$

$$v = f(HÚ)$$

Kde poloha  $HÚ$  je funkce proměnných vnější vlivů jako při změně  $DÚ$  a zbylá výška válce ve spalovacím prostoru  $V_{p1}$  je funkcí  $HÚ$ .



Když se bude měnit poloha HÚ i DÚ bude vzorec pro výpočet kompresního poměru:

$$\varepsilon = \frac{\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot (HÚ - DÚ) + \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v + V_{P2}\right)}{\left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v + V_{P2}\right)} \quad (6)$$

$$HÚ = f(x)$$

$$DÚ = f(x)$$

$$v = f(HÚ)$$

Kde poloha HÚ a DÚ je funkce proměnných vnější vlivů DÚ a zbylá výška válce ve spalovacím prostoru  $V_{P1}$  je funkcí HÚ.

### Změna výšky $V_{P1}$

Změnou výšky se rovnice pro výpočet kompresního poměru změní na:

$$\varepsilon = \frac{V_v + \left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v + V_{P2}\right)}{\left(\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v + V_{P2}\right)} \quad (7)$$

$$v = f(x)$$

Kde je výška válce funkcí proměnných vnější vlivů.

### Změna objemu spalovacího prostoru v hlavě válců

Touto změnou ale narušíme tvar spalovacího prostoru, čímž negativně ovlivníme proudění směsi a následné hoření. Proudění a hoření se pak odvíjí od nově vzniklého tvaru spalovacího prostoru. Vzorec pro výpočet kompresního poměru bude následující:

$$\varepsilon = \frac{V_v + (V_{P1} + V_{P2})}{(V_{P1} + V_{P2})} \quad (8)$$

$$V_{P2} = f(x)$$

Kde objem a tvar spalovacího prostoru je funkcí proměnných vnější vlivů.

## 1.3 Vliv kompresního poměru na účinnost motoru

### 1.3.1 Tepelná účinnost

Využití energie ze spalování paliva ve své knize formuloval Košťál [12] s.142 jako:  
*„Přes veškerý pokrok je celkové využití energie obsažené v palivu u dnešních zážehových motorů stále ještě velmi nedokonalé. Ztráty chlazením jsou 30% až 32%, výfukem 32% až 34%, třením 5% až 7%. Celkové ztráty v motoru jsou asi 67% až 72%. Část práce (2%) je využita pro pohon příslušenství.“*

Pro pohon vozidla tedy zbude asi 1/3 využitelné energie. Vznětové agregáty mají o něco více procent využitelnosti energie z paliva díky jeho kvalitnějšímu prohořívání. Sice lze využít energii z chlazení pro vytápění vozidla a energii výfukových plynů pro pohon



turbodmychadla u přeplňovaných motorů, ale toto využití je jen minimální s porovnáním nevyužité energie, která se ve většině v podobě tepla promarní a je odvedena do okolí.

Jednou z možností využití vyšší účinnosti, a tím i tepelné energie, je zvyšování kompresního poměru. Bohužel zvyšování není lineární a při použití vyšší komprese křivka účinnosti neroste tak rychle, jak bychom si přáli, tudíž u zážehových motorů nemá význam překračovat kompresní poměr 13:1. Nastává totiž problém s kvalitou paliva, náchylnou na detonační hoření při nedostatečném oktanovém čísle. Tento nedostatek částečně řeší čidlo klepání, které zaznamenává detonační spalování a řídicí jednotka tak může upravit dávku paliva a především předstih zážehu. U zážehového motoru navíc skutečné stlačení směsi ve spalovacím prostoru za běžných jízdních podmínek neodpovídá spočítané teorii. Maximální hodnotu kompresního poměru udávaného výrobcem lze docílit jen za předpokladů plného otevření škrtkové klapky při maximálním točivém momentu. Při korigování škrtkové klapky, tedy částečném zatížení, klesá účinnost naplnění válce a kompresní poměr by se mohl pohybovat kolem poloviny výrobcem udávané hodnoty. Tím se zhoršuje dále tepelná účinnost. U vznětových motorů je důležitá vyšší komprese pro větší teplotu vzduchu a následného vznícení paliva, a tím i dokonalejšího hoření, které má za následek vyšší tepelnou využitelnost energie, vzniklé při spalování.

### 1.3.2 Mechanická účinnost

Mechanickou účinnost formuloval ve své knize Košťál [12] s.100 jako:

*„Mechanická účinnost představuje bilanci motoru poměru produkovaného výkonu a výkonu ztraceného mechanickým odporem soustrojí, vířením náplní a vlivem zvyšujících se otáček. Započítávají se sem také hydraulické ztráty vznikající škrcením sání v souvislosti s plnicí účinností.“*

Zlepšování mechanické účinnosti vede u současných motorů k nižší spotřebě paliva a dalším zvýšením výkonu. Ztráty vnitřního tření vznikají v ložiskách uložení kliky, ojnic a pístů, ale hlavně třením pístu a pístními kroužky po stěnách válce. Součinitel tření je závislý na zatěžujících silách, vzniklých převážně spalováním. Na první pístní kroužek působí stejný tlak, jako je ve spalovacím prostoru. Na druhý pístní kroužek je tento tlak už třetinový a pod případným třetím kroužkem je už minimální. Čím vyšší kompresní tlak, tím vyšší zatěžující síly a tím vyšší součinitel tření. Tedy pokud budeme zvyšovat tepelnou účinnost vyšším kompresním tlakem, tak bude klesat mechanická účinnost vlivem tření. Toto lze kompenzovat konstrukčním řešením ojnic, pístů, použitím ložisek pro vysoká zatížení se zároveň nízkým koeficientem tření a důkladnou povrchovou úpravou materiálu.

### 1.3.3 Vliv měnicího se kompresního poměru na účinnost motoru

Jak je vidět na přiloženém obrázku 1-1, vliv měnicího se kompresního poměru na účinnost zážehového motoru je značný.

### 1.3.4 Mechanická účinnost

Mechanická účinnost začne klesat až s přibývajícím zatěžujícím účinky, vznikajícími od vysokých tlaků při velkém kompresním poměru. Vzniká tím větší tření v ložiskách a tím pádem se i zhoršuje mechanická účinnost.

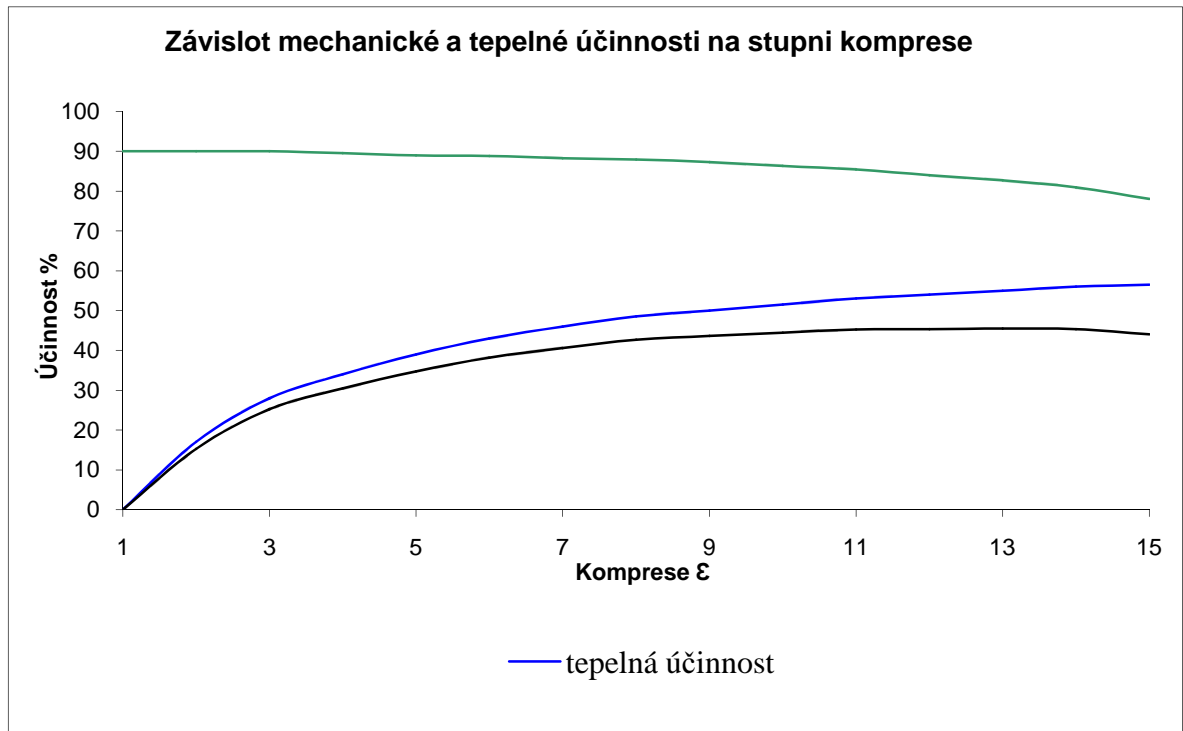


## 1.3.5 Tepelná účinnost

Velký nárůst tepelné účinnosti je patrný zvláště při menších kompresních poměrech. S přibývajícím poměrem už účinnost roste velice pozvolna, a to díky malému využití energetického potenciálu paliva a odvodu většího tepla ve výfukových plynech.

## 1.3.6 Celková účinnost

Mechanická a tepelná účinnost dává obraz o celkové účinnosti, která při zvyšujícím se kompresním tlaku mírně klesá. Není tedy vhodné zvyšovat kompresní poměr nad určitou mez, danou poklesem celkové účinnosti.



Obr. 1-1 Závislost účinnosti na kompresním poměru u zážehového motoru

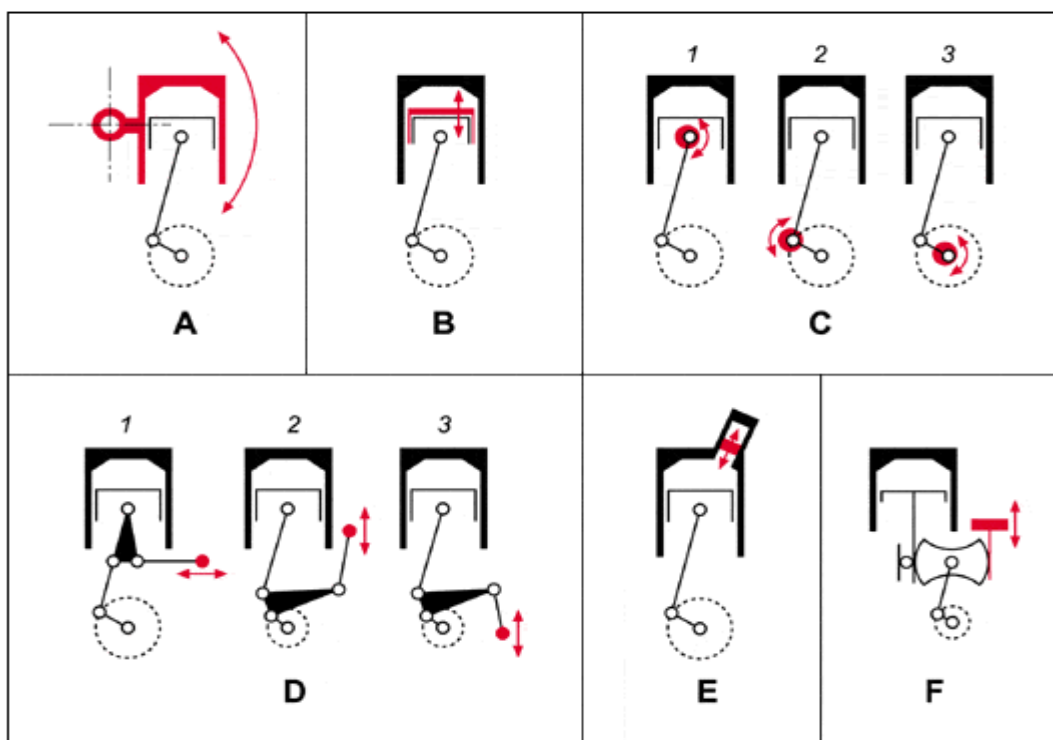


## 2 Možné změny kompresního poměru

Konstrukčních možností, ze kterých si výrobci mohou vybrat pro mechanismus sloužící pro změnu kompresního poměru, není příliš mnoho. Použitelná řešení jsou sjednocena na obrázku 2-1. V příložené tabulce je pak uveden přehled výhod a nevýhod jednotlivých konstrukčních řešení oproti klasickým konvenčním motorům. Z uvedeného seznamu vynikají svými vlastnostmi dvě konstrukční metody. Systém s mechanickým převodem vychází velice příznivě k většině sledovaných parametrů. Následuje ho systém s vloženým dalším pístem, který ale negativně ovlivňuje proudění plynů ve spalovacím prostoru. Naopak některé konstrukce jsou velice nevýhodné, a pokud již byly někdy realizované, většinou se neosvědčily a ukázaly se být slepou uličkou automobilové konstrukce motorů.

Hlavními sledovanými parametry byly:

- kompaktnost spalovacího prostoru s ohledem na proudění směsi a následné hoření
- kinematika klikového mechanismu, která ovlivňuje průběh sil, a tím celkové namáhání ložisek
- otáčky motoru
- ovládní změny kompresního poměru a hlavně časová náročnost na změnu
- třecí ztráty, související s kinematikou klikového mechanismu a průběhem sil
- spolehlivost a hlavně životnost, která je alfa a omega všech motorů a určuje jejich masové rozšíření
- setrvačné síly a možnosti vyvažování
- emise hluku, jako důležitý znak pro jízdní komfort
- realizovatelnost a integrace do současných automobilů



Obr. 2-1 Schémata změn kompresního poměru



- A Kloubová hlava válců
- B Hydraulicky stavitelné písty
- C Excentrická ložiska
- D Více prvkový klikový mechanismus
- E Přídavný píst v hlavě válců
- F Převodové mechanismy

Seznam hlavních předností, nedostatků a zvláštností těchto systémů										
	A	B	C			D			E	F
			1	2	3	1	2	3		
kompaktnost spalovacího prostoru	0	0	0	0	0	0	0	0	-	0
kinematika pístu	≠	0	≠	≠	≠	≠≠	≠≠	≠≠	0	0
otáčky	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ovládání kompresního poměru	++	-	-	-	++	+	+	+	+	++
třecí ztráty	0	-	0	0	0	-	-	-	-	++
spolehlivost (životnost)	--	-	-	-	-	0	0	0	0	++
setrvačné síly a vyvažování	0	-	-	-	0	-	-	-	0	-
emise hluku	--	0	0/-	0/-	0/-	0	0	0	0	0/+
realizovatelnost a integrace	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Výhody a nevýhody ve srovnání s konvenčními motory										
identické	0									
různé / velmi různé	≠	≠≠								
výhodné / velmi výhodné	+	++								
špatné / velmi špatné	-	--								

Tab. 2-1 Hlavní sledované parametry motorů s proměnou kompresí

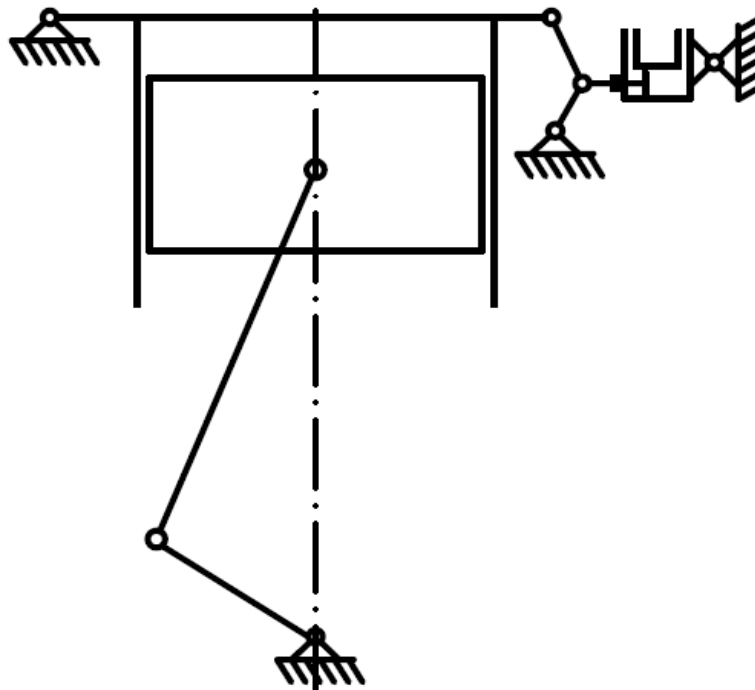




### **3 Současná a předchozí řešení konstrukce motorů s proměnným kompresním poměrem u konkrétních firem**

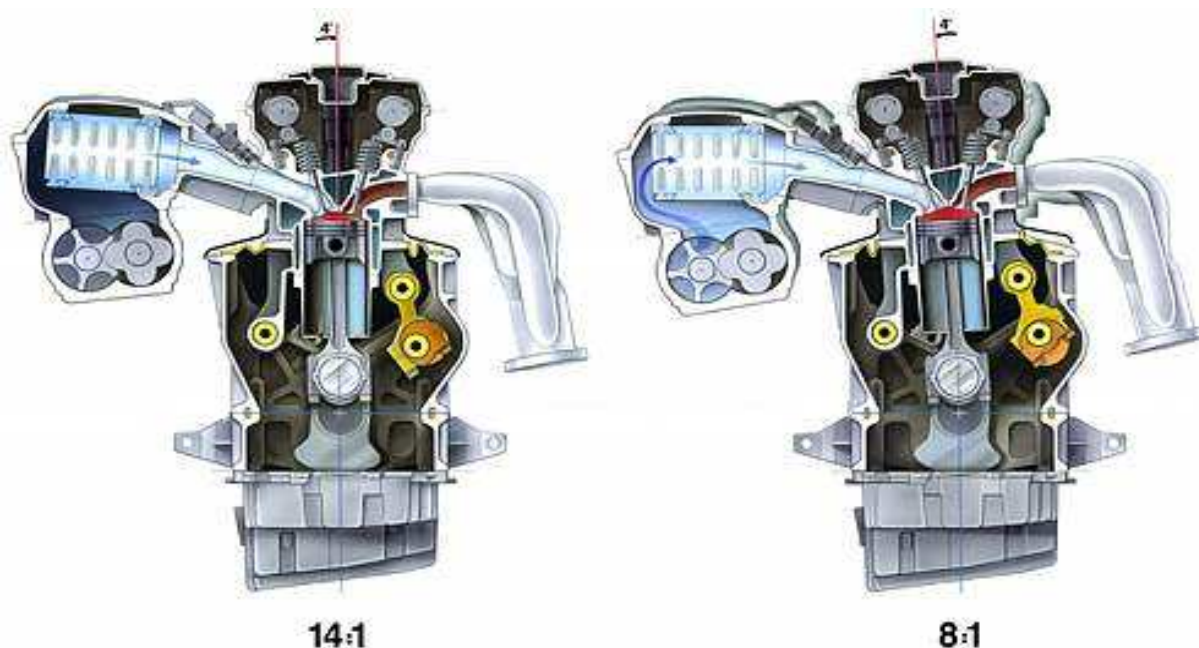
#### **3.1 SAAB**

Švédská firma SAAB začala uvažovat o motoru s proměnným kompresním poměrem už v 80. letech, ale první patent byl přihlášen až v roce 1990. Jednalo se o motor o zdvihovém objemu  $2000 \text{ cm}^3$ , který již tehdy poskytoval větší točivý moment a výkon, než konvenční motory té doby. Technologie SAABu na proměnu kompresního poměru byla představena pod názvem SVC (SAAB variable compression). SAAB se vydal pro změnu poměru cestou změny výšky  $V_{p1}$ . Použil mechanismus, který je podobný mechanismu na drcení kamene. Toto použití s sebou nese malou náročnost na síly, potřebné pro změny kompresního poměru.



*Obr. 3-1 Použité schematické řešení SAABu*

Toto řešení bylo poprvé představeno veřejnosti na autosalonu v Ženevě roku 2000 u modelu 9-5. SAAB 9-5 byl osazen 5-ti válcovým motorem o objemu  $1600 \text{ cm}^3$ , přeplňovaným Rootsovým kompresorem o tlaku 2,8 barů, ventilovým uspořádáním DOHC s 4 ventily na válec. Motor byl rozdělen na dvě části. Do horní části byly soustředěny válce, hlava motoru, sací a výfukové potrubí. Dolní část obsahuje zbytek bloku motoru s příslušenstvím pro změnu kompresního poměru. Spojení obou částí bylo realizováno pryží, kvůli změnám natočení horní části motoru.



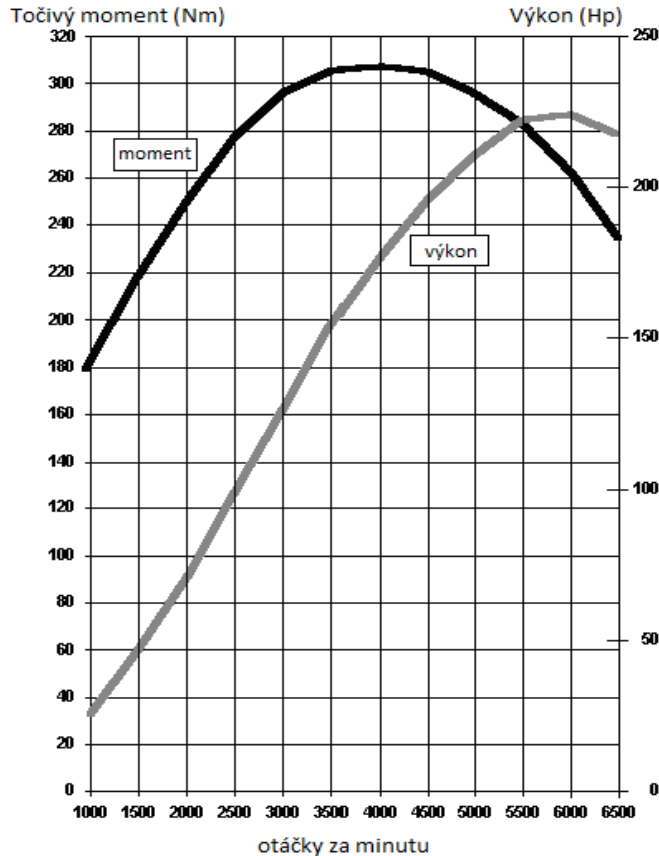
Obr. 3-2 Změna kompresního poměru u reálného motoru

### 3.1.1 Způsob změny komprese

Automobilky nastavují kompresní poměr podle určení automobilu. Kompresní poměr je kompromis mezi městskou jízdou, sportovní jízdou, ustálenou jízdou po dálnici a dalšími provozními podmínkami daného vozu. SAAB vyvinul systém, který kombinoval tyto režimy a pomocí elektroniky mění kompresi podle režimu jízdy. Styl jízdy snímají zabudovaná čidla. Stupeň komprese se měnil plynule podle hodnot vstupujících do řídicí jednotky. Řídicí jednotka měnila poměr v závislosti na otáčkách motoru, zatížení motoru a kvalitě paliva. Kompresní poměr se měnil od 8:1 do 14:1. Přitom nejvyšší kompresní poměr byl při nízkém zatížení motoru, a to z důvodu malého otevření škrticí klapky a malého hmotnostního naplnění válce, kdy plnicí účinnost konvenčních motorů klesá až na polovinu. Tím pádem kompresní poměr 14:1 byl málo využitý, ale i tak se plnicí schopnost pohybovala od jedné poloviny po dvě třetiny. Kompresní poměr klesal na 8:1 při plném otevření škrticí klapky z důvodu vyššího hmotnostního naplnění válce.

### 3.1.2 Způsob změny komprese po mechanické stránce

Prioritou SAABu bylo použít co nejvíce komponentů stávajícího motoru a vyhnout se tak zbytečným nákladům na novou konstrukci agregátu. Klasické konstrukce byly hlava, ventily, válce, písty, ojnice, kliková hřídel atd. Válce zůstaly klasické koncepce, ale byly doplněny o držák mechanismu, umožňující naklápění a tím změnu komprese na jedné straně, na straně druhé o rotační vazbu. V bloku agregátu přibyl hydraulický mechanismus na změnu komprese, skládající se z krátkých ojnic, vačky a elektricky ovládaného hydraulického stavěcího mechanismu, umožňujícího náklon osy válců a hlavy až o 4° od osy bloku motoru. Nově musel být také vyvinut kompresor, který by byl schopen dodávat potřebný tlak pro přepínování. Utěsnění pohyblivého spojení horní a dolní části agregátu bylo řešeno pomocí gumového měchu. Velké vývojové náklady si však vyžádala řídicí elektronika u SAABu pod názvem SAAB Trionic.



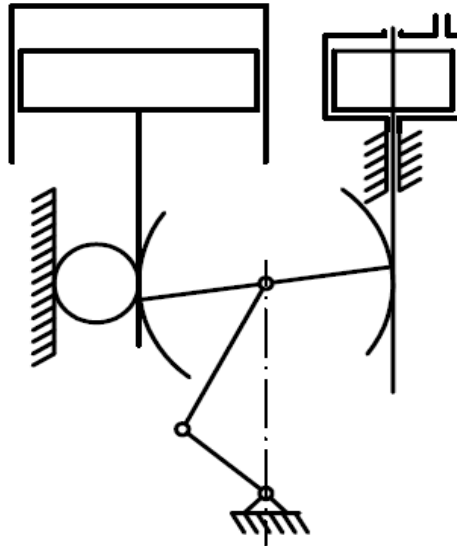
Obr. 3-3 Průběh výkonu a momentu motoru SVC

### 3.1.3 Koncept SAAB 1,6 SVC a jeho uplatnění v provozu.

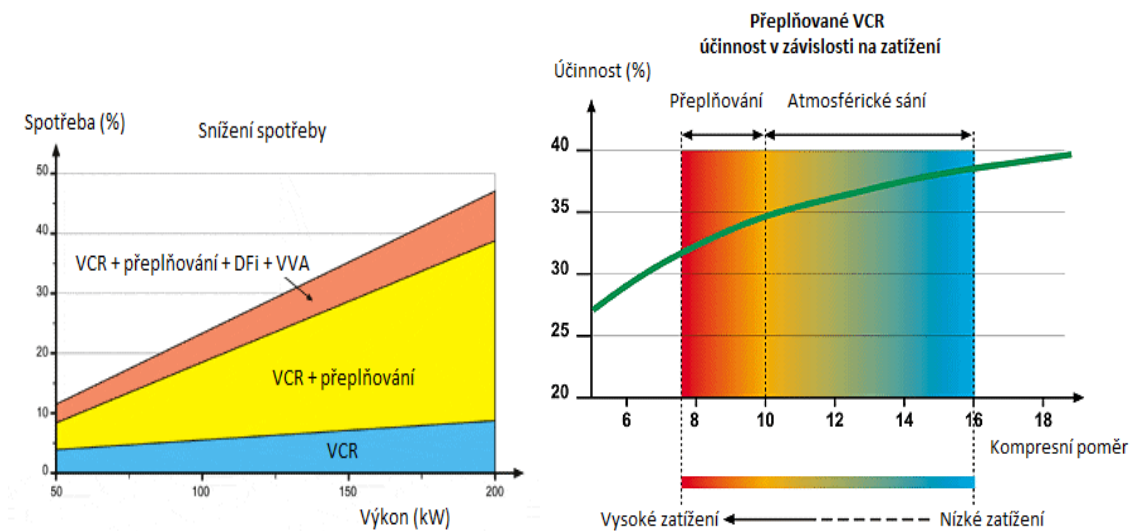
Po dlouhodobém výzkumu, který začal už v 90. letech, SAAB od konceptu upustil. Nyní se věnuje zvyšování výkonu a snižování emisí pomocí přeplňování a jiných konstrukcí, než je proměnný kompresní poměr a jeho vývoj se ubírá hybridními pohony. Důvodů bylo několik, ale dvěma hlavními důvody byla cena vyráběného motoru a především spolehlivost. Polohovací mechanismus nákladný na výrobu a značně náročný na přesnost a rychlost ovládání zvyšoval cenu a hmotnost motoru. Vyosení hlavy válců od osy klikové hřídele s sebou neslo nadměrné namáhání klikové hřídele a ojníc na ohyb, ale hlavně nadměrné opotřebení stěn pístů o plochy válce. Tyto mechanické problémy způsobily, že se koncept SAABu 9-5 1,6 SVC nedočkal sériové výroby.

### 3.2 MCE-5 (PSA)

Francouzská firma spolupracující s projektem automobilek PSA (Peugeot, Citroen a Toyota) začala s vývojem motoru o proměnném kompresním poměru v roce 1997, ale teprve v roce 2009 na autosalonu v Ženevě představila veřejnosti funkční model zabudovaný do Peugeotu 407. V MCE-5 vyvinuli řadový čtyřválcový motor o objemu  $1500 \text{ cm}^3$  a spotřebě 6 litrů na 100km. Motor má označení VCRI (Variable compression ratio intelligent). Aby byl motor konkurenceschopný hlavně po cenové stránce, je z velké části shodný s běžným zážehovým motorem. Hlavní části, které jsou odlišné od konvenčního motoru je například kratší ojnice, konstrukce pístu a mechanismu, který mění kompresní poměr a způsobuje odlišný přenos zatěžujících sil z pístu na klikový mechanismus.



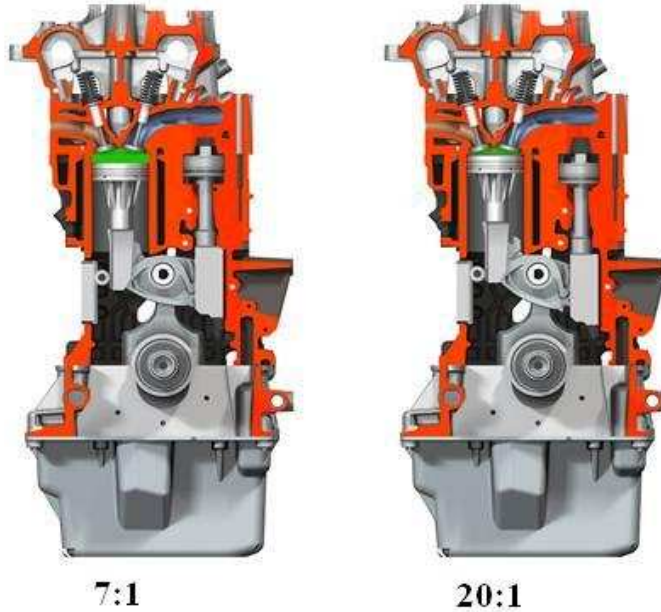
Obr. 3-4. Použité schematické řešení MCE-5



Obr. 3-5 Grafy snížení spotřeby a účinnosti přeplňovaného VCR

### 3.2.1 Způsob změny komprese

Změna komprese probíhá zcela plynule a díky unikátnímu mechanismu je kompresní poměr měněn pro každý válec individuálně. Díky konstrukci lze změnit polohu jak dolní úvrati, tak i polohu horní úvrati a tím i výšku  $V_{p1}$ . S tímto řešením motor dosahuje výkonu 162kW a točivého momentu 420Nm při spotřebě 6,5 litrů na 100km. Při použití přímého vstřikování je výkon až 198kW a hodnota točivého momentu se zvýší na 460Nm při poklesu spotřeby pod 6 litrů na sto kilometrů. Komprese je plynule měnitelná v závislosti na aktuálním jízdním stylu. Změna probíhá tak, že při nízkém zatížení a malém přívodu vzduchu se poměr zvětší až na 20:1 a při vysokém zatížení a velkém přívodu vzduchu se komprese sníží na 7:1. Samozřejmostí tohoto řešení je neustálé snímání klepání motoru a jiných vnějších vlivů, které ovlivňují hodnotu kompresního poměru.



Obr. 3-6 Změna kompresního poměru u motoru MCE-5

### 3.2.2 Způsob změny komprese po mechanické stránce

MCE-5 má svůj systém plně hydraulický, nepoužil tedy elektromagnetické ventily pro změnu komprese, jako to udělal SAAB. První velká změna je ta, že klikový mechanismus nepředává sílu přímo na píst, ale je s ní nepřímo spojen přes unikátní vahadlo a ozubený mechanismus.



Obr. 3-7 Mechanismus pro změnu kompresního poměru

Ke klikové hřídeli je klasicky připevněna ojnice, ale o podstatně menší délce, což má za následek daleko menší poloměr klikové hřídele. To znamená, že hřídel je menší, ale zároveň houževnatější proti namáhání než klasické klikové hřídele a může být zmenšena kliková skříň. Druhé oko ojnice je uchyceno do vahadla, které má na každém konci část zubů ozubeného kola. Natočení vahadla je určováno hydraulickým mechanismem na jedné straně ozubení, ozubení na protější straně vahadla je zaklesnuto do prodloužené stopky pístu. Stopka pístu je z druhé strany usměrňována ozubeným



válečkem, který se odvaluje po ploše přenášející normálovou sílu. Vložka s ploškou je na pevně přichycena v bloku motoru. Toto řešení umožňuje zcela eliminovat normálovou sílu působící na píst. Díky tomu, že píst nemá přímý styk s ojnicí a pohybuje se pouze v jedné ose, nepůsobí na něho zatížení od radiálních sil způsobené rotací ojnice a nenastává tak nerovnoměrné eliptické vybrušování válce. Řešení tedy umožňuje použití větších plnicích tlaku a vysoké komprese bez většího poškození válce.

### 3.2.3 Budoucnost konceptu MCE-5

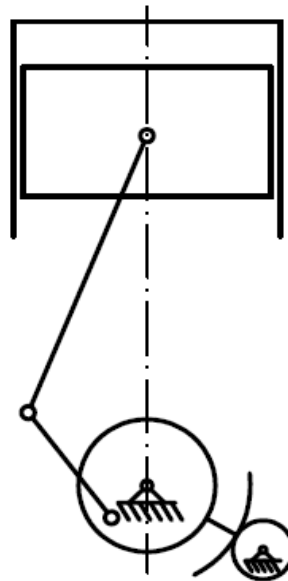
Motor byl konstruován tak, aby byl schopen sériové produkce a byl podobně finančně náročný jako konvenční motor současné produkce. Díky zdokonaleným postupům výroby ozubení se tato podmínka stala reálnou. Největší problém netradičních řešení je životnost netradičních dílů. Povrchové úpravy ozubených kol a přesnost opracování budou alfou a omegou francouzského projektu, protože stavěcí mechanismus je náchylný na potenciální nebezpečí z hlediska spolehlivosti a funkčnosti. V ozubení by také mohl vznikat nepříjemný hluk, snižující komfort jízdy. V současné době francouzští konstruktéři plně spolupracují s automobilkami a firmami, zabývajícími se výrobou pohonných agregátů na intenzivním testování a určení spolehlivosti prototypu. Do budoucna se také počítá s úsporným Atkinsonovým cyklem. Budoucnost v provozu jistě má, dle vyjádření [www.mce-5.com](http://www.mce-5.com) [10]

*„VCRi se objeví v sériové produkci asi za 5 let.“*

Tedy v roce 2015. Je však otázkou, zda bude ještě o takové motory zájem, když se vývoj většiny automobilek ubírá směrem k elektrickému a vodíkovému pohonu, či jiným alternativním pohonům, které však nejspíše nebudou hromadně využívány v uvedeném roce 2015.

### 3.3 FEV Motortechnik

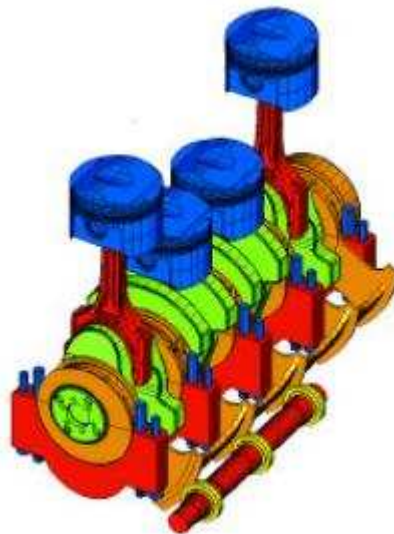
FEV je německá firma vlastnící několik patentů v konstrukci motorů, upravující jejich parametry jak po stránce výkonu tak i spotřeby. Vlastní unikátní mechanismus pro změnu kompresního poměru předvedla veřejnosti v roce 2001 pod názvem VCR (Variable compression ratio). Také německý koncept byl navržen tak, aby byl co nejméně finančně náročný, oproti běžným koncepčním motorům, a používal co nejvíce původních dílů. Motor je unikátní uložením klikové hřídele do excentrických natáčecích ložisek. Tímto tedy může měnit kompresi polohou dolní a horní úvrati, tedy i výšky  $V_p1$ . FEV si vybral pro změnu zážehový čtyřválcový motor o objemu  $1800 \text{ cm}^3$  přeplňovaný turbodmychadlem. Výkon motoru je 160 kW a točivý moment je 300 Nm. Agregát byl zabudován do sériově vyráběného Audi A6, původně vybaveného motorem o objemu  $3000 \text{ cm}^3$ . Touto změnou bylo dosaženo nepatrného zvýšení výkonu a snížení spotřeby o 25%. Samozřejmostí bylo dosažení emisních limitů EURO IV.



Obr. 3-8 Použité schematické řešení FEV

### 3.3.1 Způsob změny komprese

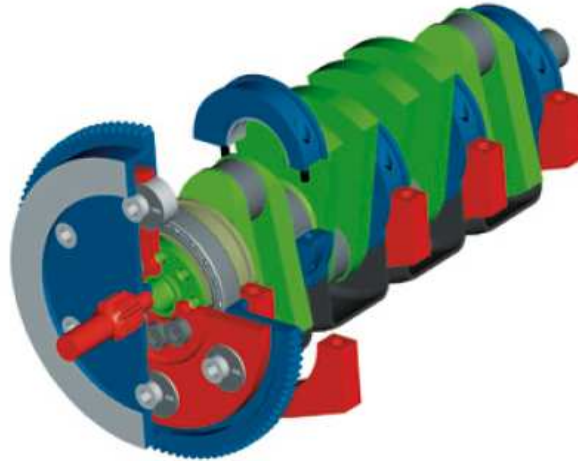
Kompresní poměr se mění jako u všech podobných systému podle jízdních podmínek, a to zcela plynule v čase 0,1 s. Hodnoty změny jsou při nízkém zatížení 16:1 a při vysokém zatížení 8:1. Podle testů je kompresní poměr při ustálené jízdě při rychlosti 140 Km/h vysokých 14:1. Koncept FEV má nízký kompresní poměr nastaven hlavně při rozjíždění.



Obr. 3-9 Použité řešení změny komprese FEV

### 3.3.2 Způsob změny komprese po mechanické stránce

Všechny pohyblivé části motoru jsou stejné jako u klasického motoru. Změněna byla ložiska klikové hřídele, která byla vyměněna za excentrická a spojená přes páku s mechanismem, který pomocí ozubení natáčí ložiska. Změna polohy se provádí elektronicky. Natáčení mění polohu klikového hřídele vzhledem k hlavě válců a stejně jako u řešení SAABu, se mění i průběh sil na ojnicí, písty a stěny válce, což zvyšuje zatížení a snižuje spolehlivost jednotlivých částí.



*Obr. 3-10 Přenos excentrického pohybu*

Problém s excentrickým pohybem kliky byl vyřešen ojedinělou konstrukcí setrvačníku s pohyblivými nesoustřednými válečky. Velikost setrvačníku konstruktérů FEV není odlišná od velikosti klasického dvoumotového setrvačníku.

### **3.3.3 Dvoustupňové VCR**

Novinkou u FEV je vyvinutí dvoustupňové změny komprese pro diesellové motory, pracující se změnou 14:1 až 17:1. Druhý stupeň změny zajišťuje excentrické natáčecí ložisko pístního čepu. Moment působící na vystředění ložiska je získáván ze setrvačných sil. Uchycení pístu mimo osu rotace, přinese nemalé změny v silovém namáhání a bude hrozit eliptické opotřebování stěn válce. Výhodou při dvoustupňové změně komprese bude možnost dosažení vyšší komprese při menším vyosení obou systému a tím následné zlepšení silových zatížení. Dvoustupňová změna komprese přinese ještě větší úsporu paliva, ale spolehlivost nově použitých součástí bude velice klíčová pro sériovou výrobu. Úspěšné řízení takového systému bude vyžadovat dlouhé testování.

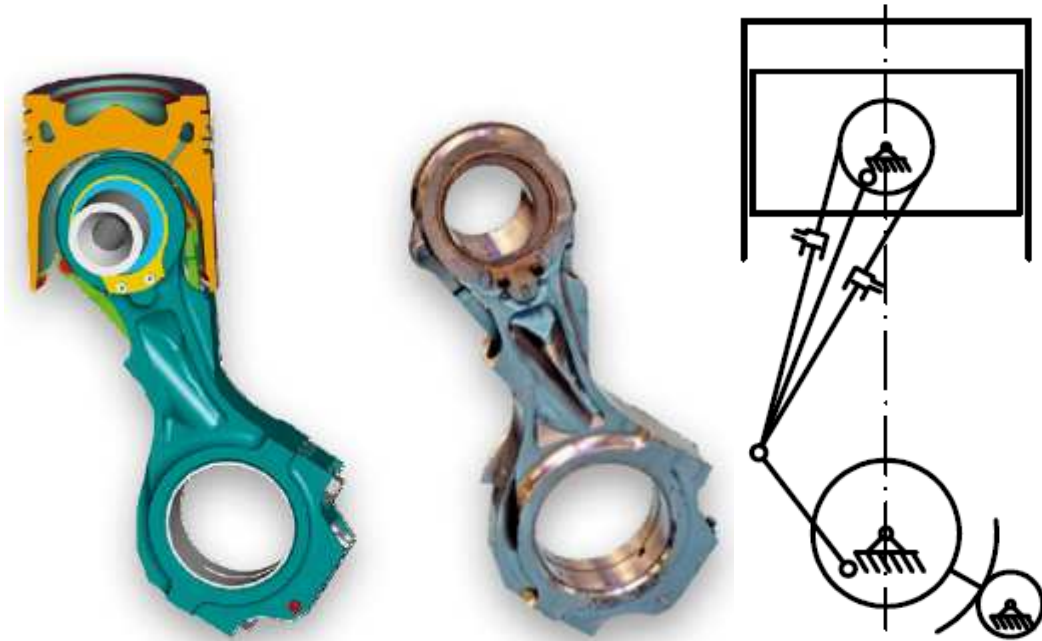
Německá firma tento systém zatím vyvíjí a doposud neuveřejnila ani odhad, kdy bude jejich technika nasazena do sériové výroby. Předběžné tvrzení o jednostupňové změně komprese, dle oficiálních stránek firmy <http://www.fev.com> [5]:

*„The system design allows integrated manufacturing usány existing production lines. The total cost of the system is expected to be approximately 140 Euro.“*

*(„Systém umožňuje integrovat výrobní postupy stávajících výrobních linek. Celkové náklady tohoto systému by měly být přibližně 140 Euro.“)*

By bylo do budoucna velice slibné, leč splnitelné jen asi při opravdu masovém rozšíření systému a mnoha tisícových sériích.





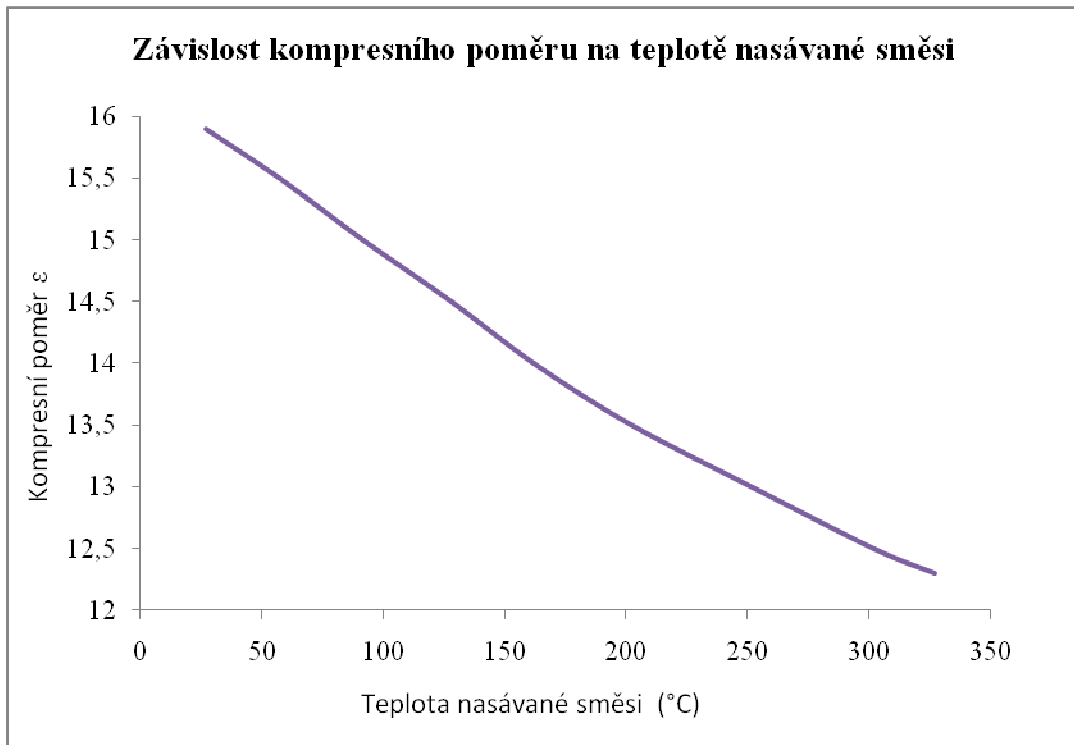
Obr. 3-11 Druhý stupeň změny komprese

## 3.4 Ford

Americký koncern Ford podal svůj patent na proměnný kompresní poměr v roce 2001. Toto řešení použil se systémem HCCI. HCCI, neboli řízené samovznícení homogenní směsi, je využití principů vznětových motorů pro benzín a jakoby využívá pro zážehové motory nežádoucích detonací (klepání). Základem je stlačení homogenní směsi paliva a vzduchu, a následné samovznícení v okamžiku, kdy je píst v horní úvrati. Kompresní poměr a teploty nasávané směsi jsou odlišné než u dieselového motoru, a proto je výhodné použít motor s proměnným kompresním poměrem. Teoretické homogenní směsi ale nelze u reálného HCCI motoru nikdy dosáhnout, především díky studenějším a teplejším místům stěn válce nebo ploch ventilů. Tyto nevýhody mají za následek, že dojde ke vznícení některých částí náplně dříve než jiných. I přesto je hoření v porovnání s běžným zážehovým motorem mnohem rychlejší a probíhá téměř bez šíření čela plamene. Rychlé hoření způsobuje zvýšení koeficientu adiabatické expanze a zvýšení účinnosti, která se tak vyrovná moderním naftovým motorům. Systém HCCI se používá bez škrticí klapky, což zvyšuje plnicí účinnost. Hoření velmi chudé směsi přináší nižší teploty plamene a směs je vystavena teplotám kratší dobu. To přináší výrazné snížení tvorby oxidu dusíku. Absence difuzního hoření bohaté směsi brání zase vzniku pevných částic, nežádoucího jevu vznětových motorů.

### 3.4.1 Způsob změny komprese

Patent Fordu nese zajímavé řešení problému s předčasným nebo pozdním samovznícením směsi u benzínového vznětového motoru. Zatímco naftový motor je plněn kvantitativně. Ke vznícení dochází až po vstříknutí dávky paliva do už značně natlačovaného a zahřátého válce. Pro následné okamžité vznícení směsi, u vznětového benzínového agregátu je nutné nasávanou směs důkladně přehřát, a to s ohledem na kompresní poměr, na dost vysokou teplotu. Řízený samozápal by šel optimalizovat buď regulací teploty podle podmínek a požadavku jízdy, což by bylo velice energeticky náročné a ještě by se projevovала prodleva změny, anebo se vznícení může regulovat změnou kompresního poměru.

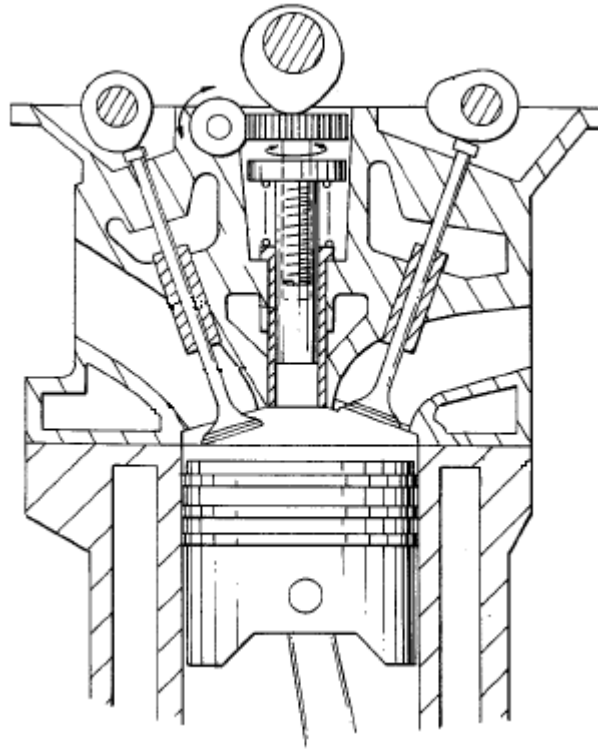


*Obr. 3-12 Závislost kompresního poměru na teplotě nasávané směsi*

Z obrázku 3-12 je patrné, že při menším kompresním poměru je nutné velké předehřívání nasávané směsi a při velkém poměru je teplota nasávané směsi v letních měsících shodná s teplotou okolí. Toto předehřívání je možné realizovat pomocí turbodmychadla, které však má pouze okolní teplotu při studených startech a tak je nutné doplnit tuto volbu elektrickým předehřevem. Možností, jak předehřát nasávanou směs, je zpětná recirkulace výfukových plynů (EGR), která však také nezaručuje studené starty.

### **3.4.2 Způsob změny komprese po mechanické stránce**

U motorů HCCI se nepoužívá škrticí klapka a motor tak má lepší plnicí účinnost při nízkých zatíženích s menšími ztrátami v saní. Palivo je buď vstříknuto před sací ventil, nebo je vstříknuto přímo do válce, ale ne jako u naftových motorů těsně před vznětem, ale protože benzínové motory mají obecně kvalitativní regulaci, je nutné důkladné promísení směsi. Přihlášený patent Fordu je doplněn o třetí vačkovou hřídel, která má proměnné časování pro každý válec zvlášť a může tedy měnit kompresi nezávisle na ostatních válcích. Komprese se mění nelineárně a největší nárůst za minimální dobu zaznamenává před samotným vznícením směsi, které je tímto řízeno. Motor nepotřebuje zapalovací svíčku, může být použita pouze jako iniciační prvek při studeném startu nebo jako doplněk při vysokých výkonech. Odstraněním zapalovací svíčky bylo možné umístit přídavný píst, který mění kompresi do středu spalovacího prostoru mezi ventily a nebylo tak nutné zvětšovat prostor nebo jiných konstrukčních úprav. Mechanismus na změnu komprese se ani neprojeví nijak výrazně na ceně agregátu. Spolehlivost bude záležet na provedených testech u reálného motoru, ale konstrukce se jeví jako spolehlivá.



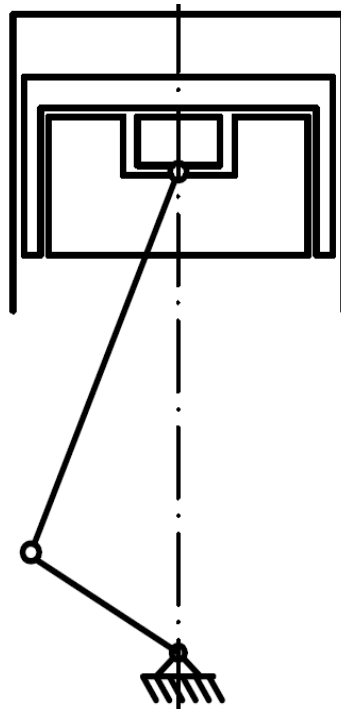
*Obr. 3-13 Změna komprese u motoru HCCI*

### **3.4.3 Budoucnost HCCI s měnitelným kompresním poměrem**

GM velký konkurent koncernu Ford představil již funkční model motoru HCCI ve voze Opel Vectra 2,2 ECOTEC HCCI s výkonem 132kW a točivým momentem 230Nm, který je doplněn systémem variabilního časování a zdvihu ventilů a detekcí tlaků v jednotlivých spalovacích komorách. Motor je ale ještě doplněn zapalovací svíčkou, která se využívá při studených startech nebo vysokých zatíženích. Na čistý pohon HCCI může motor jezdit až do rychlosti 90 kilometrů za hodinu a ušetřit tak 15% paliva. Koncept ale nezahrnuje proměnný kompresní poměr a tak je možné usuzovat, že GM od tohoto řešení upustil a bude se snažit hledat vhodné řešení pro regulaci jinými možnostmi, a to především elektronickým řízením. Podle vyjádření GM má být možné použití agregátu s plnou HCCI technologií do 10 let, tedy možnost použití proměnné komprese je stále reálné. Ford vyvíjí ve spolupráci s PSA 6ti-válcový dieselový HCCI motor o objemu 2700 cm<sup>3</sup>. Jestli však je v něm zabudovaný mechanismus pro změnu kompresního poměru, který si Ford nechal patentovat, není zatím známo.

### **3.5 Mercedes – Benz**

Německý výrobce se zabýval projektem proměnného kompresního poměru už v 80. letech. Poprvé veřejnosti představil svůj model v roce 1986. Rozhodl se jít změnou nekonstantní výšky pístu, mění tedy polohu dolní a horní úvrati i zbylou výšku Vp1. Dlouho nedal o svém konstrukčním řešení vědět, ale v roce 2008 představil koncept automobilu na základě třídy C, který pod kapotou skrýval motor o názvu DiesOtto. Jak už název sám vypovídá, je tento agregát kombinací zážehového a vznětového motoru, jinak řečeno HCCI. Vůz F 700 měl benzínový řadový turbodmychadlem přeplňovaný čtyřválec o objemu 1800 cm<sup>3</sup> s přímým vstřikem paliva, variabilním časováním ventilů, proměnným kompresním poměrem a s rekuperací energie starter-generatorem dodával celkový výkon 175kW a točivý moment 400Nm při spotřebě 5,3 litru a 100 kilometrů.



Obr. 3-14 Použité schematické řešení Mercedes-Benz

### 3.5.1 Provoz agregátu DiesOtto

Při startu a plném zatížení motor funguje jako obyčejný zážehový agregát, kde směs paliva se vzduchem zažehuje zapalovací svíčka. Do režimu řízeného samovznícení směsi systém DiesOtto automaticky přechází v průběhu jednoho pracovního oběhu při menším zatížení, tedy v nízkých a středních otáčkách. Tím se dosáhne kultivovanost a točivost benzínového motoru, spojená s úsporností a průběhem výkonu a točivého momentu jako u naftového agregátu. S rozjezdy by měl pomoci hybridní elektrický generátor, využívající nashromážděnou energii při brzdění. Pro správné řízení samozápalu je využito konceptu proměnného kompresního poměru pomocí změny výšky pístu vyvinutého již v 80. letech.



Obr. 3-15 Píst umožňující změnu komprese

### 3.5.2 Změna po mechanické stránce

Informací o konstrukci proměnného výšky pístu a jeho řízení je velice málo. Lze se ale podle doloženého obrázku 3-15 domnívat, že výška pístu bude měněna hydraulicky, a to nejspíše tlakem oleje přiváděného skrz ojnici a pístní čep do pracovního prostoru pod plášť pístu. Bude zapotřebí zvlášť olejové čerpadlo nebo soustava elektronicky ovládaných ventilů, která bude rozdělovat tlak podle vyhodnocení řídicí elektroniky.



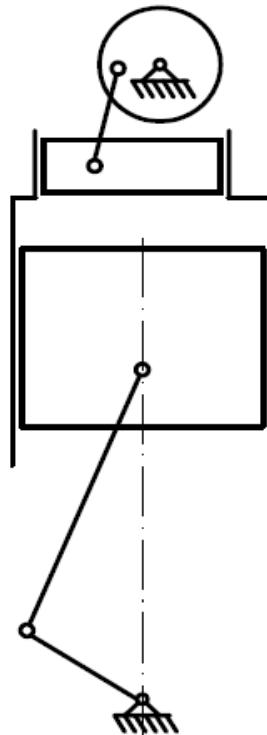
Přivedením oleje pod plášť pístu bude olej velice tepelně namáhán a bude potřeba olejový chladič. Také utěsnění bude veliký problém, který bude zajisté řešen ocelovými rozpěrnými kroužky, podobnými pístním, u nichž nedochází ke 100% utěsnění a při opotřebení hrozí přečerpávání oleje ve vřících mezi kroužkem a pístem a pak následná ztráta tlaku potřebného pro změnu komprese.

### 3.5.3 Budoucnost zajištěna

Mercedes-Benz již několik svých inovací spalovacího motoru uvedl v život v posledních modelech. Jedná se především o přímé vstřikování paliva, použití turbodmychadla a variabilního časování ventilů. Počítá však i s jinými inovacemi z konceptu F700, především s proměnným kompresním poměrem a rekuperací energie elektromotorem. Vše německý výrobce seřadil pod názvem BlueTec.

### 3.6 Lotus

Zatím pouze jako jednoválcový koncept představil v roce 2008 na Ženevském autosalonu Lotus svůj agregát s proměnným kompresním poměrem. Ten je unikátní tím, že pracuje pouze jako dvoutaktní motor s HCCI technologií a proměnou kompresí. Hodnota proměnné komprese může být od 10:1 až těžko použitelných 40:1. Této hodnoty se podařilo docílit díky unikátnímu řešení pohyblivého spalovacího prostoru. Koncept dostal název Lotus Omnivore, v anglickém překladu všežravec. Toto jméno je zcela trefné, protože agregát dokáže fungovat na jakoukoliv směs benzínu s malým oktanovým číslem, lihu a jiných biopaliv právě díky vysokému stupni komprese.



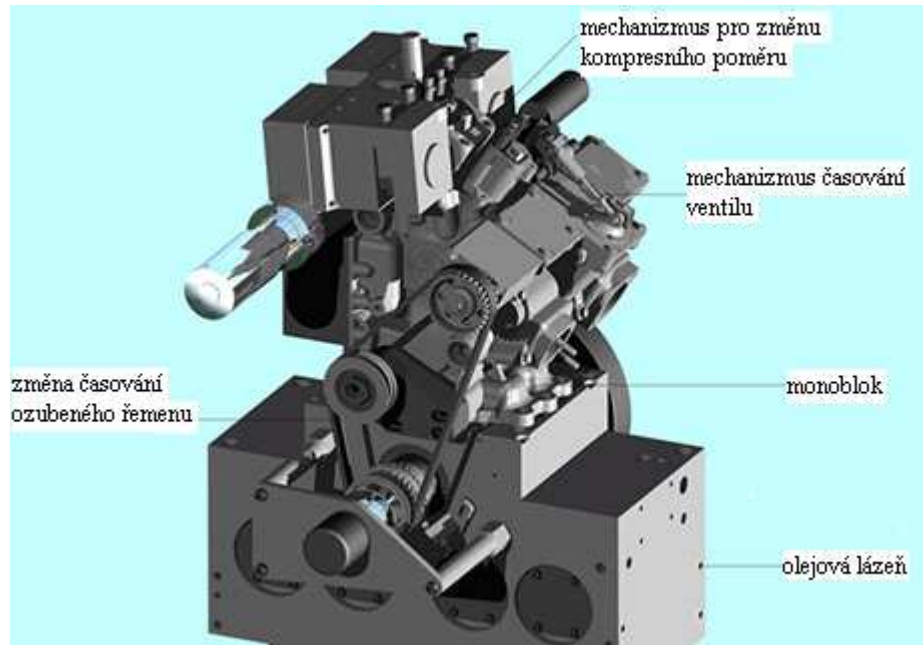
Obr. 3-16 Použité schematické řešení Lotus Omnivore

#### 3.6.1 Funkce konceptu Lotus

Díky své konstrukci mají dvoutaktní motory daleko větší termodynamickou účinnost než čtyřdobé motory. Problém však byl s velkým obsahem škodlivých emisí hlavně u výkonných motorů. Lotus však využil jednoduchosti spalovacího prostoru k řešení proměnné komprese a využil tak principu HCCI dokonce i při studených startech, ale



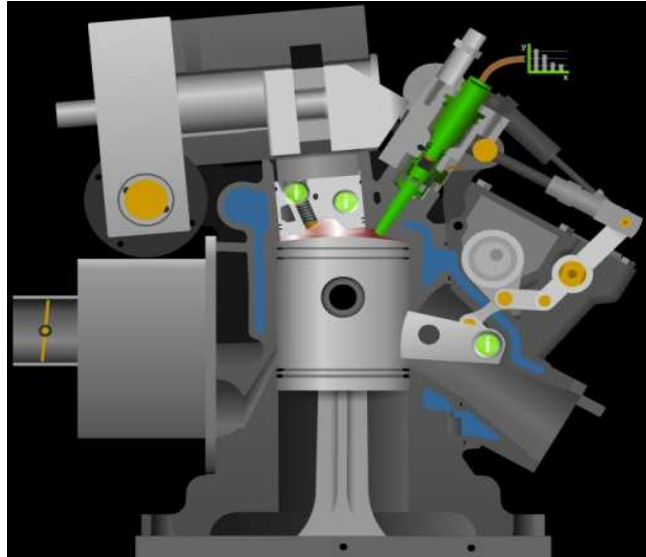
hlavně pro většinu průběhu jízd. Pokud už režim HCCI nevyhovuje jízdnímu stylu, a to hlavně při vysokých zatíženích, je použito zapalovací svíčky. Tím ale vznikají vyšší emise a proto je systém také vybaven katalyzátorem. Pro změnu kompresního poměru se anglická firma vydala posuvem části spalovacího prostoru, čímž ovlivňuje hodnotu  $V_p2$ . Toto řešení však neznamená výraznou změnu do geometrie spalovacího prostoru a minimálně tak mění šíření plamene při zážehu. Při homogenním vznícení nevznikne čelo plamene, a tedy změněná geometrie nijak neruší hoření.



Obr. 3-17 konstrukce Lotus Omnicore

### 3.6.2 Konstrukční řešení Lotusu

Lotus si zvolil dvoutaktní koncepci zcela záměrně, protože je méně náročná na výrobu. Válec s hlavou jsou monoblok, tím tedy odpadá těsnění pod hlavu a v hlavě nejsou ventily ani vačky, ale pouze mechanismus na proměnný kompresní poměr, vstřikovač a zapalovací svíčka. Díky absenci sacích a výfukových ventilů v hlavě válců je plocha mechanismu na změnu kompresního poměru v prostoru pro spalování maximalizována, aby nebyla příliš měněna geometrie spalovacího prostoru, a v jejím středu je zapalovací svíčka. Původní konstrukce dokonce uvažovala s celým proměnným prostorem pro spalování, tedy i s pohyblivým vstřikovačem paliva. Jelikož je ale palivo vstřikováno pod vysokým tlakem, změny polohy potrubí by byly nežádoucí. Spalovací prostor je tvořen dalším pístem, který svou změnou polohy mění kompresní poměr. Změnu polohy určuje excentrická hřídel, která je natáčena elektronicky. Největší nevýhodou této koncepce je velikost pístu a jeho hmotnost, která působí větší silové namáhání na ložiska a klikovou hřídel. Píst je rozměrný díky nutnosti uzavírání sacích a výfukových kanálů. Z důvodu utěsnění je píst osazen čtyřmi pístními kroužky, sice dvěma těsníci a dvěma stíracími, ale i tak bude tření vyvolávat veliké teploty a působit opotřebení válce.



*Obr. 3-18 Konstrukční řešení Lotusu*

I když většina HCCI motorů pracuje bez škrticí klapky v sání, model Lotusu ji má, a tak umožňuje přímou regulaci množství nasátého vzduchu. Variabilní je na rozdíl od sacího kanálu poloha kanálu výfukového. Jeho polohu určuje pákový mechanismus s excentrickou vačkou, která je spojena přes ozubený řemen s řemenicí klikové hřídele a dalšími komponenty. Pohyb mechanismu časování výfukového šoupátka je tedy řízen čistě jen zatížením motoru.

### **3.6.3 Současnost u Lotusu**

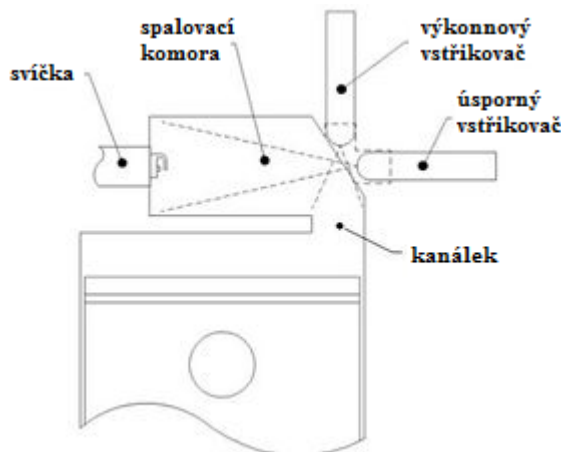
Inženýři Lotusu jsou zatím ve fázi vývoje a testování konceptu pro použití pro víceválcový motor. Spolupracují s automobilkou Jaguar Cars a univerzitou Queen's University of Belfast. Zatím ani nebylo zveřejněno datum uvedení na trh nebo agregát zabudovaný do funkčního automobilu. V nejbližší době se tedy dvoudobé HCCI nedostane do sériové výroby. Předpokládá se uvedení do 10 let.

## 4 Budoucnost a ubírající se směr motorů s proměnným kompresním poměrem

V současné době je několik nových či obnovených myšlenek, kde by se dal použít proměnný kompresní poměr. Jestli se však budoucí směr vývoje agregátů bude ubírat ke spalování fosilních paliv, budeme se stále více setkávat s motory HCCI. Tedy benzínovými motory, chovajícími se jako naftové, které si od obou vezmou jen ty lepší vlastnosti. Anebo se můžeme setkat s ještě netradičními konstruktérskými výstřelky.

### 4.1 Předkomůrka v benzínovém motoru

Dnes již nepoužívané řešení u vznětových motorů byla oživena v roce 2007 ve Velké Británii v Coventry University, ale v zážehovém motoru. Koncept byl nazván MUSIC (Merritt Unthrottled Spark Ignition Combustion). Principiálně se od starých dieslových motorů liší jen minimálně. Pro přípravu, zapálení a větší část hoření slouží oddělená komůrka umístěná mimo válec. Celá komůrka je ukryta v hlavě válce a s válcem je spojena pouze malým kanálem. V ústí kanálu jsou umístěny dva vstřikovače, používané podle zatížení. Během komprese se žene vzduch přes kanál a tvarování komůrky způsobí silnou šroubovitou rotaci, do které je vstříknuto palivo. Tím vznikne vrstvená směs. Pro zapálení ideální stechiometrická směs vznikne pouze u svíčky a směs směrem k pístům je chudší díky vysoké teplotě a následnému odpařování paliva. Chudší vrstvy směsi začnou hořet postupně s čelem plamene. Jelikož motor pracuje bez škrticí klapky, je poměr vzduchu ku palivu až 150:1. Speciální hlava válce byla vyzkoušena v sériovém vozu Ford Mondeo 1800 cm<sup>3</sup>, kde průměrná spotřeba klesla o necelých 20%. Nejvíce se ale spotřeba snížila při nízkých zatíženích, a to až o 42%. Z těchto výsledků vyplývá, že koncepce motoru s komůrkou bude spíše pro motory s větším objemem, které častěji pracují v částečném zatížení. Nečekaných výsledků také dosáhly hodnoty emisí, a to až 80% snížením NO<sub>x</sub> a nespálených uhlovodíků. Potřeba katalyzátoru je pouze při vysokém zatížení.



Obr. 4-1 Koncepce MUSIC

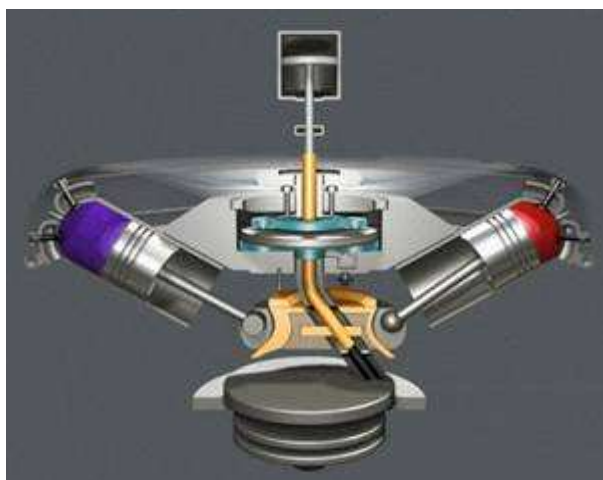
Celková hodnota účinnosti 40% dělá z konceptu MUSIC velice slibnou vyhlídku do budoucnosti, ve které by se měl objevit i mechanismus pro změnu kompresního poměru. Mechanismus by měl zmenšovat či zvětšovat prostor komůrky i s tělesem zapalovací svíčky, a tím měnit kompresní poměr. Tím se docílí ještě menší spotřeby paliva, nižších emisí a vyšší účinnosti. Výroba by neměla být nijak složitá, protože se může použít již klasická koncepce motoru. Přepracovaná je jen hlava válce a řídicí elektronika.





### 4.2 Motor fungující na benzín i naftu

Společnost Hefley Engine předvedla model konstrukce hvězdicového motoru s proměnným kompresním poměrem fungující na benzín, naftu i jiná alternativní paliva různé kvality.



*Obr. 4-2 Konstrukce Hefleyova motoru*

Původní konstrukce byla navržena jen s proměnným zdvihovým objemem, která má přinést výraznou úsporu paliva podle požadovaného výkonu a kvality paliva. Válce motoru jsou uspořádány hvězdicově, nejsou však v rovině, ale svírají s ní uhel  $30^\circ$ . Výkon na kliku přenáší excentr, který ještě pomocí konstrukce kliky umožňuje měnit zdvihový objem a kompresní poměr. Hřídel je tvořena jen jednoduchým ohnutím kliky, na ní je usazen excentr, který však má svou rovinu kolmou na osu hřídele a může se po hřídeli volně posouvat a otáčet. Na excentru je nasazen ložiskový prvek, který má v sobě uloženy ojnice pístů. Posunem excentru se tak pohybují i ojnice a právě tím je umožněna změna objemu. Při rotaci je pak možné změnit kompresní poměr.

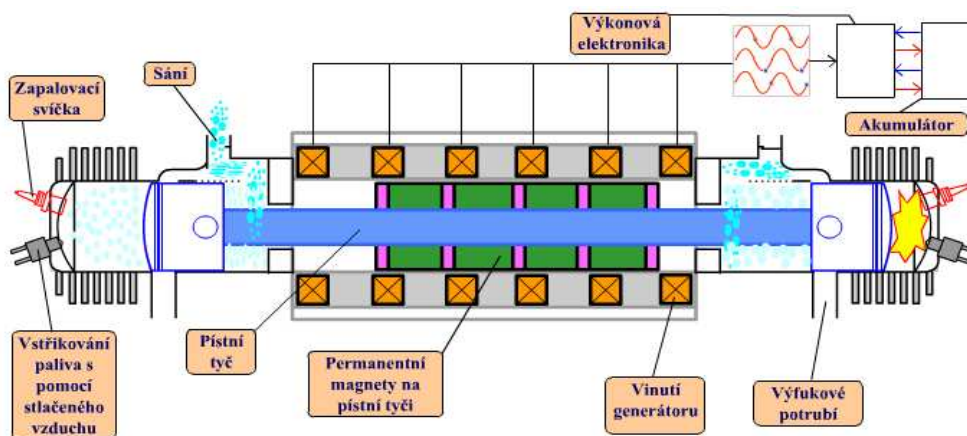


*Obr. 4-3 Způsob změny kompresního poměru a objemu válce*

Na nákresech a animacích vypadá vše chytře a funkčně, ale problém bude s konstrukcí celého agregátu. Komplikovaný systém posouvání a rotací, působení sil, zatížení klikové hřídele a tím způsobené vibrace jsou hlavním důvodem, proč ještě nebyl sestaven funkční model. Pohon na různá paliva, by také vyžadoval několik různých palivových soustav a hlavně několik vstřikovačů, nebo by bylo ještě potřeba zkonstruovat sdružený vstřikovač pro všechny druhy paliva a následně pak propojit palivovou soustavu. V současné době se hledá partner pro výzkum na Hefleyova motoru pro výrobu.

## 4.3 Lineární motor

Unikátní motor, který nevykonává rotační pohyb, ale pouze pohyb posuvný, začalo v roce 2000 zkoumat v Praze ČVUT, přidalo se tak k mnoha zahraničním univerzitám především z USA. Lineární motor je velice jednoduché konstrukce a snadno vyrobitelný, největší problém však nastává v řídicí elektronice pro jeho chod. Z tohoto důvodu se zatím žádné výzkumné organizaci nepodařilo zkonstruovat funkční dlouhodobě běžící lineární motor použitelný v automobilu. Koncepčně se jedná o dvoudobý motor, který nemá klikovou hřídel. Prozatímní prototypy na ČVUT byly dvoupístové s protilehlými písty spojenými pevnou pístní tyčí. To znamená, že jeden píst pohybující se do horní úvratě nasávanou směsí vytlačuje spálenou směs a pohyb mu dodává druhý píst, který má kinetickou energii od expanze směsi a pohybuje se do dolní úvratě. Pístní tyč je zcela volná, to znamená, že nemá vymezené dolní ani horní úvratě. Polohu úvratí zajišťuje elektronický řídicí systém ovládním proudů ve vinutí motor-generátoru. Na pístní tyči jsou permanentní magnety, které svým pohybem ve vinutí generátoru budí elektrickou energii. Ta by pak měla být přiváděna do elektromotorů v kolech a částečně i do akumulátoru a výkonných kondenzátorů. Největší problém nastává při mísení směsi ve spalovacím prostoru. Někdy totiž může u dvoutaktního motoru nastat špatné rozvrstvení směsi u zapalovací svíčky, a tím následného nezapálení směsi a vynechání cyklu, kdy dochází k okamžitému zastavení motoru kvůli absenci setrvačnicku. Setrvačnick tedy musí být nahrazen elektronicky, a to tak, že při vynechání cyklu bude tok energie přeměrován opačným směrem, stejně jako při určení polohy horní a dolní úvratí. Motor-generátor, tak musí rychle reagovat na vzniklé změny a proto je potřeba spolehlivé výkonové elektroniky a řízení mikroprocesorem.



Obr. 4-4 Konstrukce lineárního motoru

Na katedře řídicí techniky FEL ČVUT se nyní testuje pokusný lineární motor pod názvem LCE-01 sestavený ze dvou značně upravených motorů Aprilia SR 50. Tím, že motor nemá pevně stanovené polohy horní a dolní úvratě a písty se pohybují pomocí řídicí elektroniky je pro plynulý chod nutná změna kompresního poměru. Hodnota je vypočítána pomocí hodnot bezkontaktních čidel. Současný stav vývoje je ve fázi přípravy budoucího prodeje firmě, která se bude chtít podílet na dokončení vývoje a následné produkci.

Lineární motor nabízí alternativu k vodíkovému pohonu, který je nesrovnatelně dražší. Pokud se dokáže vyhladit průběh chodu motoru do funkční podoby a přidají se již vyvinuté komponenty, jako třeba rekuperace energie, výkonné kondenzátory pro rozběh motoru a vynechané cykly, setkáme se s těmito lineárními motory v hybridních automobilech budoucnosti.



## 5 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo zmapovat předchozí a současný vývoj konstrukce motorů s proměnným kompresním poměrem a podhalit budoucí směr vývoje tohoto systému. Z uvedeného textu lze usoudit, že problém proměnného kompresního poměru je na okraji při řešení konstrukce moderního agregátu. Některé automobilky však nedávají svoje konstrukce ve známost široké veřejnosti z důvodu obavy kopírování technologie a snaží si tak ponechat určitý utajovaný náskok před konkurencí, nebo se tak snaží právě naopak utajit svoji chabou inovací a řešení nových nápadů.

V minulosti neviděly automobilky příliš velkou budoucnost v motoru, který by plynule měnil kompresní poměr a využíval tak nekvalitní palivo při nízké spotřebě a nízkých emisích. Jedinými, kdo začal uvažovat o této možnosti a uvedl jí v život, byli SAAB a Mercedes-Benz. Nevalná spolehlivost konstrukce však vedla k tomu, že SAAB sice svoji podobu převedl na prototyp, ale do sériové podoby se nikdy SAAB 9-5 1,6 SVC nedostal. Mercedes-Benz technologii předvedl až v poslední době v prototypu F 700. Jiné technické výstřelky zůstaly pouze u simulací anebo u zkušebních prototypů.

V současné době však existuje několik příčin, proč hledat nová řešení v konstrukci moderních motorů. Jsou to neustále se zpřísnující emisní předpisy výfukových plynů, nedostatek fosilních paliv a jejich následná vyšší cena, nebo nižší kvalita, malá využitelnost energetického potenciálu paliva, charakteristika motoru a mnoha dalších. Významný je také tlak konkurence a budování dobrého jména automobilky. Proto se většina velkých světových automobilek otázkou konstrukce proměnného kompresního motoru zabývala, ale jen některé byly dotaženy do funkčních modelů nebo dokonce prototypů. Je to i tím, že současná společnost nevidí budoucnost ve spalovacích motorech, ale v alternativních pohonech a hybridních automobilech, kde je spalování paliva jen okrajové a spíše doplňkové.

V budoucnosti se sice můžeme setkat s ještě novými konstrukcemi systému, kde bude proměnný kompresní poměr, ale bude to jen chabý pokus zabránit nevyhnutelnému rozvoji moderních hybridních automobilů, poháněných na elektřinu či vodík, nebo jiná alternativní paliva. Dokud bude dostatek fosilních paliv, je opuštění klasické koncepce spalovacího motoru nereálné a 100let stará koncepce bude fungovat nadále.

Pokud se někdy setkáme v automobilu s motorem, jenž bude mít proměnný kompresní poměr, podle mého názoru bude buď podobný jako od firmy MCE-5 nebo to bude lineární motor. MCE-5 je velice zajímavě zpracován a pokud nebude náchylný na technické problémy a nízkou spolehlivost bude velice úspěšný. Lineární motor je velký příslib do budoucnosti hlavně pro hybridní automobily, kde bude sloužit jako zdroj elektřiny. Je však otázkou, zda se podaří tento projekt dotáhnout do úspěšného konce. Koncept je velice jednoduchý, ale problém s řídicí elektronikou a její následnou spolehlivostí bude klíčový



## 6 Seznam použitých zdrojů

- [1] *Motor – výkon motoru II.* [online]. 2009, poslední revize 20.3.2010 [cit. 2010-03-20]. Dostupné z: <http://www.automotorevue.cz/moto/technika/motor-vykon-motoru-ii.html>
- [2] *SAAB SVC – motorová revoluce* [online]. 2004, poslední revize 6.12.2004 [cit. 2010-03-25]. Dostupné z: [http://saab.euweb.cz/technika/saab\\_svc.htm](http://saab.euweb.cz/technika/saab_svc.htm)
- [3] DRAKEN. *SAAB Variable Compression – SVC* [online]. 2000, poslední revize 13.3.2000 [cit. 2010-03-25]. Dostupné z: [http://saab.misto.cz/\\_MAIL\\_/novinky/250200.htm](http://saab.misto.cz/_MAIL_/novinky/250200.htm)
- [4] VOKÁČ, Luďek. *Unikátní motor 1,5 litru: výkon šestiválce, spotřeba 6 litrů* [online]. 2009, poslední revize 1.4.2010 [cit. 2010-04-01]. Dostupné z: [http://auto.idnes.cz/unikatni-motor-1-5-litru-vykon-sestivalce-spotreba-6-litru-pmj-/automoto.asp?c=A090228\\_182905\\_automoto\\_vok](http://auto.idnes.cz/unikatni-motor-1-5-litru-vykon-sestivalce-spotreba-6-litru-pmj-/automoto.asp?c=A090228_182905_automoto_vok)
- [5] *FEV motortechnik* [online]. 2010, poslední revize 3.4.2010 [cit. 2010-04-03]. Dostupné z: <http://www.fev.com>
- [6] LÁNÍK, Ondřej. *GM představil prototyp Opelu Vectra se zážehovým motorem 2,2 ECOTEC HCCI* [online]. 2007, poslední revize 8.4.2010 [cit. 2010-04-08]. Dostupné z: <http://news.auto.cz/technika/gm-predstavil-prototypy-se-zazehovymi-motory-hcci.html>
- [7] ABUELSAMID Sam. *Lotus: Omnivore engine is 10% more efficient with more to come* [online]. 2009, poslední revize 12.4.2010 [cit. 2010-04-12]. Dostupné z: <http://www.autoblog.com/2009/12/10/lotus-omnivore-engine-is-10-more-efficient-with-more-to-come/>
- [8] *Princip lineárního spalovacího motoru* [online]. 2010, poslední revize 15.4.2010 [cit. 2010-04-15]. Dostupné z: <http://www.lceproject.org/princip/princip.php>
- [9] KOTRBA Štěpán. *LCE 01: Česká republika se může stát automobilovou velmocí* [online]. 2006, poslední revize 18.3.2010 [cit. 2010-04-20]. Dostupné z: <http://www.blisty.cz/art/28680.html>
- [10] *MCE – 5* [online]. 2010, poslední revize 22.4.2010 [cit. 2010-04-22]. Dostupné z: <http://www.mce-5.com>
- [11] *Lotus Omnivore Engine – First Phase Testing* [online]. 2010, poslední revize 23.4.2010 [cit. 2010-04-23]. Dostupné z: [http://www.grouplotus.com/engineering/green\\_technology.html](http://www.grouplotus.com/engineering/green_technology.html)
- [12] KOŠŤÁL, J., SUK, B. *Pístové spalovací motory*. 1963, Nakladatelství Československé akademie věd, První vydání, Praha, 1963.
- [13] PABST J., PILÁRIK M. *Automobily 3*. 2002, Informatorium, ISBN 8073330415
- [14] DIEM, William. *Ford, PSA vyvíjí HCCI diesel* [online]. 2006, poslední revize 19.5.2010 [cit. 2010-05-19]. Dostupné z: [http://wardsauto.com/ar/ford\\_psa\\_hcci/](http://wardsauto.com/ar/ford_psa_hcci/)



## **7 Seznam použitých zkratk a symbolů**

HÚ	horní úvrat' pístu
DÚ	dolní úvrat' pístu
$\varepsilon$	kompresní poměr
$\pi$	Ludolfovo číslo
d	průměr válce
v	výška
V <sub>v</sub>	objem válce mezi HÚ a DÚ
V <sub>p</sub>	objem spalovacího prostoru
V <sub>p1</sub>	objem spalovacího prostoru mezi HÚ a zbývajícím okrajem válce
V <sub>p2</sub>	objem hlavního spalovacího prostoru v hlavě válců, popřípadě pístu
f(x)	funkce závislá na vnějších vlivech
DOHC	double over head camshaft
HCCI	homogenous charge compression ignition
EGR	exhaust gas recirculation
ČVUT	České vysoké učení technické
USA	United States of America
LCE	linear combustion engine
VCR	variable compression ratio
DFI	direct fuel injection
VVA	versatile vehicle architecture