

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra vozidel a pozemní dopravy



Využití Wankelova motoru

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Petr Jindra, Ph.D.

Autor práce: Nikita Vojtěchová

© 2021 ČZU v Praze

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Nicola Vojtěchová

Technika a technologie v dopravě a spojích
Silniční a městská automobilová doprava

Název práce

Využití Wankelova motoru

Název anglicky

Wankel engine use

Cíle práce

Cílem práce je stručně popsat historii vzniku Wankelova motoru a jeho využití v automobilovém průmyslu až do současnosti.

Metodika

1. Úvod
2. Cíl práce
3. Přehled řešené problematiky
4. Závěr
5. Seznam použitých zdrojů
6. Přílohy

Doporučený rozsah práce

30-50 stran

Klíčová slova

emise, výkon, točivý moment, historie

Doporučené zdroje informací

HROMÁDKO, J. – ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE. STAVEBNÍ FAKULTA. *Speciální spalovací motory*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, 2011. ISBN 978-80-213-2168-7.

HROMÁDKO, J. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony : komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.

KAMEŠ, J. *Speciální motorová vozidla. Spalovací motory*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, Technická fakulta, 2002. ISBN 80-213-0895-8.

Předběžný termín obhajoby

2020/2021 LS – TF

Vedoucí práce

Ing. Petr Jindra, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra vozidel a pozemní dopravy

Elektronicky schváleno dne 29. 1. 2020

Ing. Martin Kotek, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 19. 2. 2020

doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

V Praze dne 14. 05. 2021

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Využití Wankelova motoru" jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autorka uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušila autorská práva třetích osob.

V Praze dne 14.5.2021

Poděkování

Ráda bych touto cestou poděkovala vedoucímu bakalářské práce, Ing. Petrovi Jindrovi, PhD. za vedení mé práce, a především mé rodině, která mě během celého studia podporovala.

Využití Wankelova motoru

Abstrakt: Bakalářská práce se zabývá představením Wankelova motoru a jeho využitím. První část práce je věnována základnímu seznámení s konstrukcí motoru, jeho geometrií a činností motoru, hlavní část jeho postupnému historickému vývoji v jednotlivých vybraných společnostech s důrazem na vývoj u společnosti Mazda, kde jsou zmíněny také úspěchy na závodním okruhu. V následující podkapitole jsou uvedeny parametry zvolených automobilů. Poslední část obsahuje zhodnocení motoru s vytyčením jeho hlavních výhod a nevýhod ve srovnání s klasickým pístovým spalovacím motorem a předpoklad možného využití Wankelova motoru v budoucnosti.

Klíčová slova: emise, historie, točivý moment, výkon, Wankelův motor

Wankel engine use

Summary: The bachelor thesis deals with the introduction of the Wankel engine and its use. The first part of the work is devoted to a basic acquaintance with the design of the engine, its geometry and engine operation, the main part of its gradual historical development in selected companies with emphasis on development at Mazda, where successes on the circuit are also mentioned. The following subchapter lists the parameters of the selected cars. The last part contains an evaluation of the engine outlining its main advantages and disadvantages in comparison with a conventional reciprocating internal combustion engine and the assumption of possible use of the Wankel engine in the future.

Keywords: emissions, history, power, torque, Wankel engine

Obsah

1	Úvod	1
2	Cíl práce a metodika.....	2
3	Přehled řešené problematiky	3
3.1	Historický vývoj motorů s kruhovým pohybem pístu	3
3.2	Popis konstrukce, geometrie a princip činnosti motoru.....	4
3.2.1	Konstrukce motoru	4
3.2.2	Geometrie motoru	5
3.2.3	Princip činnosti motoru.....	10
3.3	Vývoj a využití Wankelova motoru ve vybraných společnostech.....	12
3.3.1	Počátek vývoje.....	12
3.3.2	NSU	13
3.3.3	Citroën	16
3.3.4	Curtiss-Wright	18
3.3.5	Fichtel&Sachs	20
3.3.6	Rolls Royce a diesellový Wankel	22
3.3.7	Daimler-Benz.....	24
3.3.8	Toyo Kogyo	25
3.4	Parametry zvolených automobilů	37
3.5	Zhodnocení Wankelova motoru.....	39
3.5.1	Výhody.....	39
3.5.2	Nevýhody.....	40
3.6	Budoucnost Wankelova motoru.....	41
4	Závěr	43
5	Seznam použitých zdrojů	44
6	Přílohy.....	50

Seznam obrázků

Obrázek 1 Koncept Webbova motoru [5]	3
Obrázek 2 Příčný a podélný řez motoru KKM 250 [3].....	4
Obrázek 3 Příklady vzniku cykloid [3]	5
Obrázek 4 Epitrochoidy – trajektorie různých bodů na valcím se tělese.....	6
Obrázek 5 Schéma mechanismu	7
Obrázek 6 Patent Felixe Wankela z roku 1957 [7]	9
Obrázek 7 Princip činnosti motoru [8].....	10
Obrázek 8 Motor KKM 612 [14]	15
Obrázek 9 Citroën M35 [17]	16
Obrázek 10 Motor KKM 624 [19]	17
Obrázek 11 Schématické zobrazení různých verzí umístění sacího kanálu [23].....	19
Obrázek 12 Motocykl Hercules W2000 [25]	22
Obrázek 13 „Chatter marks“ na vnitřní straně skříně motoru [35]	27
Obrázek 14 Systém na snížení emisí s tepelným reaktorem [41]	30
Obrázek 15 Schématické zobrazení inovací na motoru 13 MPS-Renesis [23].....	34
Obrázek 16 Mazda 787B v závodě 24 hodin Le Mans v roce 1991	36
Obrázek 17 Porovnání konstrukce jednotlivých motorů [54]	39
Obrázek 18 Schéma motoru v Mazdě RX-8 Hydrogen RE [55]	41
Obrázek 19 Koncept vozu Mazda RX-Vision [59].....	42

Seznam tabulek

Tabulka 1 Přehled jednotlivých variant motoru [3]	6
Tabulka 2 Parametry zvolených automobilů [38; 50; 18; 37; 48; 29; 45; 23].....	38

1 Úvod

Historie dopravy byla bezesporu navždy ovlivněna významnými vynálezy, ať už se jednalo o vynález kola nebo v roce 1765 patent parního stroje Jamese Watta. Jedním takovým se v období rychlého průmyslového rozvoje v 19. století stal vynález spalovacího motoru, který vznikl jako výsledek pochopení základů termodynamiky či snahy o nalezení náhrady za parní energii. Za objevem zážehového čtyřdobého spalovacího motoru, který dnes pohání téměř každý automobil, stojí německý vynálezce Nicolaus August Otto, který původně dvoudobý plynový motor změnil k jeho dnešní podobě. Pracovní cyklus sestávající ze 4 fází, tedy sání – komprese – expanze – výfuk, byl nazván po něm a dodnes je znám jako „Ottův cyklus“.

[1; 2]

Neméně zajímavým se stalo vynalezení rotačního motoru, jež je dnes spojován právě s Wankelovým motorem, který se v automobilovém průmyslu těšil největší oblibě v 50. letech minulého století. Ačkoliv se o jeho zavedení do sériové výroby jako první zasloužila německá automobilka NSU, nejvýznamnější výsledky vývoje a popularizace motoru jsou připisovány japonské společnosti Mazda, která je s těmito motory v povědomí veřejnosti navždy spjata.

2 Cíl práce a metodika

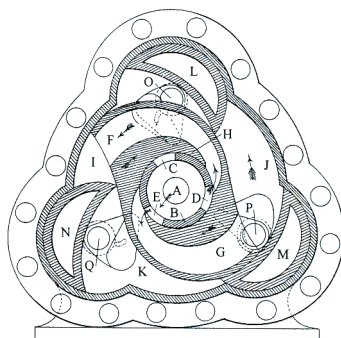
Cílem bakalářské práce je prostřednictvím globální literární rešerše zabývající se tímto tématem a prostudování základní odborné literatury stručně představit a popsat historii vzniku a vývoje Wankelova motoru a jeho využití převážně v automobilovém průmyslu až do současnosti. Mezi dílčí cíle patří také zhodnocení využití rotačního motoru s uvedením jeho hlavních výhod a nevýhod v porovnání s klasickým pístovým spalovacím motorem.

3 Přehled řešené problematiky

3.1 Historický vývoj motorů s kruhovým pohybem pístu

Přestože od vynálezu spalovacího motoru bylo vynalezeno a patentováno několik desítek motorů, obecně označovaných jako rotační motory, u nichž píst vykonává jiný než přímočarý vratný pohyb, jak je tomu u klasického pístového spalovacího motoru, tedy pohyb krouživý, prostý rotační či kývavý; do sériové výroby v automobilovém průmyslu se dostal pouze jeden. Byl jím právě motor Wankelův, který byl vyvinut v době největšího vývojového rozmachu těchto motorů, a to v první polovině 20. století. [3] [4]

Nejstarším známým konceptem rotačních motorů je motor Webbův, viz obrázek 1. Byl patentován již roku 1853, ačkoliv není jisté, zda byl někdy sestrojen funkční prototyp. [5]



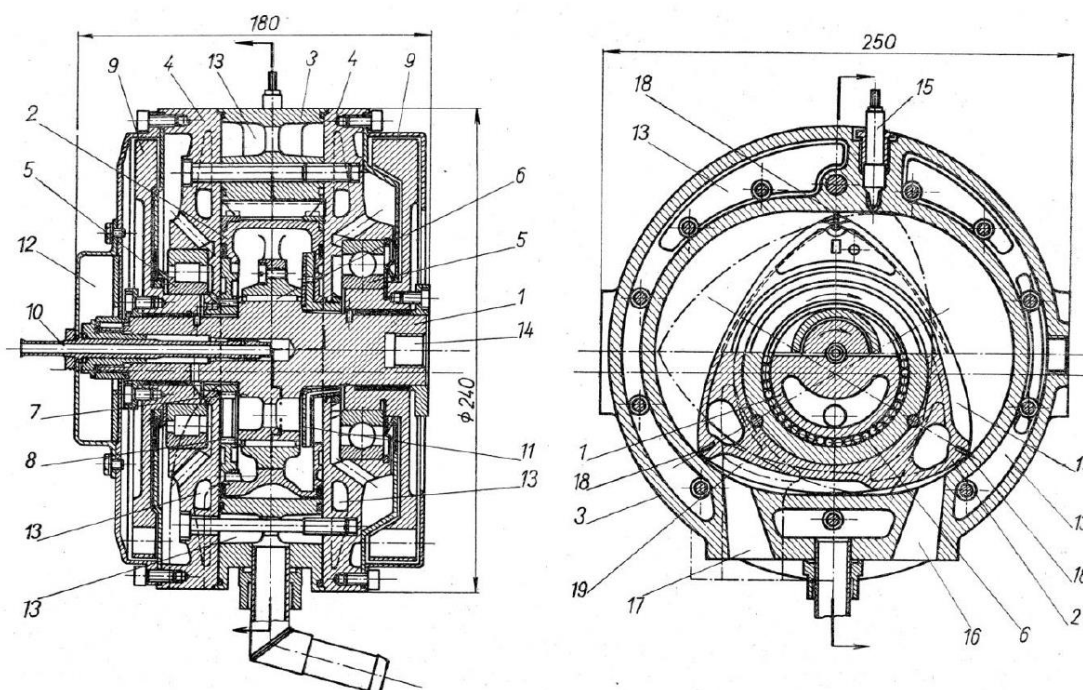
Obrázek 1 Koncept Webbova motoru [5]

V roce 1903 si nechal J.F. Cooley patentovat kapalinový rotační motor, ten byl v roce 1908 přeměněn F. Umplebyem na motor spalovací. Principem chodu tohoto motoru je skříň, která se otáčí kolem jedné osy a píst otáčející se kolem osy druhé. Následující rok přišel patent H. Graye a Ch.S. Drummonda, jehož základní konstrukce byla stejná jako u předchozího, hlavní výhodou ale tvořil fakt, že skříň s velkou hmotností se již neotáčela a také zde byly lépe řešeny další nedostatky, jako např. přívod proudu k zapalovacím svíčkám, přívod čerstvé náplně apod.; právě tento patent byl využit při vývoji Wankelova motoru. Za zmínku jistě stojí také patent rotačního kompresoru Bernarda Maillarda z roku 1943, velmi podobný Wankelovu motoru, svůj záměr využít tento vynález pro spalovací motor už ale neuskutečnil. [3]

3.2 Popis konstrukce, geometrie a princip činnosti motoru

V následující části je popsána konstrukce NSU-Wankelova motoru KKM 250 a geometrie motoru na základě literatury [3] a [6].

3.2.1 Konstrukce motoru



- 1 – hřídel s výstředníkem, 2 – píst, 3 – skříň, 4 – víka skříně, 5 – ložiska hřídele, 6 – ložiska pístu, 7 – malé ozubené kolo, 8 – velké ozubené kolo, 9 – setrvačníky s vývažky, 10 – trubka přívodu oleje, 11 – sběrná příruba oleje, 12 – prostor pro přerušovač, 13 – kanály pro chladicí kapalinu, 14 – konec hřídele, 15 – zapalovací svíčka, 16 – výfukový kanál, 17 – sací kanál, 18 – radiální těsnící lišty, 19 – vybrání v pístu

Obrázek 2 Příčný a podélný řez motoru KKM 250 [3]

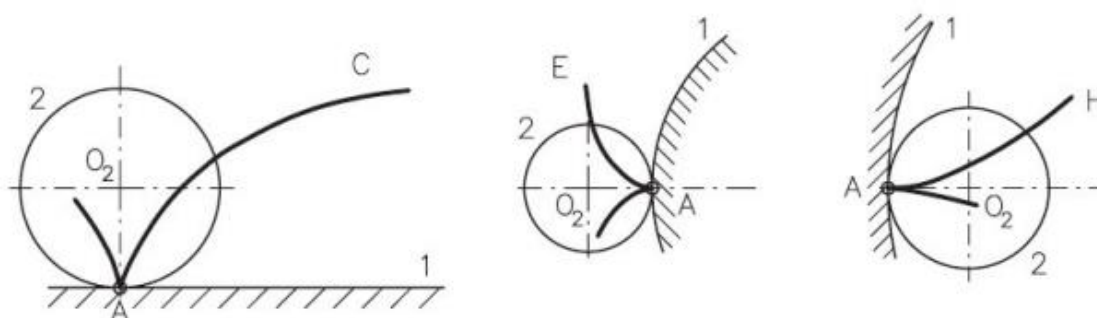
Řez motorem je zobrazen na obrázku 2. Vnitřní profil skříně 3, z obou stran uzavřené víky 4, tvoří válcová plocha, která má profil křivky zvané zkrácená *epitrochoida* (vysvětleno v kapitole 3.2.2). Krouživým pohybem se uvnitř této skříně pohybuje píst 2, jehož příčný řez má tvar trojúhelníku s boky tvořenými třemi shodnými oblouky. Ve třech rozích neboli vrcholech pístu, jsou do drážek umístěny radiální těsnící lišty 18. Při otáčení pístu jsou tyto lišty neustále ve styku s vnitřní plochou skříně a vytvářejí tak 3 oddělené komory, vzájemně posunuté o 120°, periodicky měnící svůj objem a tvořící tak pracovní prostory. Krouživý pohyb pístu je zajištěn velkým ozubeným kolem 8 a malým ozubeným kolem 7, které je pevně připojené ke skříni motoru.

Soustředně s osou pístu se nachází uložení pro výstředník hřídele motoru 1, na němž je píst neboli rotor valivě uložen. Směs vzduchu a paliva je do skříně přiváděna kanálem 17 překrývaným pístem a po kompresní fázi zapálána zapalovací svíčkou 15. Místo umístění sacího kanálu na obvodu skříně je také možné jeho umístění na víku neboli stěně skříně. Po dokončení fáze expanze jsou výfukové plyny odvedeny kanálem 16 do výfukového potrubí. Skříň motoru je chlazená vodou pomocí kanálů pro chladicí kapalinu 13, naopak vnitřek pístu je chlazen olejem pomocí trubky 10.

Počet zubů velkého ozubeného kola vůči malému je v poměru 3:2, zatímco poměr otáček hřídele a pístu vůči skříně je 1:3. To tudíž znamená, že během jedné otáčky pístu se hřídel otočí třikrát. Motor je mechanicky dokonale vyvážený, zůstává pouze nerovnoměrnost rotace. Vyvážení jednotlivých rotujících částí je provedeno pomocí vývážky na setrvačnicích 9 umístěných na hřídeli.

3.2.2 Geometrie motoru

Body válcového tělesa valícího se po jiném pevném tělese, se pohybují po trajektoriích, cyklických křivkách nazývaných trochoidy. Při valení tělesa po vnější straně pevného válce tvoří trajektorie bodů tzv. epitrochoidy, při valení po vnitřní straně mají trajektorie bodů tvar hypotrochoid. Podle polohy bodu na valícím se tělese můžeme rozlišit různé typy epitrochoid, resp. hypotrochoid. Pokud body leží přesně na povrchu válce, tj. na hybné polodii, nazývají se jejich trajektorie epicykloidy, resp. hypocykloidy a jsou zobrazeny na obrázku 3. Příklad epitrochoidy je zobrazen na obrázku 4.



a) vznik prosté cykloidy C, b) vznik epicykloidy E, c) vznik hypocykloidy H

Obrázek 3 Příklady vzniku cykloid [3]

Jestliže leží body uvnitř hybné polodie, vytvářejí zkrácené epicykloidy, resp. zkrácené hypocykloidy, v opačném případě se jedná o prodloužené epicykloidy, resp. prodloužené hypocykloidy.

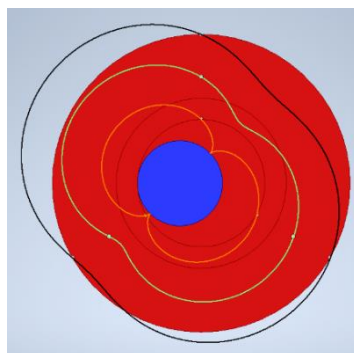
Motory s krouživým pohybem pístu lze podle tvaru povrchu dílů rozdělit do dvou základních skupin, a to s profilem ve tvaru epitrochoidy označené „E“ a hypotrochoidy označené „H“.

Každou z těchto skupin lze následně rozdělit podle obalové křivky, a to s obalovou křivkou vnitřní s označením „i“ nebo vnější s označením „a“. Jednotlivé podskupiny jsou přehledně uvedeny v následující tabulce:

<i>označení</i>	<i>tvar profilu</i>	<i>obalová křivka</i>
<i>E_i</i>	epitrochoida (skříň)	vnitřní (píst)
<i>E_a</i>	epitrochoida (píst)	vnější (skříň)
<i>H_i</i>	hypotrochoida (skříň)	vnitřní (píst)
<i>H_a</i>	hypotrochoida (píst)	vnější (skříň)

Tabulka 1 Přehled jednotlivých variant motoru [3]

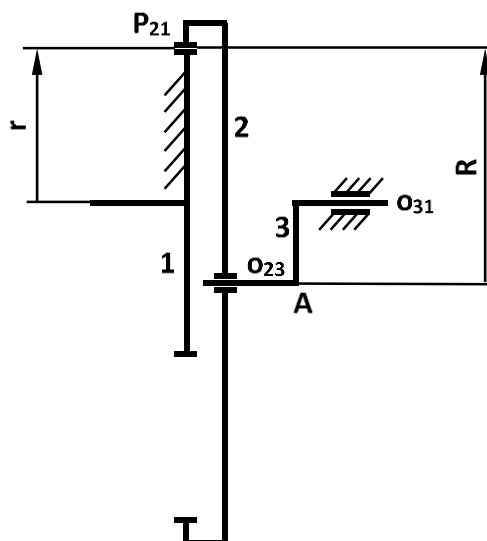
V každé z těchto podskupin lze vytvořit nekonečně mnoho provedení podle převodového poměru. Ten závisí na poloměru R valčího se tělesa a poloměru r pevného válce. Valení je realizováno prostřednictvím ozubení obou těles, pak jsou dané polodie shodné s roztečnými kružnicemi ozubených kol. Poměr $i = \frac{r}{R}$ musí mít kvůli zamezení vzájemného protínání trajektorie hodnotu za sebou jdoucích čísel, tedy; 1:2, 2:3, 3:4 atd. Praktický význam mají ale pouze provedení s převodovými poměry 1:2 až 4:5. Přidáním tohoto poměru za výše uvedené označení vznikne označení konkrétní varianty motoru.



Obrázek 4 Epitrochoidy – trajektorie různých bodů na valčím se tělese

Ze všech těchto možných variant motorů s krouživými písty vybral Felix Wankel nejuvhodnější variantu *Ei 2:3*. Teoretický tvar příčného profilu skříně Wankelova motoru je tvořen zkrácenou epitrochoidou, teoretický profil boku pístu je obalovou křivkou této epitrochoidy.

3.2.2.1 Odvození vztahu pro převodový poměr



Obrázek 5 Schéma mechanismu

Těleso 2 o poloměru R je píst, rotor, který se valí po nehybném tělese o poloměru r , těleso 3 je hřídel. Schematicky na obrázku 5. Pro každý bod tělesa 2 platí rozklad současných pohybů ve tvaru:

$$2:1 = 2:3 + 3:1 \quad (1)$$

Pohyb tělesa 2 vůči rámu 1 se skládá z pohybu tělesa 2 vůči tělesu 3 a pohybu tělesa 3 vůči rámu 1.

Rychlost každého bodu tělesa 2 vůči rámu 1 lze tedy vyjádřit ze vztahu:

$$\vec{v}_{21} = \vec{v}_{23} + \vec{v}_{31} \quad (2)$$

Pro body na ose o_{23} , tj. osy rotace tělesa 2 vůči tělesu 3, např. pro bod A musí platit:

$$A: \vec{v}_{23} = 0 \quad (3)$$

takže pro bod A na o_{23} platí:

$$A: \overrightarrow{v_{21}} = \overrightarrow{v_{31}} \quad (4)$$

Za rychlost v_{31} bodu A na rotujícím tělese 3 lze dosadit známý vztah:

$$v_{31} = \omega_{31} \overline{AO_{31}} = \omega_{31} (R - r) \quad (5)$$

kde ω_{31} je úhlová rychlost tělesa 3 vůči rámu I .

Za rychlost v_{21} bodu A na tělese 2, které se pohybuje obecným rovinným pohybem (valením po tělese o poloměru r), lze dosadit vztah:

$$v_{21} = \omega_{21} \overline{AP_{21}} = \omega_{21} R \quad (6)$$

kde ω_{21} je úhlová rychlost tělesa 2 vůči rámu I .

Vektory obou rychlostí mají stejnou orientaci (bod A je na stejné straně od osy rotace o_{31} i pólu pohybu P_{21}), po dosazení dostáváme:

$$\omega_{21} R = \omega_{31} (R - r) \quad (7)$$

Místo úhlových rychlostí je možno psát příslušné otáčky, takže převodový poměr vychází:

$$\frac{n_{31}}{n_{21}} = \frac{n}{n_p} = \frac{R}{R - r} = \frac{1}{1 - \frac{r}{R}} \quad (8)$$

kde n jsou otáčky hřídele a n_p otáčky pístu.

Pro Wankelův motor, $r/R = 2/3$, tedy platí:

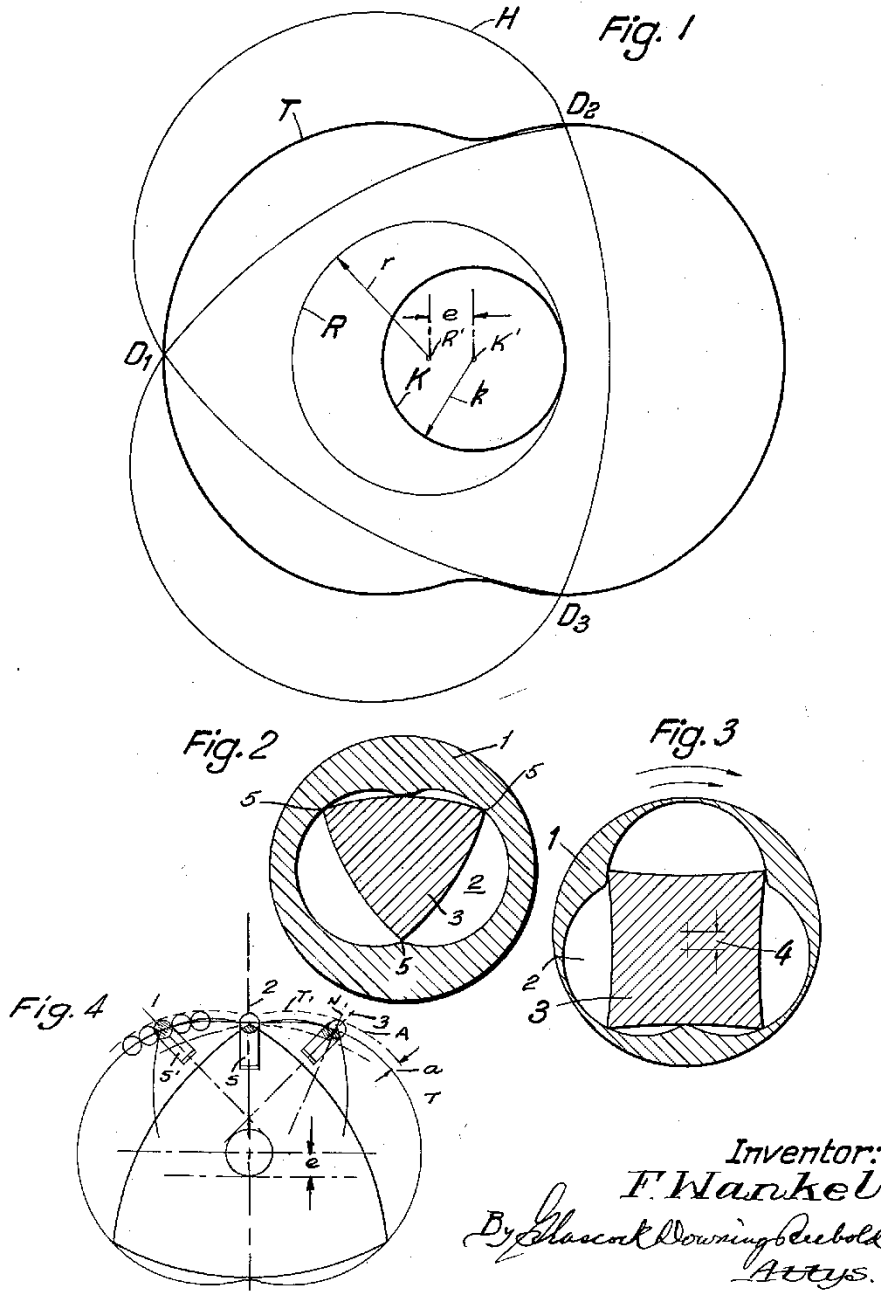
$$\frac{n}{n_p} = \frac{1}{1 - \frac{r}{R}} = \frac{1}{1 - \frac{2}{3}} = 3 \quad (9)$$

June 13, 1961

F. WANKEL
ROTARY PISTON MACHINES

2,988,008

Filed Feb. 4, 1957

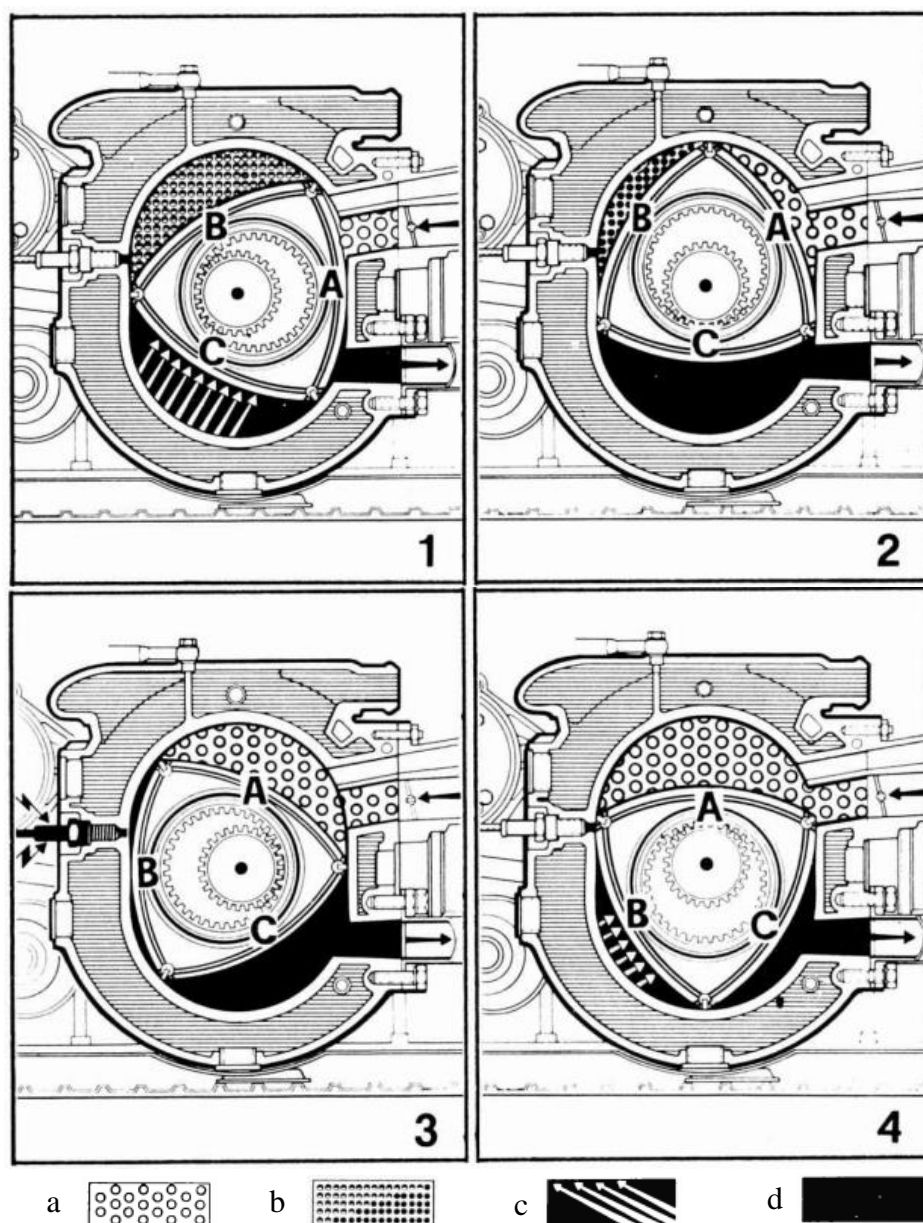


Inventor:
F. Wankel
By *Glascok Downing Deibold*
Attys.

Obrázek 6 Patent Felixe Wankela z roku 1957 [7]

3.2.3 Princip činnosti motoru

Jak bylo vysvětleno dříve, konstrukce motoru vytváří 3 oddělené pracovní prostory, a v každém z nich probíhá během otáčení pístu čtyřdobý Ottův cyklus, takže při plném otočení trojhranného pístu se vykonají tři oběhy. Díky poměru mezi otočením hřídele a pístu $3:1$ to znamená, že za jednu otáčku hřídele proběhne jeden oběh tak, jako je tomu u dvouválcového čtyřdobého motoru. Následující princip činnosti je popsán postupně při celkovém otočení pístu o 90° kolem jeho osy, a to dle použité literatury [3] a [6].



a – sání, b – komprese, c – expanze, d - výfuk

Obrázek 7 Princip činnosti motoru [8]

- 1) Zápalná směs paliva vzduchu vstupuje sacím kanálem do zvětšujícího se prostoru u boku pístu A, kde zároveň končí fáze výfuku, bok B mezitím provádí kompresi a na bok C působí expandující plyny, který otáčením pístu konají práci.
- 2) Po otočení pístu o 30° probíhá u boku pístu A stále sání zápalné směsi a u boku B pokračuje komprese. U boku C došlo k otevření výfukového kanálu a spálené plyny jsou z motoru odváděny.
- 3) Při dalším pootočení pístu o 30° pokračuje bok pístu A v sání, u boku B byla dokončena fáze komprese a stlačená směs je pomocí jiskry ze zapalovací svíčky zažehnuta, bok C dále pokračuje ve výfuku.
- 4) Při otočení pístu o 30°, tzn. o 90° z původní polohy, bok pístu A dokončuje fázi sání, nad bokem B začíná expanze produkující práci a bok C pokračuje ve výfuku.

Po otočení pístu o dalších 30° (120° z výchozí polohy) se píst dostává do své původní polohy jako na obr. 7.1 a celý cyklus se opakuje, viz obrázek 7.

V případě klasického pístového spalovacího motoru trvá jedna fáze oběhu 180° otočení kliky, tedy jednu polovinu otáčky klikové hřídele. U Wankelova motoru, v němž zároveň probíhají tři čtyřdobé oběhy, dojde za jednu otáčku výstředníkové hřídele nad každým bokem k 1/3 čtyřdobého oběhu. K vykonání jednoho celého oběhu je tudíž zapotřebí třech otáček výstředníkové hřídele, tzn. její otočení o 1 080°. Jedna fáze oběhu tedy odpovídá otočení hřídele o $\frac{1080^\circ}{4} = 270^\circ$. Z toho vyplývá, že za stejných otáček klasického pístového spalovacího motoru a motoru Wankelova trvá každá fáze pracovního oběhu 1,5krát déle než v motoru klasickém.

Výsledkem toho je sice příznivý vliv na fázi hoření ve vysokých otáčkách, kdy klasický motor z nedostatku času vykazuje nežádoucí dohořívání; zároveň ale dochází k většímu sdílení tepla do stěn motoru, protože expandující horké plyny se zde zdržují déle, v důsledku čehož je nutné účinnější chlazení motoru.

3.3 Vývoj a využití Wankelova motoru ve vybraných společnostech

3.3.1 Počátek vývoje

Felix Wankel se narodil roku 1902 (tedy rok před patentem J.F. Cooleyho) v německém městě Lahr. Třebaže nikdy nezískal žádné vyšší odborné vzdělání v technických vědách, dokonce ani za celý svůj život nevlastnil řidičské oprávnění, byl již od svého mládí přesvědčený o tom, že se mu podaří sestrojít funkční rotační motor. Tento cíl si financoval jinou výdělečnou činností, například prací jako knihkupec. Věnoval se problémům utěsnění strojních součástí pohybujících se v prostředí o velkých tlacích a teplotách, a stal se v tomto oboru prvotřídním odborníkem. V průběhu několika let se také zabýval motory s rotujícími písty. Byl si vědom nedostatků teorie těchto motorů, zejména obtížemi spojenými s utěsněním pístů ve skříní motoru. Tento zájem dokládají jeho patenty z roku 1929 a 1934. [3; 9; 10]

Jeho soukromá dílna, kterou spolu se svými přáteli neoficiálně provozoval v Heidelbergu od roku 1924 se v období mezi první a druhou světovou válkou rozrostla na opravdový závod, který nesl název Wankel Versuchswerkstätten (Wankelovy výzkumné dílny). Během druhé světové války prováděl Felix Wankel v tomto závodě výzkum a vývoj rozvodových šoupátek leteckých motorů, a to ve spolupráci s německým leteckým úřadem a současně také spolupracoval se společností BMW a Daimler-Benz. Po konci druhé světové války byl několik měsíců vězněn ve Francii a jeho závod byl zničen, jeho práce zkonfiskována a bylo mu zakázáno pokračovat ve své činnosti. [3; 9; 10]

Nicméně v roce 1951 se mu podařilo za finanční podpory společností Goetze AG vytvořit ve svém domě v Lindau nový technický ústav, neboť přesvědčil podnikatele o správnosti svých myšlenek. Jeho nedostatky v teorii, zejména v oblastech termodynamiky, kinematiky a dynamiky rotačních motorů ale přiměly podnikatele k tomu, aby tyto problémy svěřili vysoce kvalifikovaným specialistům. Už v roce 1951 začala spolupráce Wankela s vedoucím vývojového oddělení firmy NSU, Dr. Ing. Walterem Fröedem a výzkum a vývoj se postupně přesunul k této firmě, která rovněž zakoupila Wankelovu licenci. Felix Wankel ale musel slíbit, že nebude požadovat navýšení svého platu a o patenty se s automobilkou podělí. [3; 4]

3.3.2 NSU

Historie společnosti NSU (Neckarsulm Strickmaschinen Union) sahá až do roku 1873, kdy byla založena jako továrna na výrobu pletacích strojů. Postupně přešla k výrobě jízdních kol, následně motocyklů a od roku 1905 se věnovala výrobě automobilů. Během druhé světové války vyráběla společnost pásové motocykly Kettenkrad a po válce byla obnovena výroba klasických motocyklů. V roce 1955 se NSU stala největším výrobcem motocyklů na světě. K výrobě automobilů se firma vrátila až v roce 1957 s modelem NSU Prinz. [11]

Spolupráce Felixe Wankela a NSU vedla k vytvoření prvního konceptu v roce 1954 a k sestrojení jeho prvního funkčního prototypu v roce 1957. Na rozdíl od Wankelova motoru, jak ho známe dnes, se v tomto případě motoru, s označením DKM (*Drehkolbenmotor*), otáčel jak píst, tak i samotný blok – každý kolem své osy. Motor o výkonu necelých 16 kW, pracovně označovaný jako DKM 54, bylo možné využívat na extrémně vysoké otáčky, testován byl dokonce v 17 000 ot.min⁻¹. Motor o průměru pouhých 26 cm a objemu 125 cm³ dosahoval při testování hodnot nejvyššího dosaženého výkonu 22 kW právě při 17 000 ot.min⁻¹. Jediné omezení představovaly použité materiály, neboť díky jednotlivým částem motoru rotujících kolem vlastní osy byl motor výborně vyvážený a nebylo potřeba jej dodatečně vyvažovat. Při použití vhodných materiálů by teoreticky bylo možné dosáhnout běhu až při 40 000 ot.min⁻¹. Sestrojeny byly jen 4 prototypy. [3; 4; 12]

Během roku 1957 NSU upustila od původního konceptu motoru DKM, protože jeho konstrukce byla příliš složitá na to, aby bylo vůbec někdy možné jeho zařazení do sériové výroby; např. na výměnu svíčky bylo nutné celý motor rozebrat. Další výzkum byl proto zaměřen na vývoj motoru KKM (*Kreiskolbenmotor*) s planetárním pohybem pístu, který vyvinul Dr. Fröede. V tomto případě se jednalo o stacionární blok a krouživý píst, excentricky rotující okolo hřídele v trochoidním prostoru. Ten se zásadně lišil od původního Wankelova konceptu a ztratil jím navrhované revoluční vlastnosti. První zkušební motory byly vyvinuté mezi lety 1958-1960. Nejprve agregát KKM 125 o pracovním objemu komory 125 cm³, následovaný motorem KKM 250 s dvojnásobným objemem komory, ale téměř stejnou konstrukcí. [4; 12]

19. ledna 1960 byl v Mnichově německým inženýrům a tisku představen výsledek usilovné spolupráce Felixe Wankela a továren firmy NSU. Ještě v tomtéž roce byl rotační motor, nesoucí označení KKM 250, poprvé použit k pohonu automobilu, a to v upraveném

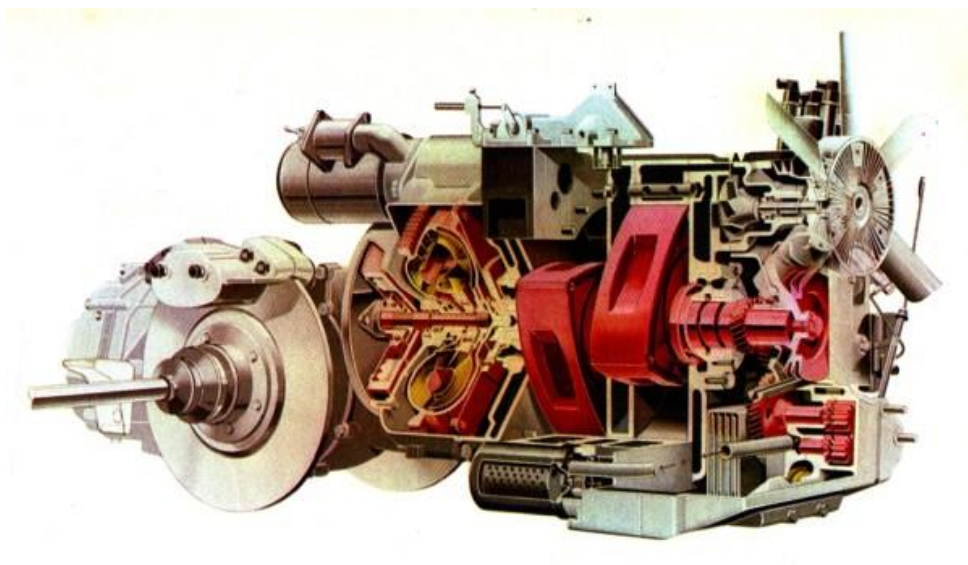
modelu NSU Prinz, původně poháněném dvouválcovým pístovým spalovacím motorem. Výkon motoru KKM 250, o pracovním objemu komory 250 cm^3 , dosahoval hodnoty maximálního výkonu necelých 23 kW při $5\,000 \text{ ot.min}^{-1}$ a v průběhu let 1960 až 1964 byl použit k pohonu mnoha různých strojů, od zahradních sekaček až po malé lodě. V té době se z Wankelova motoru stalo synonymum pro rotační motor, přestože původně nesl název NSU-Wankel. [12; 13]

Mnoho společností projevilo svůj zájem na vývoji vlastního rotačního motoru, protože měl klidný chod, byl výkonný a měl potenciál k jednoduché výrobě. Jelikož se ale jednalo o patent firmy NSU, bylo nutné zakoupení jejich licence, což v průběhu let učinilo celkem 26 společností, jako první Curtiss-Wright v roce 1958, následně Fichtel&Sachs, Yanmar Diesel a jako čtvrtá roku 1961 společnost Toyo Kogyo, dnes známá pod názvem Mazda. Jedinou podmínku prodeje bylo to, aby držitelé licence sdíleli výsledky svého výzkumu s ostatními (výjimku získala pouze americká společnost General Motors). NSU byla překvapena, jak rychle Toyo Kogyo postupovala ve vývoji vlastního rotačního motoru. Tento fakt ale urychlil vývoj motoru u NSU, protože Toyo Kogyo nemusela platit žádné poplatky za licenci, dokud NSU nenabídne k prodeji automobil, který bude mít garantovanou životnost minimálně 50 tisíc kilometrů. [12]

V roce 1963 byl na frankfurtském autosalonu představen první vůz poháněný Wankelovým motorem a následující rok začala produkce tohoto sériově vyráběného automobilu, s názvem NSU Wankel Spider, známým spíše zkráceně jako NSU Spider. Dočkal se ale jen omezené produkce, a to v letech 1964 až 1967 s počtem pouhých 2 375 vyrobených kusů. Zde použitý jednorotorový motor KKM 502 disponoval objemem $497,5 \text{ cm}^3$ a dosahoval výkonu 37 kW při 5500 ot.min^{-1} (ačkoliv v pozdějších modelech byl uváděn výkon 41 kW při $6\,000 \text{ ot.min}^{-1}$), což lehkému automobilu o hmotnosti pouze 700 kg umožňovalo dosáhnout rychlosti až 150 km.h^{-1} . [4; 12]

Roku 1967 byl představen automobil NSU Ro80 s dvourotorovým rotačním motorem KKM 612, který byl zdvojenou verzí svého předchůdce a objem jedné komory tedy byl $497,5 \text{ cm}^3$ (stejný jako u NSU Spideru), který odpovídal porovnatelnému objemu 1990 cm^3 . Motor je zobrazen na obr. 8. Nejvyššího výkonu, 85 kW , bylo dosaženo při 5500 ot.min^{-1} , což stačilo k dosažení rychlosti 180 km.h^{-1} . Jedná se o jediný dvourotorový motor s obvodovými

sacími a výfukovými kanály, jaký kdy byl umístěn do automobilu, který byl také díky své moderní karosérii a dalším neobvyklým konstrukčním prvkům vyhlášen Autem roku 1968. [4; 11]



Obrázek 8 Motor KKM 612 [14]

V roce 1969 se začalo pracovat s konceptem třírotorového motoru KKM 619 s objemem jedné komory opět $497,5 \text{ cm}^3$, s celkovým výkonem přibližně 110–135 kW. V té době ale došlo ke spojení automobilky NSU se společností Audi Union (ve vlastnictví Volkswagen) a vývoj tak nebyl dokončen. Téhož roku byl Felixi Wankelovi udělen čestný doktorát z Technické univerzity v Mnichově. [10; 12]

Snaha o soupeření se společností Toyo Kogyo nakonec vedla k zániku NSU, protože konstruktéři neměli dostatek času k vyřešení všech nedostatků motorů a použitých materiálů. NSU se snažila být lídrem ve výrobě rotačních motorů, proto omezila celou svou výrobu pouze na tyto motory, na rozdíl od Toyo Kogyo, která současně vyráběla také klasické pístové spalovací motory. Počáteční problémy se spolehlivostí rotačního motoru, které vyžadovaly opravu, někdy dokonce výměnu celého motoru, převážně ještě v záruční době, spolu s relativně vysokou spotřebou paliva (cca 14 l/100 km) odrazovaly od koupě tohoto jinak dobrého vozu a NSU tak ztrácela důvěru svých zákazníků. Nedostatečně vyvinuté motory automobilu NSU Ro80, které vykazovaly problémy už po 25 000 km, tak přivedly společnost NSU k jejímu zániku, neboť se NSU dostala do velkých finančních problémů. [11; 15]

V březnu 1969 tak byla NSU po odkoupení společností Volkswagen spojena se společností Audi pod názvem Audi-NSU Autounion (od roku 1984 pouze Audi). Žádná vyvinutá inovace již nebyla na motoru použita a v roce 1977 tak byla ukončena výroba modelu NSU Ro80 a spolu s ním veškerá výroba Wankelova motoru v Německu. [15]

3.3.3 Citroën

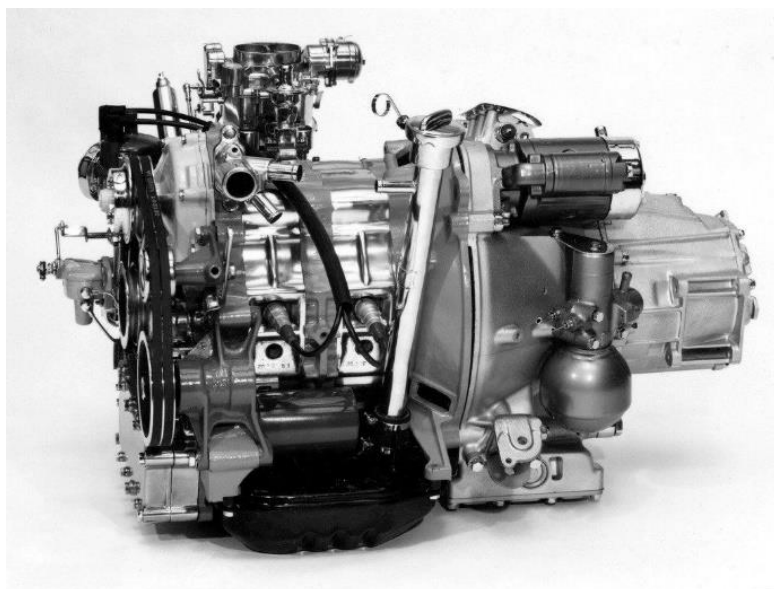
Druhá největší francouzská automobilka Citroën vždy hledala moderní technická řešení a jedním takovým měl být právě Wankelův motor. Již roku 1964 začala spolupráce této společnosti s NSU, a to založením společného podniku zvaného Comobil. V roce 1967 vyústila tato spolupráce v založení nové společnosti s názvem Comotor S.A., jejímž cílem byl vývoj a výroba rotačních motorů. Poté, co byla NSU odkoupena firmou Volkswagen, klesla ochota nového majitele k finanční spolupráci a Citroën tak výstavbu nových továren v německém městě Altforweiler poblíž francouzských hranic financoval sám. Plánovaná produkce obsahovala trojici řad různých velikostí, tedy jedno –, dvou – a třírotorových agregátů. Realizace se ale dočkaly pouze dva z nich. Citroën se tak, po společnostech NSU a Toyo Kogyo (Mazda), stal třetím a posledním výrobcem automobilů, který kdy zavedl Wankelův motor do sériové výroby. [15]

Prvním z nich byl jednokomorový motor vyvinutý v NSU, označovaný jako KKM 613, umístěný v přední části vozidla Citroën M35 (obrázek 9), který nabízel zdvihový objem $497,5 \text{ cm}^3$ a výkon 37 kW v 5500 ot.min^{-1} . V roce 1969 se automobil dostal do výroby a následoval prodej testovacích vozů. Z plánovaných 500 kusů ale do roku 1971 vzniklo pouze 267 exemplářů, neboť zkoušky spolehlivosti nebyly úspěšně. Jelikož se ale za správný postup považoval právě prodej automobilu a následný vývoj na základě zkušeností zákazníku, byl výsledek považován za vyhovující. [16]



Obrázek 9 Citroën M35 [17]

Citroën proto svou snahu nevzdal a pokračoval s vývojem nového agregátu. Následoval v Comotoru vyvinutý dvourotorový motor KKM 624 (obrázek 10), který spatřil světlo světa na závěr roku 1972. Nabízel celkový objem 2 komor 995 cm³, výkon 78 kW v 6 000 ot.min⁻¹ a točivý moment 137 Nm ve 3 000 ot.min⁻¹. Sériová výroba byla zahájena v roce 1973 a motor byl umístěn do modelu automobilu GS BiRotor, jehož klasická varianta s pístovým spalovacím motorem se prodávala již od roku 1970. Také tento model s Wankelovým motorem se ale nedočkal velkého úspěchu a počet prodaných kusů dosáhl hodnoty 847. Mimo problémy se spolehlivostí (tedy problémy spojenými s utěsněním vrcholů trojúhelníkových rotorů) tomu napomohl také fakt, že automobil zamířil na trh v době počínající ropné krize, i proto nebyl vůz s vysokou spotřebou benzínu, až 26 l/100 km v městském prostředí, příliš žádaný, navíc ani jeho cena nebyla v té době nijak přívětivá. [16; 18]



Obrázek 10 Motor KKM 624 [19]

Kvůli finančním problémům byla automobilka postupně majitelem Michelinem prodána společnosti Peugeot a nový majitel tomuto motoru příliš nepřál. Wankelův motor se naposledy u francouzského výrobce aut objevil v roce 1979 v prototypu CX a veškerý vývoj v Comotoru byl do konce roku 1980 ukončen. [16; 18]

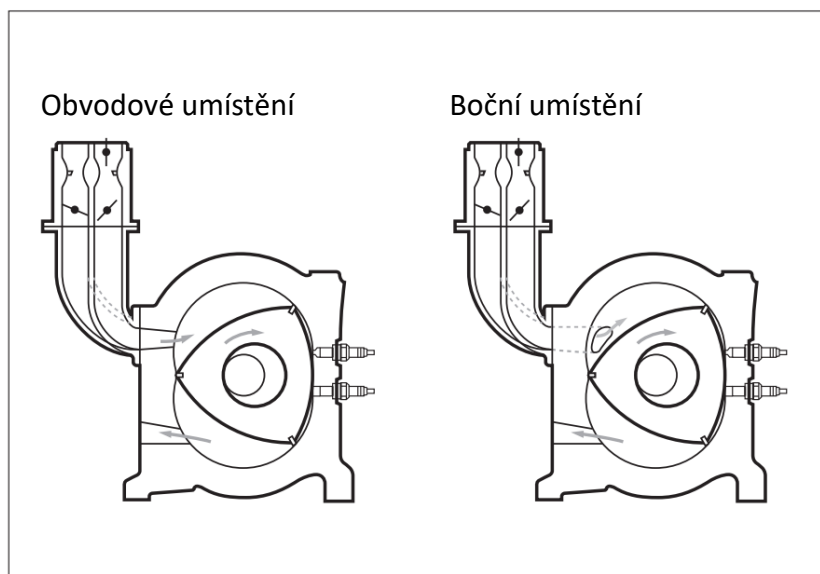
3.3.4 Curtiss-Wright

Americká továrna na letadla Curtiss-Wright, založená jako přímý nástupce společnosti založené bratry Wrightovými, vyráběla mnoho let jedny z nejlepších letadel a letadlových motorů. Poté, co její ředitel Roy Hurley získal vedení také ve společnosti Studebaker-Packard získal jeden z jejích zástupců při návštěvě Německa model Wankelova motoru. Tento motor byl následně předán jednomu z inženýrů společnosti Curtiss-Wright, aby jej přes víkend doma prozkoumal. Po tomto víkendu byl onen inženýr, Max Bentele, původem z Německa, natolik ohromen novou koncepcí motoru, že se společnost následně rozhodla pro zakoupení licence na vývoj a výrobu motorů NSU-Wankel, a to již během roku 1958 za cenu 2,1 milionu amerických dolarů a provizi 5 % ze všech prodaných motorů. Za vedoucího týmu zabývajícího se novým agregátem byl vybrán právě Max Bentele, který si jako své poradce zvolil Charlese Jonese a Ferdinanda Sollingera. [20; 21]

Ještě na podzim téhož roku začala společnost Curtiss-Wright s vývojem svého rotačního motoru 8krát větších rozměrů, než měl motor demonstrováný NSU. Tato velikost byla zvolena kvůli mínění, že se jedná o vhodnou testovací jednotku a zároveň by mohla mít mnohá využití pro vojenské i komerční účely. V přesvědčení, že NSU se nedostatky motoru snaží vyřešit jako mechanici a nikoliv inženýři, začali nejprve s matematickou analýzou a důkladným testováním. První prototyp s označením RC 1-60 (Rotating Combustion), o objemu komory 984 cm^3 , se rozběhl již v březnu roku 1959 a v prvním testu dosahoval výkonu $74,6 \text{ kW}$ při 5500 ot.min^{-1} . Následoval motor identický motoru RC 1-60 v měřítku 3,16:1, označený RC 1-1920. [22]

Bentele a Jones byli přesvědčeni, že chladicí systém navržený NSU bude u motorů o vysokém výkonu nedostačující. Ten spočíval v přivádění chladicí kapaliny do skříně a její cirkulaci po obvodu k výstupu. Protože fáze spalování probíhá na jedné straně motoru a sání na straně druhé, měl motor problémy s nerovnoměrným tepelným zatížením vedoucím k jeho namáhání a případné tepelné deformaci. Inženýři proto společně navrhli chladicí systém, který cirkuloval axiálně po celé délce motoru a poté se vracel dopředu. Také byly prováděny zkoušky za účelem nalezení nejvýhodnější polohy kanálů a jejich výsledkem bylo zjištění, že s kanálem umístěným ve víku skříně dosahuje motor nižší hodnoty maximálního výkonu, zároveň ale maximální točivý moment leží v oblasti nižších otáček, což bylo výhodnější. Mimo jiné se rovněž zabývali problémem s malou životností zapalovacích svíček, který vyřešili zavedením

kondenzátorového zapalovacího systému, který byl schopen dodat čtyřikrát větší napětí na elektrodách svíček, než je tomu u běžně používaného ústrojí. [20]



Obrázek 11 Schématické zobrazení různých verzí umístění sacího kanálu [23]

Obohaceni novými poznatky s motory o velkých pracovních objemech komory, sestrojili postupně v průběhu let mnoho verzí různých velikostí motorů, mezi nimi například vylepšený model RC 1-60, který byl svou velikostí identický předešlému. Ten měl obvodové sání a produkoval výkon až 115 kW v 7 000 ot.min⁻¹. Točivý moment byl přes 162 Nm mezi 4 000 až 6 000 ot.min⁻¹. Jako další lze poukázat například na vůbec první koncept vícerotorového agregátu, a to dokonce čtyřrotový motor 4RC-6 patentovaný již roku 1959. Tento později vedl k sestrojení motoru RC 4-60 J2 se 4 komorami, na němž byly také použity získané zkušenosti z motoru RC 1-60, a který dosahoval výkonu až 317 kW při 6 500 ot.min⁻¹ o, ale jeho vývoj byl nedlouho poté ukončen. Dále byl vyvinut také motor o pracovním objemu jedné komory pouhých 70 cm³, který produkoval výkon asi 2,6 kW při 4000 ot.min⁻¹. [20; 22]

Nejvýznamnějším výsledkem práce společnosti Curtiss-Wright byl jednoznačně dvurotorový agregát RC 2-60, s jehož vývojem se začalo v roce 1963, a který se také dočkal svého praktického využití. Při jeho vývoji se Charles Jones zaměřil na opotřebení skříně, která snižovala životnost těsnění ve vrcholech pístu. Jako řešení se mu podařilo navrhnout nový materiál k pokrytí skříně a složky této slitiny byly nejprve sčreženy jako tajemství. V roce 1965 motor dosáhl úrovně, kdy se věřilo, že jeho kvalita je srovnatelná s klasickými pístovými motory použitými v automobilech. Následovala tedy fáze, ve které bylo potřeba zjistit, zda se motor dá opravdu využít k pohonu automobilu. Ford Mustang z roku 1966, který původně

poháněl 8válcový motor s výkonem 150 kW a objemem 4,8 dm³, se stal touto testovací jednotkou poháněnou RC 2-60 U5. Nově umístěný motor, jehož objem byl 3,9 dm³, produkoval výkon 138 kW při 5 000 ot.min⁻¹. [20; 22]

Jan Norbye, automobilový reportér, jemuž byla umožněna testovací jízda, popsal tuto zkušenost mimo jiné tím, že slyšel zvuk dosud nepoznaný a auto mělo i při 6000 ot.min⁻¹ krásný zvuk a nic nenaznačovalo dosažení maximální rychlosti, dokonce se zdálo, že by bylo možné stále akcelarovat do nekonečna. V automobilovém průmyslu společnost tvrdila, že spotřeba oleje je necelý 1 l na 1 800 ujetých kilometrů a že vyřešili problémy s utěsněním a auto je schopné bez motorové závady ujet 100 000 mil (přibližně 160 000 km). Právě tento model Ford Mustang je dodnes jediným, do něhož byl kdy umístěn Wankelův motor. Následovala výroba různých verzí tohoto motoru, převážně pro vojenské účely. RC 2-60 U5 byl umístěn také do 2,5 tunového nákladního vozidla společnosti Reo a testován armádou, a vzduchem chlazená verze RC 2-90 byla vyvinutá k pohonu helikoptéry Hughes TH-55. [20]

V roce 1967 Max Bentele usoudil, že jeho práce s rotačním motorem je dokončená a společnost opustil. Vedení vývoje bylo předáno Charlesovi Jonesovi, který ve vývoji pokračoval, zatímco vedení společnosti v tichosti čekal na první velký kontrakt spojený s touto technologií. Ten ale nepřicházel, protože stále více společností si kupovalo licenci na vývoj vlastního motoru přímo od Wankela. Podle Maxe Bentela byla společnost s nabídkou jejich práce příliš konzervativní a kdyby byla více aktivní, možná by k nějaké přeci jen došlo. [20]

Společnost Curtiss-Wright veškerou svou práci, technologie a licence spojené s Wankelovým motorem roku 1984 prodala společnosti Deere and Co., dnes více známé jako John Deere, a to za cenu 14 milionů amerických dolarů. [20]

3.3.5 Fichtel&Sachs

Německá společnost Fichtel&Sachs se během druhé světové války stala oblíbeným cílem bombardování spojenců kvůli své výrobě precizních kuličkových ložisek. V roce 1960 se stala druhou společností, která zakoupila licenci na výrobu vlastního Wankelova motoru. Na začátku roku 1965 se stala prvním držitelem licence, který své motory vyráběl za komerčním účelem, neboť Curtiss-Wright a Toyo Kogyo sice vytvořili tisíce motorů, ale žádný z nich se prozatím nedostal do výroby a sloužily tak pouze k výzkumu. [20; 24]

Motor navržený společností Fichtel&Sachs, označený jako KKM 37, o objemu 108 cm³, s kompresním poměrem 8,5:1 dosahoval výkonu necelých 4,8 kW v 5 000 ot.min⁻¹. Jednalo se o vzduchem chlazený kompaktní agregát o malých rozměrech, přibližně 22 cm vysoký, 28 cm široký a 42 cm dlouhý. Malá velikost a zároveň také hmotnost necelých 14 kg mu umožnily stát se vhodnou pohonnou jednotkou například vodních pump nebo generátorů. [20]

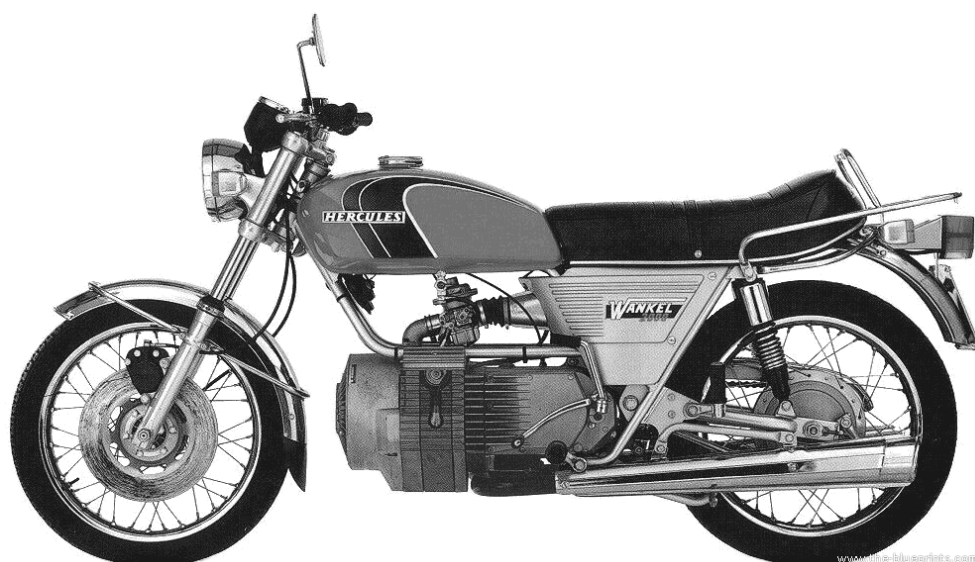
Navržení funkčního vzduchem chlazeného motoru je zvlášť obtížné kvůli potřebě chlazení rotoru. Většina návrhů proto spočívá v chlazení rotoru olejem. Klíčem k vytvoření úspěšného agregátu s vzduchovým chlazením společnosti Fichtel&Sachs spočíval v umístění chladicího sání skrze samotný rotor, principiálně byl tak motor podobný Wankelovu DKM 125. [3; 20]

Takto navržený chladicí systém dokázal udržet teplotu skříně pod 200 °C, zatímco motor dosahoval 6000 ot.min⁻¹. Tato teplota byla stejná jako u klasického vzduchem chlazeného pístového motoru o stejném výkonu. Stejně jako dvoutaktní pístový motor, byl i KKM 37 mazaný směsí paliva a oleje. Konstrukteři doporučovali 2% směs a varovali před příliš silnou směsí, která by mohla vést k tvoření uhlíkových usazenin na rotoru. [20]

Provozní rychlost motoru se ukázala být důležitým ukazatelem životnosti povrchu skříně. Bylo zjištěno, že motor při chodu ve 3 000 ot.min⁻¹ má životnost 1 500 hodin, zatímco ve 4500 ot.min⁻¹ se životnost sníží na 1 000 hodin. [20]

Fichtel&Sachs později změnili původní smlouvu s NSU, která jim dovoľovala vývoj motorů s výkonem pouze mezi 0,4 a 9 kW a posunuli tím svůj vývoj k silnějším motorům. Vytvořili tak agregát KM 914 o výkonu 15 kW a objemu 0,3 dm³, který byl použit v německém motocyklu Hercules W2000 (obr 12). Ten byl představen již v roce 1970, ale až o 3 roky později bylo vytvořeno 50 kusů, které se dostali k obchodníkům. Později, v roce 1974, byla produkce zvýšena také pro export i domácí prodej motocyklů. [8; 20]

Motocykl ale nebyl příliš silný – maximální dosažitelná rychlost byla 145 km.h⁻¹ a jeho nesilnější prodejní stránkou tak byla právě jeho inovativní technologie, stejně jako tomu bylo u mnoha jiných vozidel poháněných Wankelovým motorem. Společnost vyrobila celkem asi 1 800 kusů, předtím, než své technologie postoupila společnosti Norton Motorcycles v Anglii. Ta nadále pokračovala ve vývoji několika svých vlastních verzí Wankelova motoru a konstruovala motocykly s tímto pohonem v průběhu dalších let. [20]



Obrázek 12 Motocykl Hercules W2000 [25]

3.3.6 Rolls Royce a dieselový Wankel

Vznětové motory, které využívají teplo komprese ke vznícení zápalné směsi, obvykle využívají asi 2/3 paliva k dosažení stejného výkonu jako agregáty poháněné benzínovým palivem. Navzdory svému přetrvávajícímu velkému užitku v těžkém průmyslu a nákladních vozidlech, ztratily během 60. a 70. let na oblibě v oblasti individuální automobilové dopravy, a to především kvůli větší hmotnosti, hluku a větším vibračním ve srovnání s motory zážehovými. [20]

Wankelův motor se stal zajímavým kandidátem pro vývoj své dieselové verze, protože představoval možnost překonání nežádoucích vlastností těchto motorů. V případě vyvinutí vyhovujícího dieselového Wankelova motoru, jednalo by se, podle teorií, o motor lehčí, tišší a plynulejší než pístový spalovací motor a dlouhodobě nižší cena dieselového paliva by zároveň kompenzovala přirozeně vysokou spotřebu Wankelových motorů. Přestože se tímto vývojem zabývala již společnost Curtiss-Wright, jimi vytvořený motor sice k chodu užíval těžká paliva jako motorovou naftu nebo letecké palivo, ale k zážehu stále využíval jiskru zapalovací svíčky a nedosahoval tak vysokých hodnot kompresního poměru, nejednalo se tudíž o plnohodnotný vznětový motor. [20]

Rolls Royce, britská společnost známá především pro své mimořádně drahé luxusní automobily, preferované vyšší společností, je mezi automobilovými entusiasty již méně známá pro svůj vývoj a produkci leteckých motorů a dieselové motory těžkých nákladních vozidel,

který je jejím hlavním zaměřením. Navzdory tomu, že Rolls-Royce získal reputaci konzervativní vývojové firmy, která se spíše, než na vývoj nových technologií zaměřovala na zdokonalení osvědčených technologií; do popředí vývojového oddělení se v průběhu 60. let 20. století dostali inženýři, kteří nejenže byli dychtiví po nových technologiích, ale díky svým konexím dokázali získat finanční podporu britské armády na pokrytí většiny svého výzkumu. [26]

V roce 1965 tak Rolls-Royce získal licenci na produkci dieselových Wankelových motorů s cílem vyvinout motory převážně pro letecký průmysl. Jak se rychle ukázalo, konstrukce původního motoru NSU nezbytná k získání kompresních poměrů dieselových motorů, by vedla ke vzniku velmi velkého motoru, proto se společnost uchýlila k vývoji vlastního řešení. Princip spočíval v umístění druhého většího rotačního pístu, který byl plněný atmosféricky, neprobíhalo v něm ale spalování a pouze stlačoval vzduch, který následně posílal do menšího prostoru, kam byla vstříkována motorová nafta a docházelo zde ke spalování. Kompresní poměr se měnil podle poměru velikostí jednotlivých rotorů. [20; 27]

V té době obvykle užívaná předkomůrková konstrukce vznětových motorů byla nahrazena rychlejším přímým vstříkáváním paliva, což částečně vyřešilo problém s nevhodným tvarem spalovací komory pro vznětový princip hoření. Kvůli své konstrukci totiž představovala spalovací komora velkou plochu stěn a s tím spojené velké tepelné ztráty. [27]

Nejvýznamnějším výsledkem jejich práce, a to šestým prototypem společnosti Rolls-Royce, je dvourotorový motor s označením 2-R6, dosahující výkonu necelých 261 kW při 4500 ot.min⁻¹, o zdvihovém objemu 2 530 cm³, který již byl prezentován armádě i veřejnosti. Jeho hmotnost byla necelých 425 kg, což se jeví jako vysoká hodnota, ale poměr mezi výkonem a hmotností byl v té době bezpochyby nejlepší, klasický vznětový motor s tímto výkonem by dosahoval asi dvojnásobné hmotnosti. [27]

Přestože vývoj pokračoval dobře, byl postupně ukončen z finančních důvodů. Po svém bankrotu byla společnost znárodněna britskou vládou, a ačkoliv bylo nejprve povoleno pokračovat ve vývoji Wankelova motoru, byl tento nedlouho poté oficiálně ukončen. [20; 27]

3.3.7 Daimler-Benz

Wankelova dřívější spolupráce na armádních projektech mu zajistila mnohé kontakty, mezi nimi také Wolfa Dietera Bensingera, který již od války pracoval se společností Daimler-Benz. Bensinger měl za úkol vyvinout nové motory pro osobní automobily a byl zodpovědný za řadu 6válnových OHC (Overhead Camshaft) motorů umístěných do série označené 220, vyráběné v 50. letech 20. století. S Felixem Wankem během války spolupracoval na projektech spojených s rotačními motory a v roce 1960 ho navštívil, aby prodiskutovali možnost vývoje rotačního motoru, který by případně nahradil klasické pístové motory V6 v existujících vozech s obchodním názvem Mercedes. [8; 20]

Felix Wankel a Wolf Dieter Bensinger tak spolu nejprve uzavřeli gentlemanskou dohodu. Společnosti Daimler-Benz byly poskytnuty testovací verze motoru pod podmínkou sdílení nových poznatků ve vývoji se společností NSU, aniž by tedy došlo k prodeji samotné licence. Ani to na sebe ale nenechalo dlouho čekat a první licenční smlouva omezená na vývoj motorů s 50 a více koňskými silami (přibližně 37 kW) byla podepsána již v roce 1961, později následovala neomezená smlouva. [20]

V počátcích vývoje se u společnosti Daimler-Benz pracovalo se stejnými motory jako u NSU, tedy vodou chlazenými motory s rotory chlazenými olejem. První dvourotorový agregát o objemu 0,7 dm³ produkoval výkon až 130 kW, ale jeho životnost byla velmi nízká. Vývoj pokračoval stejně jako v jiných částech světa. Motor vydržel v chodu po dobu asi 400 hodin, než se dostavily nežádoucí vlivy konstrukce. K vyřešení problému s chlazením vnitřku rotoru bylo užito samotného pohybu rotoru, podobného jako u bubnu pračky, který rozháněl chladicí olej do 3 různých dutin. [20]

Problémy s těsněním ve vrcholech pístu se snažili nejprve vyřešit novým materiálem těsnících lišt ze slitiny uhlíku a hliníku. Během testování dosáhla těsnění životnosti až 110 000 km, což by bylo dostačující pro malé automobilky, jako byla NSU. pro Mercedes to byl ale teprve první krok. Ideální řešení nakonec bylo nalezeno v novém materiálu skříně, slitině niklu a karbidu křemíku, vyvinutém společností Mahle Kolbenwerk speciálně pro Daimler-Benz a materiálu těsnících lišt od společnosti Rolls-Royce, keramickém karbidu křemíku. V roce 1966 už Daimler-Benz testoval dvourotorový motor navržený přímo pro osobní automobily, následovala třírotová verze, která vedla k sestrojení později nejznámějšího Wankelova motoru v Mercedesu, a to v modelu C 111. [20]

Daimler-Benz zvolil pro využití svých rotačních motorů sportovní automobily. Na podzim roku 1969 byl na frankfurtském autosalónu představen speciální sportovní automobil Mercedes C 111, původně označovaný číslem 101, které ale nebylo možné veřejně prezentovat, protože označení trojčíslím s nulou uprostřed si nárokovala automobilka Peugeot jako svou ochrannou známku. [28; 29]

Mercedes poháněný třírotorovým motorem o objemu jedné komory $0,6 \text{ dm}^3$, který odpovídá objemu $3,6 \text{ dm}^3$ klasického pístového spalovacího motoru, dosahoval výkonu 206 kW při $7\,000 \text{ ot.min}^{-1}$ a maximálních hodnot točivého momentu 294 Nm mezi $5\,000$ až $6\,000 \text{ ot.min}^{-1}$, skutečný kompresní poměr motoru byl 9,3:1. Již na jaře následujícího roku byla představena nová, vylepšená verze tohoto automobilu, Mercedes C 111-II. Zde umístěný čtyřrotový motor dokázal při nezměněných hodnotách kompresního poměru a otáček zvýšit hodnotu maximálního výkonu na 257 kW a maximální rychlost stoupla z 260 na 300 km.h^{-1} . Maximum točivého momentu bylo posunuto mezi hodnoty $3\,500$ až $5\,500 \text{ ot.min}^{-1}$. S testováním se dále pokračovalo až do roku 1973, kdy přišla ropná krize, která společně s omezením emisí na území USA vedla k ukončení vývoje motoru se spotřebou až 30 l/100 km, čemuž následovala výměna Wankelova motoru v modelu označeném C 111 za vznětový, s nímž bylo později dosaženo několika světových rekordů. [3; 29; 30]

3.3.8 Toyo Kogyo

Společnost, která je dnes známá jako Mazda, byla založena v japonské Hirošimě již v roce 1920 s názvem Toyo Cork Kogyo, tedy jako podnik na výrobu korku. Během následujících let se ale její produkce začala soustředit na strojírenský průmysl a v roce 1927 tak bylo z názvu zcela vypuštěno slovo „Cork“ (anglicky korek), následovaly první náznaky výroby automobilů – firma postavila prototyp dvoudobého spalovacího motoru. První výsledek jejich práce se dostavil o 4 roky později, v podobě nákladní tříkolky s označením Mazda Go, která si v následujících letech získala velkou popularitu. Svůj název si vysloužila hned ze dvou důvodů; prvním z nich byl perský bůh slunce, moudrosti, inteligence a harmonie Ahura Mazda; druhým jméno tehdejšího ředitele Jujira Matsudy, které se vyslovovalo téměř stejně jako Mazda. Přesto bylo označení Mazda dlouho používáno pouze jako obchodní jméno. [31; 32]

V roce 1940 byl představen první prototyp čtyřmístného automobilu, ale jeho další vývoj a plánovaná produkce přerušila druhá světová válka, a především výbuch atomové bomby svržené na Hirošimu v srpnu roku 1945. Závody společnosti, které během války sloužily

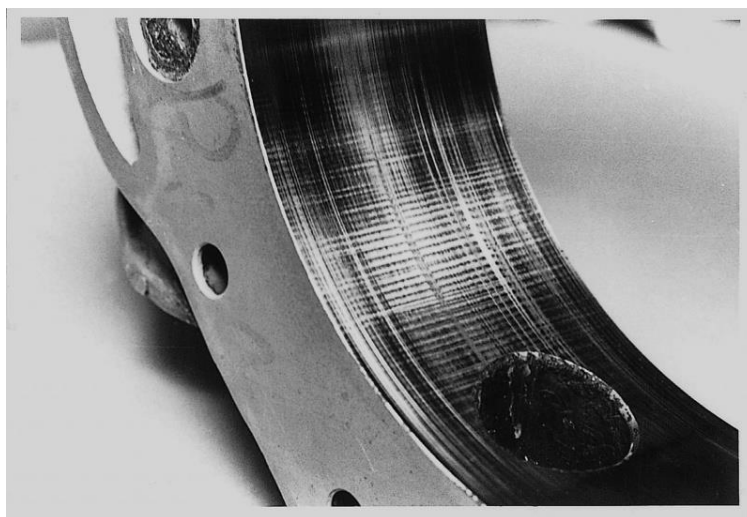
k výrobě zbraní pro japonskou armádu, ale nebyly nijak výrazně poškozeny, a tak se téměř bezprostředně po konci války začalo opět s výrobou vozidel. V roce 1949 už podnik exportoval nákladní tříkolky do Indie a do konce 50.let produkoval na 30 druhů vozidel, od již zmíněných až po pick-up Mazda Romper. [31; 33]

Zlom přišel v roce 1960 s prvním osobním automobilem Mazda R360, spadající do kategorie tzv. *kei cars*, která označuje japonský městský vůz, tzn. nejmenší vozy povolené na dálnici. Nedlouho poté následovaly další modely, např. Mazda Carol nebo Mazda Familia 800. [31]

Po rozšíření zpráv o novém rotačním motoru na sebe nenechala reakce Toyo Kogyo dlouho čekat. V říjnu roku 1960 se prezident společnosti Matsuda a pět z jeho konstruktérů vydalo do německé NSU, kde jim byly demonstrovány motory KKM 125, 250 a 400 a test vozu NSU Prinz. Inženýři NSU ohromili kolegy z Japonska skvělým vyvážením motoru, které prokázali vybalancováním mince na hraně za chodu při vysokých otáčkách. Ještě téhož roku byl sjednán prodej licence, smlouva byla poté oficiálně přijata následující rok. Kdokoliv si v té době zakoupil licenci, získal také prototyp motoru KKM 400, na jehož základě vytvořili v Japonsku vlastní prototyp. [20]

Prvním neúspěchem s tímto agregátem, který dosáhl životnosti jen 200 hodin, se ale prezident společnosti nenechal odradit a pověřil vývojem rotačního motoru strojního inženýra Kenichiho Yamamotu, který je dnes označován za jednoho z otců Wankelova motoru. [20; 31]

Motory konstruované pod vedením Yamamoty byly navrhovány převážně z lehkých slitin, železa a hliníku, povrch skříně byl pokrytý vrstvou chromu. Usoudili, že nejkritičtější překážkou k vývoji spolehlivého motoru tvoří tzv. „*chatter marks*“ – stopy opotřebení od chvění vrcholů pístu na vnitřní straně skříně způsobené probíhajícím cyklem, které výrazně snižovaly životnost motoru, viz obrázek 13. [20; 34]



Obrázek 13 „Chatter marks“ na vnitřní straně skříně motoru [35]

Ve snaze zamezit tomuto opotřebení, vyvrtali inženýři do kovového těsnění otvor o průměru 2,5 mm, což jim umožnilo dosáhnout s novým prototypem bezproblémového chodu po dobu 300 hodin. Nicméně tato technologie nebyla v sériové výrobě využita a soužila dál pouze k podpoře vývoje těsnění, a to především v oblasti použitého materiálu. V počáteční fázi vývoje rotačního motoru způsoboval další problém hustý bílý kouř způsobený olejem vnikajícím do spalovací komory, což také vedlo k jeho zvýšené spotřebě. Příčinou bylo nedostatečné utěsnění, které se ve spolupráci se společností Nippon Oil Seal a Nippon Piston Ring podařilo vyřešit pomocí speciálního materiálu, což se ukázalo jako řešení obou problémů. [34; 23]

Jedním z dalších nedostatků, kterým v Toyo Kogyo čelili, byly praskliny vznikající v okolí otvorů pro zapalovací svíčky v důsledku teplotního šoku či velkého teplotního zatížení, kdy během testů motor při relativně nízkých teplotách akceleroval až na $7\,000\text{ ot.min}^{-1}$. Následné testy ukázaly, že teplota vnitřní stěny skříně motoru, zatěžovaného bezprostředně po startu, dosahovala během jedné minuty hodnoty až 233 °C . Zlepšení chladicího systému posunula tuto hodnotu na 210 °C , ale konečné řešení spočívalo v konstrukci samotné skříně, a to konkrétně v místech pro uchycení šroubů, které držely skříně pohromadě. Stejně jako Max Bentele a Charles Jones ze společnosti Curtiss-Wright se také dlouho zabývali vhodným umístěním sacích kanálů, nakonec zvolili jejich umístění ve víku skříně. [20]

Na počátku 60. let vznikaly v Japonsku jedno –, dvou – a třírotové verze Wankelova motoru, během prvních let vzniklo až 5 000 různých vývojových fází. Jednorotorová varianta nebyla uznána za vhodnou, protože za jednu otáčku hřídele proběhne pouze jedna fáze

spalování, což vede k nízké stabilitě, velkým vibracím a malému točivému momentu v nízkých otáčkách motoru. Pozornost proto byla zaměřena na dvourotorové agregáty, v nichž byl předpokládán točivý moment stejně vysoký jako u 6válcových klasických pístových spalovacích motorů. Během roku 1963 bylo v Toyo Kogyo založeno specializované centrum pro vývoj rotačních motorů, kde pod vedením Kenichiho Yamamoty pracovalo 47 odborníků, později přezdívaných 47 samurajů. [23; 36]

Ještě na podzim téhož roku byl při příležitosti Tokyo Motor Show oficiálně představen první dvourotorový motor, označený L8A, s objemem jedné komory 399 cm^3 , umístěný v prototypu sportovního automobilu konstruovaného přímo pro rotační motor (typ L402A). V roce 1964 byl testován další dvourotorový agregát s objemem jedné komory 491 cm^3 , což následně vedlo ke zkonstruování motoru L10A, který byl umístěn do prototypu automobilu Cosmo Sport 60. Během testování dosahoval prokazatelné životnosti přes 600 000 ujetých kilometrů, během nichž sbírala Toyo Kogyo potřebné údaje k sestrojení sériově vyráběného motoru 10A. [23]

V květnu roku 1967, tedy ve stejném roce jako NSU Ro80, bylo zákazníkům nabídnuto inovativní kupé Cosmo Sport, ve kterém byl umístěn dvourotorový motor 10A-810 se zachovaným objemem jedné komory 491 cm^3 produkující výkon 82 kW v $7\,000 \text{ ot.min}^{-1}$ a poskytující točivý moment 131 Nm ve $3\,500 \text{ ot.min}^{-1}$. Netrvalo dlouho a automobil, v Evropě a na exportních trzích známý jako Mazda 110s, již v roce 1968 získal vylepšenou verzi motoru s označením 10A-813. V tomto případě produkoval při stejných otáčkách výkon 96 kW a maximální rychlost stoupla z původních 185 km.h^{-1} na 193 km.h^{-1} . Do září 1972 se výroby dočkalo jen 1 176 kusů, z toho pouhých 343 kusů v první sérii. [37; 38]

Téměř současně se také vyráběl vůz druhý, Mazda R 100 (Familia Rotary), ve kterém byl umístěný téměř stejný motor jak v předcházejícím modelu, ale jeho maximální výkon byl snížen na 75 kW v $6\,000 \text{ ot.min}^{-1}$, v pozdějších modelech byla použita vylepšená verze motoru, s označením 12A, jehož objem jedné komory byl zvětšen na 573 cm^3 . Model R 100 už se dočkal větší produkce, a také větší obliby na exportním trhu v USA. Přestože byla jeho cena v té době vysoká, lákal k nákupu díky své inovativní technologii. [13; 20; 39]

V roce 1969 se v Tokiu veřejnosti představila Mazda R 130 Coupe (Luce Rotary Coupe), které se prodávalo pouze na japonském trhu. V něm umístěný dvourotorový motor 13A s objemem jedné komory 655 cm^3 , dosahoval výkonu 94 kW v $7\,000 \text{ ot.min}^{-1}$ a jeho točivý

moment byl 172 Nm v 3 500 ot.min⁻¹. Jednalo se o jediný vůz s Wankelovým motorem přímo navržený pro pohon předních kol, díky čemuž, společně s jeho omezenou produkcí necelých 1 000 kusů, je dnes považován za cenný sběratelský exemplář. [8; 20]

Emisní omezení

Během roku 1970 začala Toyo Kogyo exportovat své vozy také do Spojených států amerických, které v té době připravovaly přijetí změny zákona o ochraně ovzduší z roku 1963. Změna tohoto zákona, označovaná podle tehdejšího amerického senátora též jako “*Muskie Act*”, byla nejstriktnějším emisním omezením, jaké do té doby USA přijaly. [23]

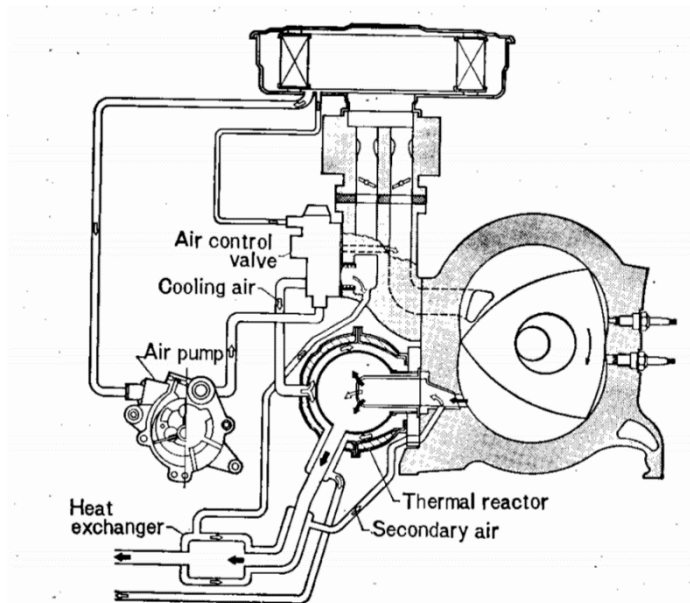
Hlavní část tohoto omezení regulovala

- emise uhlovodíků (HC) a oxidu uhelnatého (CO) o 90 % současné hodnoty pro vozidla vyrobená od roku 1975
- emise oxidů dusíku (NO_x) o 90 % průměrné hodnoty z roku 1971 pro vozidla vyrobená od roku 1976 [40]

Znečištění ovzduší ale bylo problémem rovněž v Japonsku, ačkoliv v USA se smog objevil již o mnoho let dříve. V srpnu 1967 proto Japonsko přijalo zákon o opatřeních proti znečištění a následující rok zákon o prevenci znečištění ovzduší, podle nichž bylo povinné snížit emise CO na maximálně 3 % původních. Regulace uhlovodíků v zásadě začala již v roce 1970 a od září téhož roku bylo povinné instalovat na nově vyrobená vozidla zařízení redukující škodlivost výfukových plynů, dále byly v prosinci roku 1972 vyhlášeny japonské emisní normy. Cílem emisního omezení bylo do 3 let snížit hodnoty CO na 2,1 g.km⁻¹, HC na 0,25 g.km⁻¹ a NO_x na 1,2 g.km⁻¹. [40]

V souvislosti s pozorností, která byla v této době věnována ochraně životního prostředí, započal v Toyo Kogyo během roku 1966 výzkum za účelem snížení škodlivosti výfukových plynů. Ve srovnání s klasickými motory sice Wankelův motor produkoval méně oxidů dusíku, na druhou stranu hodnoty emisí uhlovodíků byly až trojnásobné. Jednou z prvních technologií využívanou ke snížení závadnosti výfukových plynů byly tzv. tepelné reaktory. Umístění reaktorů je na obrázku 14. Ty nijak neomezovaly emise NO_x, a nekontrolovatelně snižovaly pouze hodnoty CO a HC. Zjednodušeně se jednalo se o zařízení, které sloužilo k zadržení výfukových plynů při optimální teplotě dostatečně dlouho na to, aby došlo ke zlepšení účinnosti spalování směsi paliva a vzduchu. Stejně jako u dnes používaných třicestných katalyzátorů,

byla ke správnému fungování potřeba určitá teplota, v čemž získal rychle se ohřívající Wankelův motor výhodu. Díky zlepšení této technologie dokázala Toyo Kogyo už v únoru roku 1973 projít potřebnými testy v USA, ve stejné době, kdy např. Henry Ford II tvrdil, že bez snížení nároků na omezení emisí dojde ve Spojených státech amerických ke kolapsu automobilového průmyslu. [20; 23; 41]



Obrázek 14 Systém na snížení emisí s tepelným reaktorem [41]

Menší rozměry Wankelova motoru, které už dosud patřily mezi jeho hlavní přednosti, přinesly v této době další výhody, protože v motorovém prostoru nechávaly dostatek místa pro zařízení snižující emise. I s tepelným reaktorem totiž motor stále zabíral méně místa než klasický motor o stejném výkonu bez tohoto systému. S přicházející technologií dvoucestného katalyzátoru, které je schopen účinně likvidovat HC a CO, se ukázala jeho nová výhoda, protože podmínkou použití tohoto katalyzátoru bylo spalování bezolovnatého benzínu. V té době se do paliva přidávalo tetraethylolovo jako antidetonační příměs ke zvýšení oktanového čísla u motorových benzínů potřebných pro motory s vysokým kompresním poměrem, a také napomáhalo mazání ventilů motoru. [20; 42]

Už dříve bylo dokázáno, že Wankelův motor nepotřebuje ke svému fungování benzín s vysokým oktanovým číslem, navíc v něm ani nebyly žádné ventily, které by bylo potřeba mazat. To motoru opět přineslo velkou popularitu, především v USA, protože americké společnosti jako Ford, General Motors nebo Chrysler v té době veřejně přiznávaly, že mají problém s plněním nových emisních standardů. Na konci roku 1970 společnost General Motors

oficiálně oznámila, že zakoupila licenci na výrobu Wankelova motoru a začíná s jeho vlastním vývojem. Zatímco se velké americké automobilky dostávaly do nesnází, Toyo Kogy mohla s jistotou prohlásit, že bude schopna nové emisní normy splnit. [20]

Vývoj pokračuje

V roce 1970 představila japonská automobilka model vozu Mazda RX-2 (Capella Rotary) s motorem 12A, tentokrát s výkonem 97 kW v 6 800 ot.min⁻¹ a maximální hodnotou točivého momentu 156 Nm ve 4 000 ot.min⁻¹, později byl nahrazený motorem 12B, který byl novější verzí původního. Tento automobil byl již nabízen s klasickým pístovým spalovacím motorem, a to s názvem Mazda Capella v Japonsku a Mazda 616 v USA. [13; 20; 43]

Se stejnými motory, tedy 12A a 12B, se mezi lety 1972 až 1978 prodávala také Mazda RX-3 (Savanna), ačkoliv původně se na japonském trhu objevila ještě s poslední verzí motoru 10A. Konkrétně se jednalo o dvourotorový motor 10A-0866, opět s objemem jedné komory 491 cm³, v automobilu již byl také umístěný systém na snížení emisí s tepelným reaktorem. V Mazdě RX-3 byl podruhé a naposledy použitý motor 12B, přesto se stal důležitou součástí vývoje dalších agregátů. [23; 44]

V roce 1972 se objevila druhá generace automobilu Luce Rotary Coupe, tentokrát s názvem Mazda RX-4 (Luce Rotary). I v této generaci byl umístěný motor 12A s výkonem 97 kW. Na začátku následujícího roku se na americkém trhu objevil model Mazda Rotary Pickup (REPU). Jednalo se o první pick-up s Wankelovým motorem, a zároveň o jeden z prvních vozů, v němž byl umístěn nový agregát, a to nejznámější motor společnosti Toyo Kogyo (Mazdy), s označením 13B, který se v různých variantách vyráběl dalších více než 30 let. Ten, navzdory svému názvu, který naznačuje jeho souvislost s verzí 13A, vycházel z motoru 12A, přesněji řečeno se jednalo o jeho prodlouženou verzi. [23; 43]

Následující rok se na trhu objevil další unikát, autobus Parkway Rotary, který se prodával ve dvou variantách – pro 13 nebo 26 cestujících. Se svou maximální rychlostí až 120 km.h⁻¹ dokázal, že rotační motory nemusejí být nutně umístěné pouze v osobních automobilech. Dvourotorový motor 13B, s objemem jedné komory 654 cm³ zde produkoval maximální výkon 99 kW v 6 500 ot.min⁻¹ a maximální točivý moment ve 4 000 ot.min⁻¹ dosahoval hodnoty 180 Nm. [23]

Motor 13B byl použitý také ve 3 následujících automobilech, a to v modelu Mazda Roadpacer AP, Mazda RX-5 (Cosmo AP) a Mazda 929L (Luce Legato). Dva z nich, konkrétně Mazda RX-5 a Mazda 929L byly k dostání také s motorem 12A. [8]

Mazda RX-7 a RX-8

Když na začátku 70. let vyústily světové politické konflikty v roce 1973 v ropnou krizi, uvědomila si společnost Toyo Kogyo, že aktuální situace by mohla z důvodu vysoké spotřeby paliva Wankelova motoru znamenat jeho konec. Proto byl založen tzv. „*Phoenix Project*“, který měl za cíl snížení spotřeby paliva rotačního motoru o 20 % během prvního roku výzkumu a celkové snížení o 40 % původní spotřeby. [23]

V roce 1978 tak spatřil světlo světa přelomový automobil Mazda RX-7 (Savanna RX-7), který v sobě ukrýval výsledky tohoto úspěšného projektu. V první generaci, která se prodávala mezi lety 1978 až 1985 byl nejprve použitý motor 12A. Vůz se stal velmi populárním nejen v Japonsku, ale také ve Spojených státech amerických. Později byl agregát nahrazen novějším motorem 12A s přímým vstřikováním paliva a přeplňováním turbodmychadlem, který se mezitím objevil také ve 3. generacích vozů Luce a Cosmo, tedy modelech nazvaných Cosmo a Mazda 929 (Luce). Model Cosmo RE Turbo, který se začal prodávat v roce 1982 byl prvním vozem s rotačním motorem s turbodmychadlem a v Japonsku se v té době jednalo o nejrychlejší komerčně vyráběný automobil. V Mazdě RX-7 motor dosahoval výkonu až 121 kW v 6 500 ot.min⁻¹ a točivého momentu 161 Nm ve 4 000 ot.min⁻¹ a jeho průměrná spotřeba paliva se pohybovala kolem 10 l/100 km. S celkovým počtem necelých 475 000 prodaných kusů se z první generace Mazdy RX-7 stal nejprodávanější automobil s rotačním motorem všech dob. [23; 45]

Na konci roku 1985 představila již oficiálně přejmenovaná společnost Mazda 2. generaci vozu Mazda RX-7, která byla inspirována vozidly značky Porsche. Atmosférická verze dvourotorového motoru 13B dosahovala maximálního výkonu 110 kW, po jeho modernizaci se zvýšil na 119 kW, zatímco nový motor 13B s turbodmychadlem typu twin-scroll a mezichladičem stlačeného vzduchu dodával automobilu výkon až 136 kW (později zvýšen na 151 kW) a točivý moment byl ve 3500 ot.min⁻¹ až 245 Nm. Vůz se prodával v několika variantách, jednou z nich byl poprvé také kabriolet s Wankelovým motorem, ale jeho výbava se negativně podepsala na hmotnosti automobilu. Stejný motor, tedy 13B s turbodmychadlem, byl následně použitý také v nejnovější generaci vozu Luce. [23; 45]

Mezi lety 1990 a 1995 se v omezené produkci 8 875 kusů vyráběl vůz Eunos Cosmo, který byl výjimečný převážně tím, že se jednalo o první sériově vyráběný vůz, který byl poháněný třírotorovým Wankelovým motorem. Zatímco dvourotorové verze, například 13B, s nímž byl Eunos Cosmo také nabízen; odpovídaly porovnatelnému výkonu 6válcového klasického motoru, nový motor označený 20B-REW s dvěma turbodmychadly předčil výkon 8válcového motoru, ba dokonce dosahoval pomyslné hranice výkonu 12válcového motoru. Zdvihový objem jedné komory v tomto případě činil opět 654 cm^3 , celkový objem tedy byl 1962 cm^3 . Oficiálně bylo v $6\,500 \text{ ot.min}^{-1}$ dosaženo maximálního výkonu 206 kW, ačkoliv neoficiálně byl tento údaj vyšší. Rozdíl byl způsoben omezením japonskými normami, které stanovovaly, že žádný sériově vyráběný vůz pro silniční použití nesmí přesáhnout hodnotu maximálního výkonu právě 206 kW. Dodávaný točivý moment byl 402 Nm v $3\,000 \text{ ot.min}^{-1}$, 90 % tohoto maxima bylo k dispozici mezi $2\,500$ a $7\,000 \text{ ot.min}^{-1}$. [23; 46]

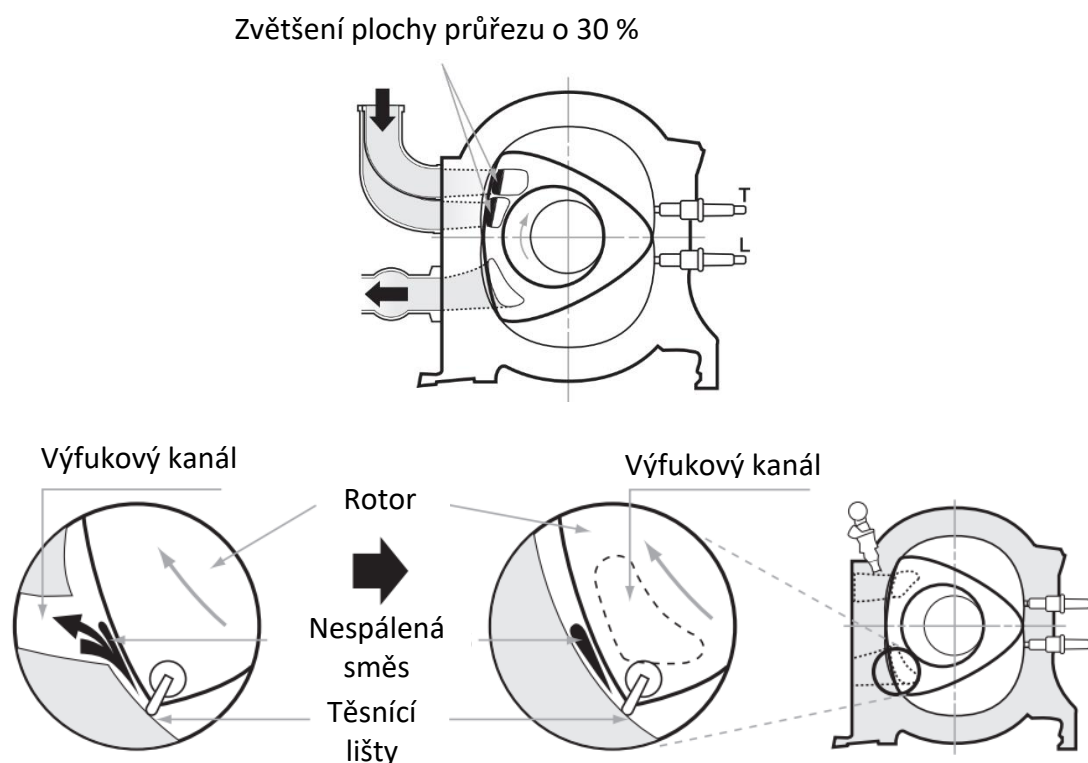
Třetí generace Mazdy RX-7 na trh přišla v roce 1991 a setrvala zde 11 let. Nový motor dostal označení 13B-REW a disponoval dvěma sekvenčně řízenými turbodmychadly, druhé z nich se k prvnímu plynule přidalo při chodu nad $4\,000 - 4\,500 \text{ ot.min}^{-1}$. V základní verzi nabízel výkon 188 kW v $6\,500 \text{ ot.min}^{-1}$ a maximální točivý moment 294 Nm v $5\,000 \text{ ot.min}^{-1}$. Později byl výkon zvýšen nejprve na 198 kW a nakonec na 206 kW, což opět odpovídalo maximálnímu povolenému výkonu sériových vozů. Počet vyrobených kusů ve všech generacích Mazdy RX-7 se při jeho ukončení výroby ustálil na hodnotě 811 634 kusů. [23; 47]

Přímým nástupcem se v roce 2003 stala Mazda RX-8, která zákazníkům nabízela zcela nový motor 13B-MSP Renesis, který ve svém názvu Renesis ukrýval spojení slov „*Rotary Engine*“ a „*Genesis*“. Agregát přinesl mnohé inovace, především za účelem snížení spotřeby paliva a emisí při atmosférickém plnění. Klíčovou novinkou bylo umístění vyústění výfukového kanálu do víka skříně stejně, jako tomu bylo u kanálu sacího. Tímto se odstraní překrytí otevření jednotlivých kanálů, což vede k lepšímu spalování směsi. V předchozím uspořádání totiž byly nespálené plyny odváděny výfukovým kanálem, nyní byly plyny ponechány v pracovním prostoru komory a spáleny v cyklu následujícím. Princip funkce je zobrazen na obrázku 15. [23; 48]

Vzhledem k poloze výfukových kanálů, současně s umístěním dvou sacích otvorů a zvětšení jejich plochy o 30 % oproti předcházející verzi motoru, došlo ke zvýšení tepelné účinnosti motoru a snížení jeho spotřeby a emisí. Celkově se tedy v motoru nacházelo

6 vyústění kanálů, 3 v každé komoře. Mimo této technologie napomohly další inovace jako např. snížení hmotnosti rotoru o 11 % tomu, aby motor získal ocenění za nejlepší motor roku 2003. [23; 48]

K dostání byla Mazda RX-8 s motorem s 2 nebo 4 sacími kanály. Významnější se jistě stal výše zmíněný motor s celkovým počtem 6 otvorů. Oproti motoru 13B-REW, který produkoval maximální výkon v $6\,500\text{ ot.min}^{-1}$ bylo tentokrát maxima dosaženo až v $8\,500\text{ ot.min}^{-1}$, v poslední verzi konkrétně hodnoty 184 kW. Maximální točivý moment byl 216 Nm ve $3\,000\text{ ot.min}^{-1}$. Navzdory veškeré snaze Mazdy se motor potýkal s problémy spojenými s utěsněním spalovacího prostoru, velkou spotřebou, a především vysokými emisemi. Právě vysoké emise CO_2 až 299 g.km^{-1} zapříčinily, že se Mazda RX-8 přestala v Evropě prodávat už v roce 2010, po zavedení evropské emisní normy Euro 5, a na ostatních trzích poté v roce 2012. Mazda RX-8 tak byla posledním sériově vyráběným vozem s Wankelovým motorem. [23; 48]



Obrázek 15 Schématické zobrazení inovací na motoru 13 MPS-Renesis [23]

Mazda na závodním okruhu

Ačkoliv se nejznámějším závodním vozem Mazdy s Wankelovým motorem díky svému vítězství v závodě 24 hodin Le Mans v roce 1991 bezesporu stala legendární Mazda 787B, úspěchů automobilka dosáhla také v jiných závodech. Nejprve v roce 1968 v soutěži Marathon de la Route jeden z nasazených modelů 110s v 84 hodin trvajícím závodě na německém Nürburgringu získal celkově 4. místo. V roce 1975 se Mazda zúčastnila australského závodu Bathurst se svou RX-3 a získala 1. místo ve své kategorii a celkové 5. místo, poražena pouze několika 8válcovými protivníky. V roce 1981 ve 24hodinovém závodě Spa-Francorchamps se Mazda RX-7 stala prvním japonským vozem, který kdy tuto soutěž vyhrál. [23; 49; 50]

Závodní vůz s rotačním motorem se v Le Mans objevil poprvé již v roce 1970, když se belgičtí závodníci zúčastnili v modelu Chevron B16 poháněným motorem 10A. O 3 roky později japonský tým Sigma Automotive závodil se svým vozem Sigma MC73 s motorem 12A. V roce 1975 se závodilo také v upraveném modelu RX-3 a v roce 1979 v upraveném modelu RX-7, ani jeden ale závod nedokončil. Poprvé se vozu s Wankelovým motorem podařilo dokončit 24 hodin trvajícím závod v roce 1980, a to dokonce na celkově 21. místě. Jednalo se opět o upravený model RX-7 s motorem 12A, patřícího k soukromému americkému týmu Z & W Enterprises Inc. Další verze RX-7 se závodů účastnily i následující 2 roky, v roce 1982 dokončila jedna z nich závod na 6. místě ve své kategorii a celkovém 14. místě, tentokrát již za japonský tým Mazda Auto Tokyo. [23]

Od následujícího roku se Mazda zaměřila na novou závodní kategorii C Junior (později přejmenovanou na C2), která limitovala minimální hmotnost vozů na 700 kg a maximální objem palivové nádrže na 55 l. Vzhledem k 5 povoleným zastávkám na 1 000 ujetých kilometrů to pro jezdce znamenalo, že povolená spotřeba paliva je 33 l/100 km. Mazda pro tuto kategorii vyvinula prototyp sportovního vozu Mazda 717C, která hned v prvním roce získala 1. i 2. místo ve své kategorii a celkové 12. a 18. místo. Téhož roku byla také oficiálně založena speciální divize nesoucí název MazdaSpeed pro sportovní vozy. V roce 1984 už se závodů účastnily 4 vozy s Wankelovým motorem, 2 z nich byly modely Mazda 727C (vyvinuté z původního prototypu) a další modely Lola T616, vozy se umístily na 1., 3., 4. a 6. pozici ve své kategorii. Následující rok závodila Mazda s vozy s označením 737C, které ale nedosáhly vytoužených prvních pozic. [23]

Pro závod v roce 1989 byla vyvinutá Mazda 757 s novým třírotorovým motorem 13G, vycházejícím z agregátu 13B. S objemem jedné komory 654 cm^3 , tedy celkem 1962 cm^3 a kompresním poměrem 9,4:1 produkoval motor maximální výkon 330 kW v $8\,500 \text{ ot.min}^{-1}$ a maximální točivý moment byl 392 Nm v $8\,000 \text{ ot.min}^{-1}$, celková hmotnost motoru byla pouhých 143 kg . Obě závodící auta ale musela ze závodu předčasně odstoupit. V roce 1988 se na startu poprvé objevila Mazda 767B, jako vylepšená verze svého předchůdce, Mazdy 767, s nově vyvinutým čtyřrotorovým motorem 13J, produkujícím výkon téměř 450 kW . Ve své kategorii GTP (Grand Touring Prototype) získala 1. místo a celkové 7. místo. [23; 51]

V roce 1990 se objevila nová Mazda 787 s čtyřrotorovým motorem R26B. Objem jedné komory byl ponechán, počet zapalovacích svíček zvýšen na 3. Motor byl schopen dosáhnout výkonu až 671 kW v až $10\,000 \text{ ot.min}^{-1}$, ale kvůli zvládnutí 24hodinového závodu byl snížen na 522 kW v $9\,000 \text{ ot.min}^{-1}$ s hodnotou maximálního točivého momentu 607 Nm v $6\,500 \text{ ot.min}^{-1}$. Oba nasazené vozy ale ze závodu předčasně odstoupily, takže vítězství v kategorii získal starší prototyp 767B. [23; 52]





Rok 1991 znamenal pro Mazdu poslední šanci, protože Mezinárodní automobilová federace rozhodla, že od následujícího roku musejí mít všechny vozy pístový spalovací motor o objemu $3,5 \text{ l}$. A právě tento rok přišlo dlouho kýžené vítězství v závodě 24 hodin Le Mans. Prototyp 787B (obrázek 16) s motorem R26B 23. října 1991 zvítězil a stal se tak jediným vozem s Wankelovým motorem, který kdy tento závod vyhrál a zároveň také získal první vítězství pro svou zemi. [23; 53; 54]



Obrázek 16 Mazda 787B v závodě 24 hodin Le Mans v roce 1991

3.4 Parametry zvolených automobilů

	Model		Produkce
	<i>NSU Ro80</i>		<i>1967-1977</i>
	Rozměry vozu	4 780 x 1 760 x 1 410 mm	
	Objem zavazadlového prostoru	0,58 m ³	
	Objem palivové nádrže	83 dm ³	
	Počet míst k sezení	5	
	Motor	KKM 612 (2 x 497,5 cm ³)	
	Maximální výkon	85 kW / 5 000 ot.min ⁻¹	
	Maximální točivý moment	165 Nm / 4 500 ot.min ⁻¹	
	Maximální rychlost	180 km.h ⁻¹	
	Spotřeba	14,2 l/100 km (průměr)	
Zajímavost	Obvodové sací kanály, Auto roku 1968		
	Model		Produkce
	<i>Citroën GS BiRotor</i>		<i>1973-1975</i>
	Rozměry vozu	4 120 x 1 644 x 1 370 mm	
	Objem zavazadlového prostoru	0,47 m ³	
	Objem palivové nádrže	43 dm ³	
	Počet míst k sezení	5	
	Motor	KKM 624 (2 x 497,5 cm ³)	
	Maximální výkon	78 kW / 6 000 ot.min ⁻¹	
	Maximální točivý moment	137 Nm / 3 000 ot.min ⁻¹	
	Maximální rychlost	173 km.h ⁻¹	
	Spotřeba	až 26 l/100 km (město)	
Zajímavost	Akustický alarm při dosažení 7 000 ot.min ⁻¹		
	Model		Produkce
	<i>Mercedes C 111-II</i>		<i>1970</i>
	Rozměry vozu	4 400 x 1 800 x 1 120 mm	
	Objem palivové nádrže	2 x 60 dm ³	
	Počet míst k sezení	2	
	Motor	M950F (4 x 600 cm ³)	
	Maximální výkon	257 kW / 7 000 ot.min ⁻¹	
	Maximální točivý moment	393 Nm / 3 500 - 5 500 ot.min ⁻¹	
	Maximální rychlost	300 km.h ⁻¹	
	Zrychlení 0 - 100 km.h⁻¹	4,8 s	
	Spotřeba	až 30 l/100 km	
Zajímavost	Aerodynamicky optimalizovaná karosérie		
	Model		Produkce
	<i>Mazda Cosmo Sport (110s)</i>		<i>1967-1972</i>
	Rozměry vozu	4 140 x 1 595 x 1 165 mm	
	Objem palivové nádrže	57 dm ³	
	Počet míst k sezení	2	
	Motor	10A (2 x 491 cm ³)	
	Maximální výkon	82 - 96 kW / 7 000 ot.min ⁻¹	
	Maximální točivý moment	131 Nm / 3 500 ot.min ⁻¹	
	Maximální rychlost	185 - 193 km.h ⁻¹	
	Spotřeba	12,5 l/100 km (deklarovaná)	
	Zajímavost	4. místo v Marathon de la Route (1968)	

	Model		Produkce
	<i>RX-3 (Savanna)</i>		1971-1978
	Rozměry vozu	4 065 x 1 595 x 1 350 mm	
	Hmotnost	875 kg	
	Objem palivové nádrže	60 dm ³	
	Počet míst k sezení	5	
	Motor	10A (2 x 491 cm ³)	
	Maximální výkon	81 kW / 7 000 ot.min ⁻¹	
	Maximální točivý moment	135 Nm / 4 000 ot.min ⁻¹	
	Spotřeba	15,3 l/100 km (deklarovaná)	
	Zajímavost	5. místo v závodech Bathurst (1. v kategorii)	
	Model		Produkce
	<i>RX-7 (3.generace)</i>		1991-2002
	Rozměry vozu	4 295 x 1 760 x 1 230 mm	
	Objem palivové nádrže	76 dm ³	
	Počet míst k sezení	4	
	Motor	13B-REW (2 x 654 cm ³)	
	Maximální výkon	188 - 206 kW / 6 500 ot.min ⁻¹ (omezeno)	
	Maximální točivý moment	294 Nm / 5 000 ot.min ⁻¹	
	Maximální rychlost	250 km.h ⁻¹	
	Zrychlení 0 - 100 km.h-1	5,3 s	
	Spotřeba	11,1 l/100 km (kombinovaná)	
Zajímavost	Přepřínání turbodmychadlem		
	Model		Produkce
	<i>Eunos Cosmo</i>		1990-1995
	Rozměry vozu	4 815 x 1 795 x 1 305 mm	
	Objem palivové nádrže	85 dm ³	
	Počet míst k sezení	4	
	Motor	20B-REW (3 x 654 cm ³)	
	Maximální výkon	206 kW / 6 500 ot.min ⁻¹ (omezeno)	
	Maximální točivý moment	402 Nm / 3 000 ot.min ⁻¹	
	Maximální rychlost	255 km.h ⁻¹	
	Zrychlení 0 - 100 km.h-1	6,5 s	
	Spotřeba	10 - 18 l/100 km	
Zajímavost	První sériové vozidlo s třírotorovým motorem		
	Model		Produkce
	<i>RX-8</i>		2003-2012
	Rozměry vozu	4 435 x 1 770 x 1 340 mm	
	Počet míst k sezení	4	
	Motor	13B-MSP Renesis (2 x 654 cm ³)	
	Maximální výkon	184 kW / 8 500 ot.min ⁻¹	
	Maximální točivý moment	216 Nm / 3 000 ot.min ⁻¹	
	Maximální rychlost	224 km.h ⁻¹	
	Spotřeba	9,33 l/100 km	
	Emise CO2	až 299 g.km ⁻¹	
	Zajímavost	Rozložení váhy 50:50, sebevražedné dveře	

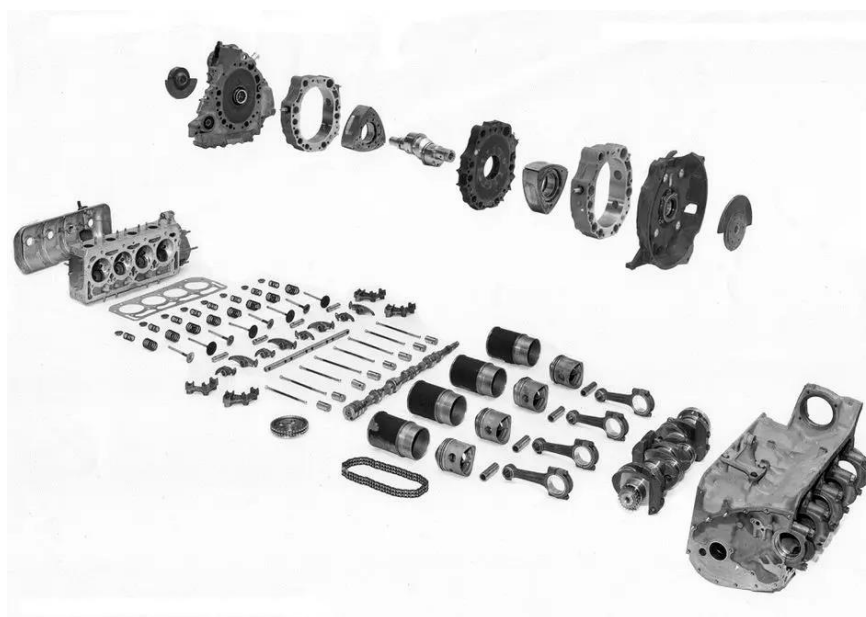
Tabulka 2 Parametry zvolených automobilů [38; 50; 18; 37; 48; 29; 45; 23]

3.5 Zhodnocení Wankelova motoru

3.5.1 Výhody

Mezi hlavní výhody rotačního motoru patří především poměr jeho objemu a produkovaného výkonu. Obecně lze říct, že při stejném objemu dosahuje Wankelův motor 2 až 3krát většího výkonu než klasické pístové spalovací motory. S tím je spojená další výhoda, a to jeho malé rozměry a také hmotnost. Díky tomu představuje motor o stejném výkonu v automobilu menší zastavěný prostor a jeho umístění je možné níže ve voze, což příznivě ovlivňuje celkovou stabilitu vozu. Pozitivum přináší také fakt, že není nutné převádět posuvný pohyb na rotační, protože ten je vykonáván motorem samotným. Díky rotujícímu pístu je motor dokonale dynamicky vyvážen, není tedy třeba jej dodatečně vyvažovat. Vyvážení také vede k tiššímu a vyrovnanějšímu chodu motoru. Není vyžadováno ani použití kvalitního motorového benzínu, čehož se využilo především při použití katalyzátoru; v neposlední řadě nutno zmínit také schopnost chodu při vysokých otáčkách. [3; 41]

Další velkou výhodou tvoří jeho jednoduchá konstrukce, především počet použitých součástí, kde jsou vypuštěny komponenty klasických motorů jako ojnice, vačky, vačková hřídel apod. S tím souvisí menší pravděpodobnost poruchy a případné nákladné opravy. Jednoduchá konstrukce motoru v porovnání s 4válcovým klasickým pístovým spalovacím motorem je názorná z obrázku 17. [41]



Obrázek 17 Porovnání konstrukce jednotlivých motorů [54]

3.5.2 Nevýhody

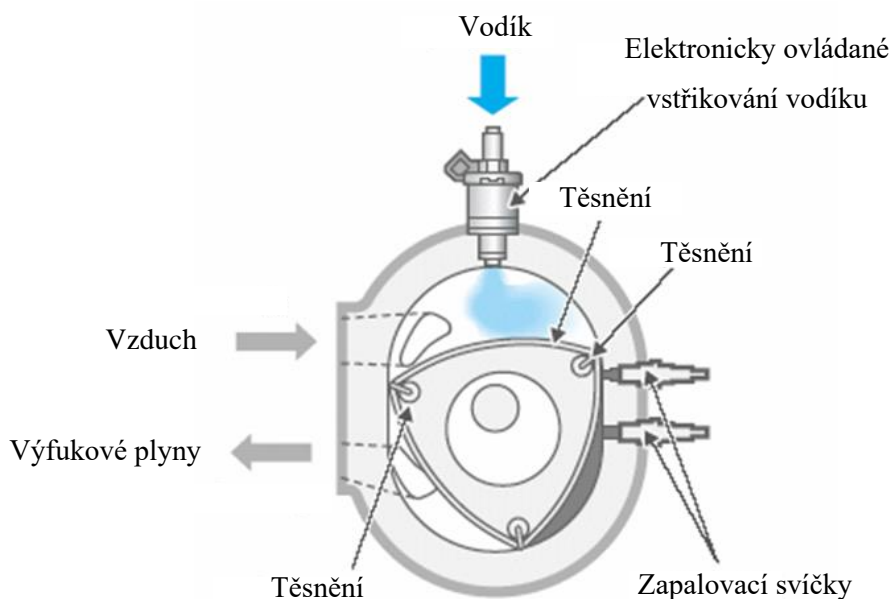
Navzdory všem zmíněným pozitivům s sebou motor přináší také mnohá negativa. V průběhu celého vývoje napříč desetiletími ho provázely především problémy s utěsněním jednotlivých prostorů komory, které je vyřešeno radiálními a axiálními těsnícími lištami. Kvůli jejich velkému mechanickému i tepelnému namáhání ale mají malou životnost, což postupně vede k potřebě generální opravy motoru. Velké kluzné rychlosti radiálních těsnících lišt také omezují nejvyšší otáčky agregátu. Díky nevhodnému tvaru spalovacího prostoru nedosahuje Wankelův motor tak vysoké tepelné účinnosti jako klasický motor a dochází k velkému přestupu tepla do skříně motoru a nerovnoměrnému tepelnému namáhání a motor je tak nutné lépe chladit. [3; 4]

V důsledku malé tepelné účinnosti spolu s malou dosažitelnou hodnotou kompresního poměru, který je opět dán tvarem spalovací komory, má agregát velmi vysokou měrnou spotřebu paliva, navíc kvůli potřebě mazání těsnících lišt také vysokou spotřebu oleje. Poslední zmíněnou nevýhodou, která také vedla k ukončení jeho produkce, jsou vyšší emise výfukových plynů, které se sice u motoru Renesis podařilo částečně vyřešit, ale tento problém zde stále zůstává. [42]

3.6 Budoucnost Wankelova motoru

Sériová výroba vozů poháněných Wankelovým rotačním motorem byla ukončena v roce 2012 posledním modelem Mazdy RX-8, a jak se prozatím zdá, navzdory veškeré snaze se tento fakt ještě dlouho nezmění. Ačkoliv se u motoru Renesis podařilo vyřešit nebo alespoň vylepšit většinu nedostatků, přetrvávající problém vysokých emisí při spalování fosilních paliv zde stále zůstává. Řešení lze ale nalézt v použití alternativních paliv, převážně ve spalování vodíku nebo v užití Wankelova motoru jako záložního zdroje v elektromobilech.

Ke spalování vodíku je motor vhodný hlavně díky své konstrukci, protože 3 jednotlivé oddělené části komory umožňují prakticky bezrizikové vstříknutí vodíku. S tímto řešením přišla také již v roce 2003 Mazda, která představila vůz Mazda RX-8 Hydrogen RE, viz obrázek 18. V něm umístěný Wankelův motor byl zkonstruován ke spalování buď vodíku nebo benzínu. [23]



Obrázek 18 Schéma motoru v Mazdě RX-8 Hydrogen RE [55]

S myšlenkou využití Wankelova motoru jako záložního zdroje pracovalo už více automobilek, mezi nimi například společnost Audi, která v roce 2010 představila koncept vozu Audi A1 e-tron, od původního plánu ale postupně ustoupila a model byl tak k prodeji nabídnut bez rotační pohonné jednotky. Hlavní výhodou tvořily malé rozměry motoru a jeho nízká hmotnost. Celá jednotka (spalovací motor a 15kW generátor) vážila přibližně 70 kg. [56]

Mazda, která do vývoje investovala nejvíce úsilí, se svého motoru stále nevzdává. Už roky se pravidelně objevují spekulace o návratu Wankelova motoru do nových vozů. Častokrát také byly představeny prototypy těchto vozů, například v roce 2015 to byl prototyp sportovního kupé Mazda RX-Vision (obrázek 19) s nově patentovaným motorem SkyActiv-R, později se objevily informace o využití rotačního agregátu jako prodlužovače dojezdu elektromobilů u nového modelu Mazda RX-9 nebo Mazda MX-30. Lze tak předpokládat, že dlouho očekávaný návrat této technologie opravdu přijde. [57; 58]



Obrázek 19 Koncept vozu Mazda RX-Vision [59]

4 Závěr

Ke zvolenému tématu bakalářské práce lze v závěru říct, že výše stanovených cílů bylo dosaženo. Ačkoliv cílem nebylo vysvětlit konstrukci a princip fungování samotného motoru, v úvodu byly stručně vysvětleny alespoň základní parametry, neboť práce si za cíl kladla seznámení čtenáře s tímto motorem, který je široké veřejnosti znám svým názvem, ale princip jeho fungování, mnohá využití nejen v automobilovém průmyslu a všechny výhody spojené s jeho jednoduchou, ale neobyčejnou konstrukcí, jsou již často opomíjeny. Také proto je první část práce věnována právě této problematice.

Wankelův motor se neodmyslitelně zapsal do historie automobilového průmyslu, a to především díky mnoha výhodám, které jeho výjimečná konstrukce představuje. Nicméně nelze opomenout jeho využití také k pohonu jiných strojů, v průběhu let lze zmínit například motocykly, lodě, generátory elektrické energie či sekačky a motorové pily. Přestože od svého zrodu prošel mnoha vylepšeními a od původní verze navržené Felixem Wankelem se výrazně zdokonalil, jeho nedostatky prozatím převyšují nad kladnými vlastnostmi.

Jak bylo zmíněno v poslední části, motor s sebou v oblasti nových technologií automobilového průmyslu přináší mnohá pozitiva, poukázat lze především na jeho vhodnost pro spalování alternativních paliv (vodíku) či použití jako záložního zdroje u vozů s primárně elektrickým pohonem. Ačkoliv tedy nelze očekávat návrat dávné slávy Wankelova motoru, jeho potenciál ještě nebyl zcela využitý a výrobci automobilů na něj stále nezanevřeli.

5 Seznam použitých zdrojů

- [1] HANDL, Jan. PRŮMYSLOVÁ REVOLUCE STRUČNĚ A PŘEHLEDNĚ. In: *HistorieBlog.cz* [online]. [cit. 2021-05-02]. Dostupné z: <https://www.historieblog.cz/2018/09/prumyslova-revoluce-strucne-a-prehledne/>
- [2] ULRYCHOVÁ, B. Vynálezce spalovacího motoru. In: *Portalridice.cz* [online]. [cit. 2021-05-02]. Dostupné z: <https://www.portalridice.cz/clanek/vynalezce-spalovaciho-motoru>
- [3] KOVAŘÍK, Ladislav. *Motory Wankelovy a jim příbuzné: určeno [také] studentům odborných i vysokých škol*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1970. Řada strojírenské literatury. ISBN 04-227-70.
- [4] HROMÁDKO, Jan. *Speciální spalovací motory a alternativní pohony: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol*. 1. vyd. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4455-1.
- [5] *Rotary Internal-Combustion Engines* [online]. In: . [cit. 2021-02-14]. Dostupné z: <http://www.douglas-self.com/MUSEUM/POWER/unusualICeng/rotaryIC/rotaryIC.htm#webb>
- [6] KAMEŠ, Josef. *Speciální motorová vozidla: Část: Spalovací motory*. První. Česká zemědělská univerzita v Praze, Technická fakulta, 2002. ISBN 80-213-0895-8.
- [7] WANKEL, Felix. *Rotary piston machines*. 1961. US2988008A. Uděleno 4.2.1957. Zapsáno 13.6.1961.
- [8] LUDVIGSEN, Karl. *Wankel Engines A to Z*. 1st edition. New York: Ludvigsen Publications, 1973. ISBN 0913646016.
- [9] Felix Wankel. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-02-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Felix_Wankel
- [10] *Felix Wankel: German Inventor* [online]. In: . [cit. 2021-02-14]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/biography/Felix-Wankel>
- [11] *NSU Ro 80 (1967–77): Wankel v praxi* [online]. In: . [cit. 2021-02-14]. Dostupné z: <https://veteran.auto.cz/clanek/685/nsu-ro-80-1967-77-wankel-v-praxi>

- [12] NSU Wankel rotary engines and cars. *Craig's Rotary Page* [online]. [cit. 2021-02-14]. Dostupné z: http://cp_www.tripod.com/rotary/pg05.htm
- [13] *NSU/Wankel Engine Geneology 1935 thru current* [online]. In: . [cit. 2021-02-14]. Dostupné z: <http://www.worleys.com/rx-7/mazda-geneology.html>
- [14] NIEDERMEYER, Paul. Automotive History Capsule: NSU Ro80–The Tragic Automotive Goddess. In: *Curbside Classic* [online]. [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: <https://www.curbsideclassic.com/automotive-histories/ccoty-1968-nomination-nsu-ro80-the-tragic-automotive-goddess/>
- [15] *Comobil a Comotor* [online]. In: . [cit. 2021-02-14]. Dostupné z: <http://citroengs.netstranky.cz/birotor/comobil-a-comotor.html>
- [16] *Citroën M35 (1969-1971): Pokus o kupé Ami s rotačním motorem skončil fiaskem* [online]. In: . [cit. 2021-02-14]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/citroen-m35-1969-1971-pokus-o-kupe-ami-s-rotacnim-motorem-skoncil-fiaskem-103348>
- [17] Citroën M35. In: *Citroën Origins* [online]. [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: <https://www.citroenorigins.cz/cs/vehicule/m35>
- [18] VOLŠICKÝ, Lukáš. *Citroën GS BiRotor: Smůla na kolech již od počátku* [online]. In: . [cit. 2021-02-14]. Dostupné z: <https://templeofspeed.cz/citroen-gs-birotor-smula-kolech-jiz-od-pocatku/>
- [19] NEDELEA, Andrei. Rotary-Powered Unicorn: 1973 Citroen GS Birotor. In: *DriveMag* [online]. [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: <https://drivemag.com/news/rotary-powered-unicorn-1973-citroen-gs-birotor>
- [20] HEGE, John B. *The Wankel Rotary Engine: a history* [online]. 2006 [cit. 2021-04-10]. ISBN 978-0-7864-8658-8.
- [21] JONES, Charles. *ADVANCED ROTARY ENGINE STUDIES* [online]. In: . [cit. 2021-02-17]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19800013852/downloads/19800013852.pdf>
- [22] JONES, Charles. The Curtiss-Wright Rotating Combustion Engines Today. In: *SAE Transactions: vol. 73*. 1965, s. 127-147. Dostupné také z: <https://www.jstor.org/stable/44553803>
- [23] MAZDA MOTOR CORPORATION. *Rotary Engine: Press Information*. 2017. Dostupné také z: http://en.media.mazda.ca/download/Mazda_Rotary+Press_Information+2017.pdf

- [24] From Ball Bearing to Global Brand: High Performance and Reliability for 120 Years. In: *Sachs* [online]. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://aftermarket.zf.com/go/en/sachs/about-us/the-brand/from-ball-bearing-to-global-brand/>
- [25] Hercules W2000 (1974). In: *The-blueprints.com* [online]. [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: https://www.the-blueprints.com/blueprints/motorcycles/various-motorcycles/12607/viewsingle/hercules_w2000_1974/
- [26] Our History. In: *Rolls-Royce* [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.rolls-royce.com/about/our-history.aspx>
- [27] BEDNÁŘ, Marek. Revoluční diesellový Wankel dával 350 koní z 2,5 litru, skončil neslavně. In: *Autoforum.cz* [online]. [cit. 2021-04-06]. Dostupné z: <https://www.autoforum.cz/fascinace/revolucni-dieselovy-wankel-daval-350-koni-z-2-5-litru-skoncil-neslavne/>
- [28] PÁLENÍK, Jan. Pojízdna laboratoř Mercedesu slaví. Do Brna přijela s rekordním dieselem. In: *Idnes.cz* [online]. 2019 [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: https://www.idnes.cz/auto/historie/mercedes-c111-wankel-diesel-rekord-nardo-strojirensky-veletrh-brno.A190807_090741_auto_ojetiny_fdv
- [29] Mercedes-Benz C 111: Dream in weissherbst. In: *Mercedes-Benz* [online]. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.mercedes-benz.com/en/classic/history/50-years-of-mercedes-benz-c-111/>
- [30] ŽÁK, Dalibor. Mercedes-Benz C111 a C112 (1969 - 1991): Revoluční laboratoře. In: *Autorevue.cz* [online]. [cit. 2021-04-10]. Dostupné z: <https://www.autorevue.cz/mercedes-benz-c111-a-c112-1969---1991-revolucni-laboratore/ch-59508#articleStart>
- [31] Mazda – the history of a global brand from Japan. In: *Mazda Classic - Automobile Museum Frey* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://mazda-classic-frey.de/en/the-museum/mazda-history/>
- [32] A Story Behind the Name of “Mazda”. In: *Mazda* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.mazda.com/en/innovation/mazda-stories/mazda/behind/>
- [33] MATOUŠEK, Jan. Před sto lety vyráběla korek. Mazdu ale proslavily unikátní motory a dostupný sportřák. In: *Aktuálně.cz* [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/ekonomika/auto/mazda-historie/r~894ab28041b711ea9ec9ac1f6b220ee8/>

- [34] Wankel Rotary Engine's Apex Seal/Trochoid Wear Chatter 'the Devil's Nail Marks Persist'. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2019, 9(4). ISSN 2250-3153. Dostupné z: doi:10.29322/IJSRP.9.04.2019.p8802
- [35] Mazda 100th Anniversary. In: *Autos.goo.ne.jp* [online]. [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: <https://autos.goo.ne.jp/column/992195/>
- [36] DUSIL, Tomáš. Kenichi Yamamoto: Odešel jeden ze dvou otců Wankelova rotačního motoru. In: *Auto.cz* [online]. [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/kenichi-yamamoto-odesel-jeden-ze-dvou-otcu-wankelova-rotacniho-motoru-112076>
- [37] DRAGON, Aleš. Mazda 110S/Cosmo Sport (1967-1972): GT z vesmíru. In: *Auto.cz* [online]. [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/mazda-110s-cosmo-sport-1967-1972-gt-z-vesmiru-106396>
- [38] 1967 - 1972 Mazda Cosmo Sport. In: *TopSpeed* [online]. [cit. 2021-04-23]. Dostupné z: <https://www.topspeed.com/cars/mazda/1967-1972-mazda-cosmo-sport-ar36795.html>
- [39] CLEMENTS, Alastair. Quiet revolutionary: Mazda R130 Luce. In: *Classic&Sports Car* [online]. [cit. 2021-04-25]. Dostupné z: <https://www.classicandsportscar.com/features/quiet-revolutionary-mazda-r130-luce>
- [40] A 75-Year History through Text: Responding to Emissions Controls. In: *Toyota* [online]. [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: https://www.toyota-global.com/company/history_of_toyota/75years/text/entering_the_automotive_business/chapter2/section3/item1.html
- [41] YAMAMOTO, Kenichi. *Rotary Engine*. Society of Automotive Engineers, 1981. ISBN 9789997341174.
- [42] COLE, David E. The Wankel Engine. In: *Scientific American*. 227. 1972, s. 14-23.
- [43] HAAS, Karel. Mazda a Wankel - osudové spojení. In: *Auto.cz* [online]. [cit. 2021-04-25]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/mazda-a-wankel-osudove-spojeni-1724>
- [44] BRANCH, Jon. A BRIEF HISTORY OF THE MAZDA RX-3 – EVERYTHING YOU NEED TO KNOW. In: *Silodrome.com* [online]. [cit. 2021-04-28]. Dostupné z: <https://silodrome.com/history-mazda-rx-3/>

- [45] ŽÁK, Dalibor. Retro: Mazda RX-7 je mezi sportovními auty unikát už 40 let. In: *Autobible.euro.cz* [online]. [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: <https://autobible.euro.cz/retro-mazda-rx-7-sportovnimi-auty-unikat-uz-40-let/>
- [46] VAHALA, František. Mazda Eunos Cosmo - nedoceněná raketa. In: *Automobil Revue* [online]. [cit. 2021-04-29]. Dostupné z: https://www.automobilrevue.cz/rubriky/clanky/historie/mazda-eunos-cosmo-nedocenena-raketa_47451.html
- [47] Mazda 13B Rotary 1.3L Engine Review. In: *Motor Reviewer* [online]. [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: https://www.motorreviewer.com/engine.php?engine_id=101
- [48] LÁNÍK, Ondřej. Mazda Renesis: Motor roku 2003 (detailní pohled). In: *Auto.cz* [online]. [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/mazda-renesis-motor-roku-2003-detailni-pohled-16979>
- [49] SMALE, Glen. World's longest motor race. In: *Porsche Road&Race* [online]. [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://www.porscheroadandrace.com/worlds-longest-motor-race/>
- [50] 50 YEARS OF ROTARY REVOLUTION. In: *Mazda* [online]. [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: https://www.mazda.com/en/innovation/mazda-stories/mazda/rotary_revolution/
- [51] Mazda 13G (3 rotor engine). In: *Craig's Rotary Page* [online]. [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: http://cp_www.tripod.com/rotary/pg19.htm
- [52] *Mazda R26B* [online]. In: . [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <http://www.mulsannescorner.com/mazdar26b.html>
- [53] CHLUD, Radek. Mazda 787B: Rotační demagog. In: *Autíčkář.cz* [online]. [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://www.autickar.cz/clanek/mazda-787b-rotacni-demagog/>
- [54] JEŘÁBEK, Petr. Slavné motory: Vynález Felixe Wankela aneb Svět rotujících trojúhelníků. In: *Garáž.cz* [online]. [cit. 2021-04-30]. Dostupné z: <https://www.garaz.cz/clanek/vynalez-felixe-wankela-aneb-svet-rotujicich-trojuhelniku-21002136>
- [55] Mazda to Lease Rotary H2ICE, Add Mild Hybrid Support. In: *Green Car Congress* [online]. [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: https://www.greencarcongress.com/2004/10/mazda_to_lease_.html

- [56] LÁNÍK, Ondřej. *Audi A1 e-tron: Wankel v roli záložního zdroje* [online]. In: . [cit. 2021-05-02]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/audi-a1-e-tron-wankel-v-rol-i-zalozniho-zdroje-2424>
- [57] HANKE, Petr. *Mazda MX-30 – e-Skyactiv*. In: *Automobil Revue* [online]. [cit. 2021-05-02]. Dostupné z: https://www.automobilrevue.cz/rubriky/clanky/technika/mazda-mx-30-e-skyactiv_47701.html
- [58] PAVLŮSEK, Ondřej. *Mazda RX-Vision s novým rotačním motorem SkyActiv-R odhalena*. In: *Auto.cz* [online]. [cit. 2021-05-02]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/mazda-rx-vision-s-novym-rotacnim-motorem-skyactiv-r-odhalena-90001>
- [59] BEDNÁŘ, Marek. *Mazda RX-Vision: Wankel je zpět, v nové RX si říká SkyActiv-R*. In: *Autoforum.cz* [online]. [cit. 2021-05-07]. Dostupné z: <https://www.autoforum.cz/predstaveni/mazda-rx-vision-wankel-je-zpet-v-nove-rx-si-rika-skyactiv-r/>

6 Přílohy

Model Rok	110s (Cosmo Sport)	R100 (Familia)	R130 Coupe / RX- 4 (Luce)	RX-2 (Capella)	RX-3 (Savanna)	Rotary Pickup	Parkway	Roadpacer	RX-5 (Cosmo)	RX-7	Ennos Cosmo	RX-8	Součet
1967	343												343
1968	172	6 925											7 097
1969	159	28 041	542										28 742
1970	258	31 238	431	34 242									66 169
1971	126	21 722	3	63 389	33 189								118 429
1972	118	5 720	10 903	57 748	80 404								154 893
1973		2 060	77 028	54 962	105 819	2							239 871
1974			66 998	7 656	29 678	14 364	18						118 714
1975			41 668	5 960	26 236	113	18	491	12 014				86 500
1976			13 284	553	9 825	632	8	183	43 792				68 277
1977			13 480	253	1 606	1 161		126	25 273				41 899
1978			6 484	240					1 561	72 692			80 977
1979			5 705						5 896	71 617			83 218
1980			4 213						1 108	56 317			61 638
1981			2 292						2 785	55 321			60 398
1982			2 046						4 170	59 686			65 902
1983			1 402						3 026	57 864			62 292
1984			1 349						3 477	63 959			68 785
1985			506						1 062	63 105			64 673
1986			2 533						265	72 760			75 558
1987			639						54	52 204			52 897
1988			1 048						22	34 592			35 662
1989			395						8	37 624			38 027
1990			318							29 411	4 325		34 054
1991										16 623	1 700		18 323
1992										26 899	1 373		28 272
1993										6 801	711		7 512
1994										5 962	435		6 397
1995										5 202	331		5 533
1996										4 762			4 762
1997										3 556			3 556
1998										1 423			1 423
1999										4 151			4 151
2000										2 611			2 611
2001										2 589			2 589
2002										3 903			3 903
2003												60 100	60 100
2004												50 813	50 813
2005												27 837	27 837
2006												23 363	23 363
2007												13 833	13 833
2008												8 237	8 237
2009												2 970	2 970
2010												2 801	2 801
2011												1 233	1 233
2012												2 131	2 131
Součet	1 176	95 706	253 267	225 003	286 757	16 272	44	800	104 513	811 634	8 875	193 318	1 997 365

Příloha 1 Tabulka produkováných modelů společnosti Toyo Kogyo (Mazda) v průběhu let [23]