

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

12120 - Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Rotační motor

Rotary engine

Bakalářská práce

Studijní program: TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Vedoucí práce: Ing. Branko Remek, CSc.

Jan Procházka

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

V Praze dne 7. 1. 2016

.....

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Brankovi Remkovi, CSc. za cenné rady, připomínky, inspiraci, ochotu a trpělivost.

Název práce: Rotační motor

Autor: Jan Procházka

Ústav: 12120 - Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Branko Remek, CSc.

Anotace: Tato práce se zabývá rozdělením rotačních motorů s následným zaostřením na motor patent Wankel. Popsány jsou významné modely automobilů s Wankelovým motorem, které ovlivnily průběh historie. Cílem je podrobně rozebrat výhody a nevýhody Wankelova motoru společně s jejich technologickým řešením. V závěrečné části práce je zahrnuta možnost provozu Wankelova motoru s alternativními palivy (vodíkem).

Klíčová slova: Rotační motor, Wankelův motor, výhody a nevýhody, vodíkový pohon, rotor, píst, automobil s Wankelovým motorem

Title: Rotary engine

Author: Jan Procházka

Department: 12120 - Department of Automotive, Combustion Engine and Railway Engineering

Supervisor: Ing. Branko Remek, CSc.

Annotation: This thesis looks into sorting different types of rotary engines with further focus on Wankel engine. Various vehicles models equipped with the Wankel engine are described, that had major impact on its historical development. The aim of this work is also to compare pros and cons of the Wankel along with their technological solutions. At the end of my thesis the possibility of alternative fuels is discussed, mainly dealing with hydrogen powered Wankel.

Keywords: Rotary engine, wankels engine, pros and cons, hydrogen drive, rotor, piston, vehicle with Wankel engine

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Spalovací motory na rotačním principu – přehled a rozdělení	3
2.1	Turbína (Spalovací turbína)	3
2.2	Motory s rotačními písty (rotory).....	6
2.2.1	DKM (Drehkolbenmotor = Motor s rotačním pístem)	7
2.2.2	KKM (Kreiskolbenmotor = Motor s krouživým pístem)	7
3	Rotační motory v sériové výrobě osobních automobilů v 2. polovině 20. století – přehled.....	10
3.1	NSU Spider.....	10
3.2	NSU Ro80.....	12
3.3	Citroën GS Birotor	13
3.4	Mazda Cosmo Sport (110S)	14
4	Výhody a nevýhody motoru patent Wankel z hlediska ekonomiky a technologie výroby	17
4.1	Ekonomické a technologické hledisko.....	17
4.2	Výhody.....	18
4.3	Nevýhody	20
5	Posouzení ekonomiky a ekologie provozu a možnosti použití alternativních paliv	22
5.1	Wankelův motor z hlediska ekologického i ekonomického	22
5.1.1	Vývoj a snaha o zlepšení spotřeby i exhalací	22
5.1.2	Shrnutí	24
5.2	Budoucí koncept Wankelova motoru.....	24
5.3	Možnosti použití alternativních paliv	25
5.3.1	Vodík jako palivo pro přímý pohon vozu	26
5.3.2	Vodík s Wankelovým motorem sloužícím jako prodlužovač dojezdu elektromobilů	27
5.3.3	Vodík z hlediska ekologie i ekonomie	28
6	Závěr.....	29
7	Seznam literatury a použitých zdrojů.....	30
7.1	Literatura	30
7.2	Archivy.....	30
7.3	Internetové zdroje.....	30
8	Seznamy	33
8.1	Seznam obrázků	33

1 Úvod

Rotační motory byly odjakživa zajímavou záležitostí především z hlediska samotného principu pohybu, jenž jim umožňoval mnohem hladší chod i vyšší otáčky. Postupným vývojem si jednotlivá odvětví hledala své místo i uplatnění, ve kterém vynikla, čímž se v případě turbíny staly aplikace, kde nejsou nutné náhlé změny otáček a je naopak potřeba vysoký výkon. Největším zástupcem je dnes asi letecký průmysl, ale pokusy implantovat turbínu kamkoli jinam zde byly také.

Motor s rotačními písty (Wankelův motor) už zažil též všelijaké aplikace, ale v dnešní době se používá především v automobilismu, kde je však bohužel raritou. To mu ovšem nijak neubírá na impozantnosti, která k němu od jeho počátku patří.

Vynálezcem tohoto druhu motoru byl německý konstruktér Felix Wankel, jenž se při tvorbě nechal inspirovat čerpadly s podobným principem. Ve dvacátých letech minulého století, tak ve své dílně sestavil první prototypy, které však čekaly ještě cca 25 let, než došly ke skutečnému vývoji a použití u společnosti NSU, se kterou Felix Wankel později spolupracoval. Jeho prvotní koncept DKM (Drehkolbenmotor = Motor s rotačním pístem) byl sice zkonstruován a jako prototyp fungoval, ale zástavby do automobilu se nedočkal. U tohoto typu byl pohyblivý jak rotor, tak blok, ale pro příliš složitou konstrukci a řadu dalších problémů byl zavrhnut. Nahrazen byl brzy jednodušším konceptem KKM (Kreiskolbenmotor = Motor s krouživým pístem), jenž měl rotující už pouze píst a v této podobě už v podstatě setrval dodnes.

Na konci padesátých let tak ve spolupráci s NSU došlo k prvním testům Wankelova motoru v automobilu, k čemuž byl použit malý automobil NSU Prinz III, jenž poháněl jednorotorový Wankel. To ale byl pouze prototyp a skutečně sériového nasazení se Wankelův motor dočkal až ve voze NSU Spider v roce 1964, který byl však spíše odrazovým můstkem pro následující přelomové NSU Ro80, jež dostalo i ocenění Auto roku 1968.

V této době propukl boom, kdy o licenci na výrobu Wankelova motoru projevila zájem spousta společností po celém světě a skoro každá z nich pak nějaký svůj koncept uvedla. Bohužel po brzkém zjištění o problémech s životností a spotřebě agregátu daly téměř všechny od tohoto projektu ruce pryč a věnovaly se dále vývoji a výrobě standardních pístových motorů. Jedním z hlavních přeživších se tak stala japonská

Mazda, která se věnuje vývoji Wankelova motoru i dnes a úspěšně jej používá (především) ve svých sportovních vozech.

Wankelův motor má (jak již použití napovídá) vlastnosti předurčující jej do zástavby sportovních vozů. Vysoký výkon a malé rozměry jsou, kromě exkluzivní rarity tohoto motoru, velkým lákadlem. Naneštěstí má tento stroj také velkou spoustu nedostatků, jež jsou důvodem jeho minimálního využití. Společně pak s horšími emisemi a spotřebou paliva i oleje zůstává automobilkami opomíjen a je odkázán pouze na vývoj Mazdy, která nad ním dosud nezlomila hůl.

V posledních letech jsou pak zde i pokusy o využití Wankelova motoru společně s alternativními palivy, přičemž v našem případě je to především vodík, pro který je tento druh motoru velmi vhodný právě z hlediska principu své činnosti.

Všemi výše uvedenými fakty se podrobněji zabývám v této bakalářské práci, společně s uvedením významných zástupců modelů automobilů, jež ovlivnily vývoj tohoto stroje a začlenily jej do povědomí lidí po celém světě. Cílem této práce je pak především zhodnocení výhod a nevýhod tohoto motoru, stejně jako uvedení možností jeho použití s alternativními palivy (v případě Wankelova motoru s vodíkem).

2 Spalovací motory na rotačním principu – přehled a rozdělení

Toto specifické odvětví spalovacích motorů, v podobě, v jaké jej známe dnes, je možno rozdělit do 2 skupin:

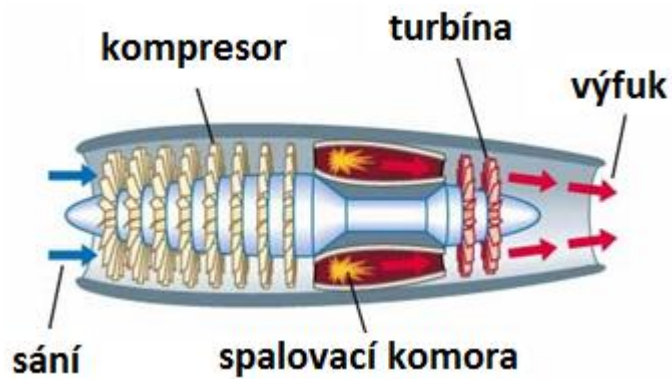
- 1. Turbíny**
- 2. Motory s rotačními písty (rotory)**

Obě skupiny pracují na zcela odlišných principech, a tudíž jsou samozřejmě vhodné pro rozdílné použití, takže je v dnešní době můžeme najít především v odvětvích, kam se postupně dlouhým experimentálním vývojem dostaly a velké přesuny z jedné oblasti do druhé, tak už nejspíš nelze očekávat.

2.1 Turbína (Spalovací turbína)

Spalovací turbína a její princip je znám už velmi dlouho. Prvně byl patentován v roce 1791 Angličanem Johnem Barberem. Jeho vynález měl nejvíce společného s moderními spalovacími turbínami, avšak první reálné a prakticky využitelné turbíny začaly vznikat až začátkem 20. století. Zprvu se bojovalo se zoufalou účinností tohoto tepelného stroje, která se pohybovala okolo 3%, ale postupem času se situace zlepšovala a turbíny si tedy našly své uplatnění.

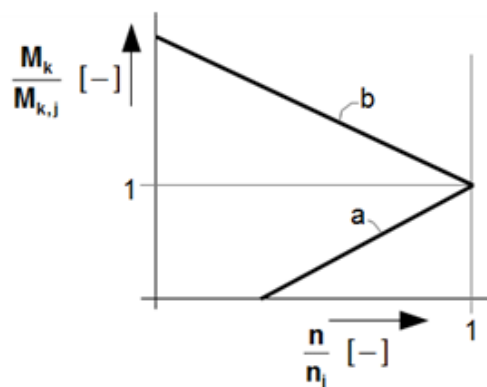
Princip funkce turbíny začíná u kompresoru, do kterého se dostává vzduch, jenž je následně stlačen. Při této kompresi se ohřívá a je dále přiváděn do spalovací komory, kde se mísí s palivem a nastává samotné hoření. Po vznícení se spaliny dostávají na lopatky turbíny, které roztáčí. Část energie je také využita k pohonu kompresoru.



Obrázek 1 - Řez spalovací turbínou [35]

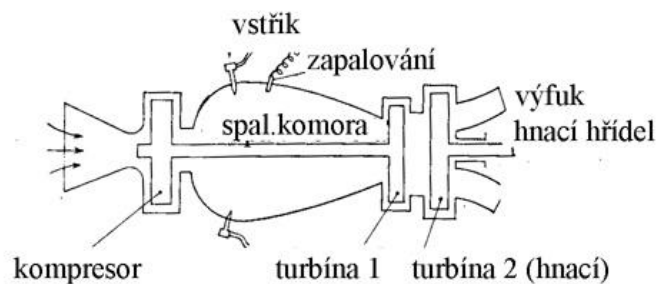
Pokud se omezím především na oblast přepravy, stala se turbína pohonem mnoha dopravních prostředků. Své místo našla především v leteckém průmyslu, kde její vlastnosti vyniknou. S nízkou hmotností a vysokou účinností je velmi dobrým pohonným agregátem, zatímco malý točivý moment a neochota k rychlým změnám otáček, zde nejsou rozhodující parametry.

Stejná situace bohužel v automobilismu neplatí. Přesto se s turbínami v automobilech experimentovalo. Jako pohon nejsou vhodné právě kvůli již zmiňovanému malému točivému momentu, a tedy špatnému rozběhu proti zatížení. To se sice podařilo částečně vyřešit použitím dvouhřídelové turbíny (viz graf níže), avšak jiné nevýhody přetrvávaly. [26] [32] [33]



Obrázek 2 - Průběh točivého momentu spalovací turbíny [26]

a – jednohřídelová spalovací turbína; b – dvouhřídelová spalovací turbína



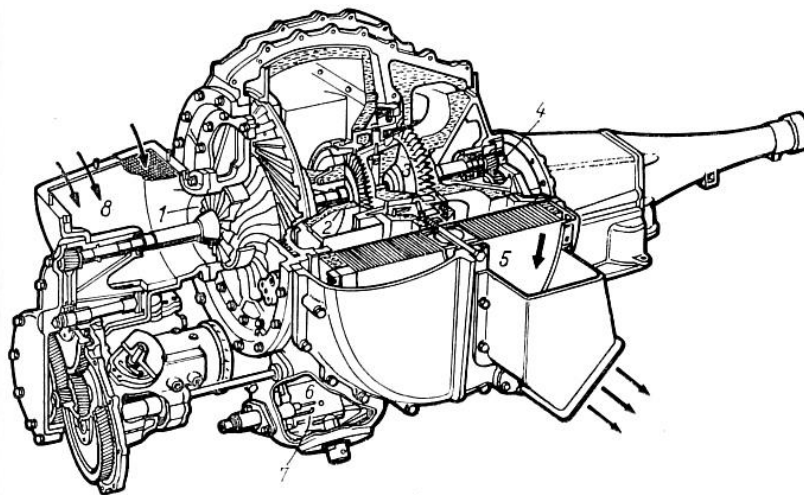
Obrázek 3 - schéma dvouhřídelové spalovací turbíny [4]

Jednou ze společností, které se zabývaly použitím turbíny v automobilu, byla firma Chrysler. V padesátých letech minulého století začala s projektem použití turbíny v automobilu a vzniklo jak několik prototypů, tak i malé množství sériově vyráběných vozů. Jedním z představitelů byl Chrysler Turbine Car.



Obrázek 4 - Chrysler Turbine Car [34]

Turbína použitá v tomto vozidle dosahovala výkonu 92 kW a 576 Nm. Tento projekt byl však zahuben novými emisními normami, které v roce 1979 vstoupily v platnost. Pod těmito nově nastavenými limity se turbíny bohužel nemohly udržet. [34]

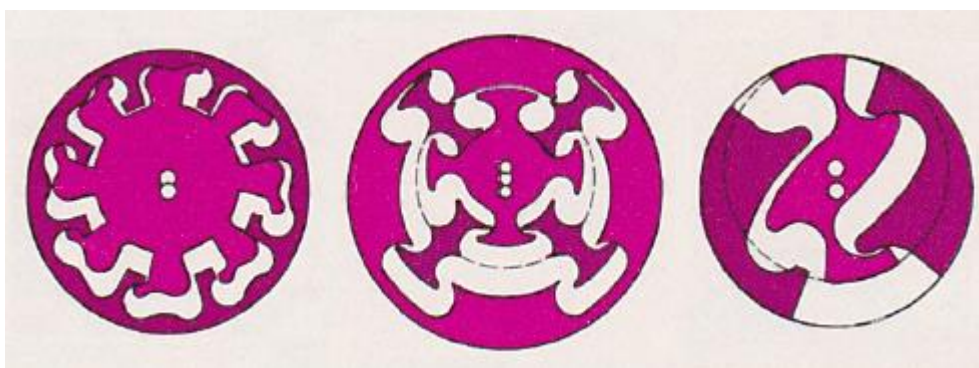


Spalovací turbína Chrysler CR2A;
 1 – oběžné kolo kompresoru; 2 – první turbínové kolo, pohánějící kompresor a příslušenství; 3 – druhé turbínové kolo hnací; 4 – jednostupňový převod ozubenými koly; 5 – výměník tepla (regenerátor); 6, 7 – spalovací komora; 8 – vstup

Obrázek 5 - Spalovací turbína Chrysler CR2A [4]

2.2 Motory s rotačními písty (rotory)

Motory s rotačními písty (používané v automobilech dnes) má na svědomí německý konstruktér Felix Wankel. Konceptů motorů na rotačním principu je však mnoho a přesto, že kinematicky je spousta z nich funkčních, z praktického hlediska se neujaly, jelikož z mnoha různých důvodů nebyly vhodné. Pro ilustraci je zde několik možných příkladů, které by sice mohly fungovat, ale v praxi jsou nepoužitelné.

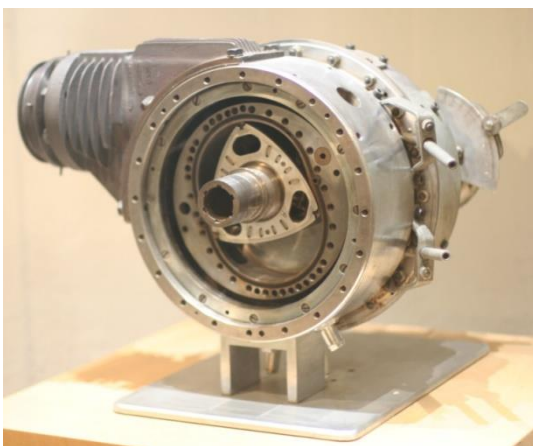


Obrázek 6 - Možné koncepce spalovacích motorů [2]

Jako životaschopné koncepty se ukázaly býti mezi všemi pouze dva, z nichž se používá jen jeden. Jsou jimi DKM a KKM.

2.2.1 DKM (Drehkolbenmotor = Motor s rotačním pístem)

První pokusy o výrobu motoru s rotačními písty připadají přibližně na 50. léta minulého století. V roce 1951 Felix Wankel, na základě vývoje speciálních dmychadel, objevil princip rotačního motoru a tím začala éra "Wankelova motoru". K vývoji samotného motoru se dostal až o pár let později a prvním pokusem byl v roce 1957 typ nazvaný DKM 54 (Drehkolbenmotor), který však není typem rotačního motoru používaným v automobilismu dnes. Tento motor měl rotující jak píst, tak blok, z nichž každá část měla svou vlastní osu rotace. Konstrukce zaručovala, že zde nedocházelo k rychlému opotřebení vrcholů rotačního pístu a motor tedy netrpěl ztrátou komprese. Nespornou výhodou byl také fakt, že motor mohl dosahovat velmi vysokých otáček (až 17000 1/min), avšak tento typ byl pro příliš složitou konstrukci zavrhnut. Dalšími nešvary zde pak byly problémy s mazáním, odvodem tepla a také servisem. Příkladem: pro běžný pístový motor banální výměna zapalovací svíčky, vyžadovala u DKM téměř kompletní rozložení motoru. [11]



Obrázek 7 - Drehkolbenmotor DKM 54 [36]

2.2.2 KKM (Kreiskolbenmotor = Motor s krouživým pístem)

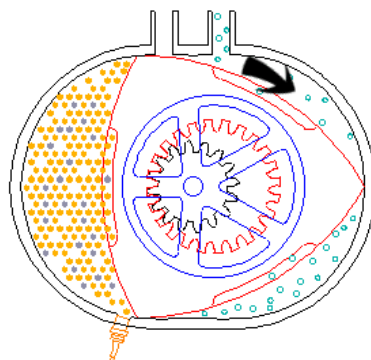
S druhou verzí rotačního motoru přišel Felix Wankel přibližně rok poté. Zde mu byl nápomocen inženýr firmy NSU Hanns-Dieter Paschke. Tato verze byla označena jako KKM (Kreiskolbenmotor), vycházela z předchozího modelu a byla patřičně zjednodušená, jelikož oproti DKM už rotoval pouze píst, jenž byl osazen na

excentrickém hřídeli. Koncept KKM setrval až do dnešní doby a s lehkými modifikacemi je v několika automobilech používán.

Wankelův motor (jak je dnes obecně typ KKM nazýván) pracuje s zážehovým (Ottovým) cyklem a je tedy motorem čtyřdobým. Spalovací skříň má tvar epitrochoidy a rotující píst tvar konvexního trojúhelníku. Tím je zajištěno, že když píst rotuje ve spalovací skříni, vytváří postupně jednotlivé komory, které jsou od sebe vzájemně odděleny a zároveň jsou schopny plynule měnit svůj objem v závislosti na poloze pístu (obrázkové schéma lépe vysvětluje jednotlivé cykly). [11] [15] [16]

1. fáze – Sání

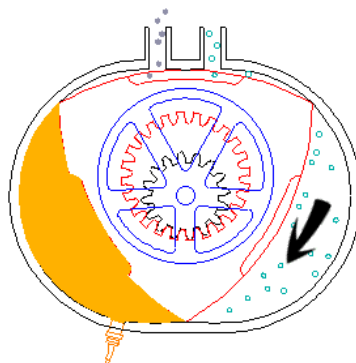
V této fázi je směs vzduchu a paliva nasávána do první komory vytvořené rotujícím pístem.



Obrázek 8 - 1. Pracovní fáze Wankelova motoru (KKM) [6]

2. fáze – Kompresi

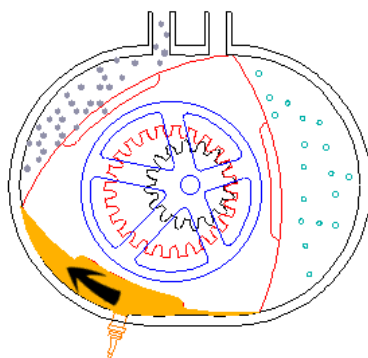
V druhé fázi je směs stlačována a posouvána dále.



Obrázek 9 - 2. Pracovní fáze Wankelova motoru (KKM) [6]

3. fáze – zážeh a expanze

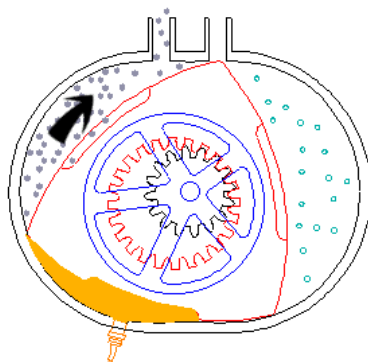
Ve třetí fázi je zapalovací svíčkou směs zažehnuta a hořící plyny zvětšují svůj objem a tlak na rotující píst. Tímto je píst uváděn dále do pohybu.



Obrázek 10 - 3. Pracovní fáze Wankelova motoru (KKM) [6]

4. fáze – výfuk

Ve čtvrté (poslední) fázi jsou splodiny vytlačovány ven do výfukového kanálu a cyklus se opakuje.



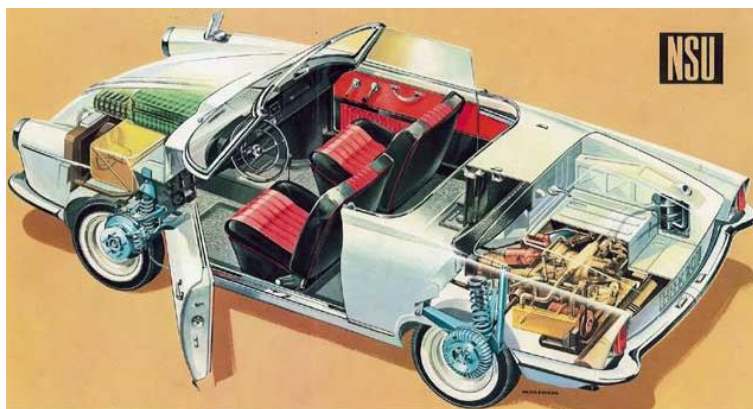
Obrázek 11 - 4. Pracovní fáze Wankelova motoru (KKM) [6]

3 Rotační motory v sériové výrobě osobních automobilů v 2. polovině 20. století – přehled

Použití a výroba Wankelova motoru se rozšířila relativně rychle a mnoho automobilek představilo nějaký svůj méně, či více úspěšný koncept. Bohužel po počátečních technických problémech (hlavně s životností agregátu) z nich většina od tohoto konceptu ustoupila a věnovala se dále modelu standardního pístového motoru. Výjimkou je pouze Mazda, která potenciál Wankelu nezavrhla, dále jej vylepšuje a používá v některých svých osobních sériových vozech i dnes.

První automobilkou, která Wankelův motor použila do svého vozu, byla logicky německá firma NSU. Vzhledem k tomu, že Felix Wankel s firmou spolupracoval a Hanns-Dieter Paschke dokonce posunul jeho práci blíže ke konkrétnímu uplatnění v automobilu, bylo zřejmé, že konkrétní výsledek na sebe nenechá dlouho čekat. Prvním sériovým vozem s tímto motorem se stal v roce 1964 NSU Spider založený na platformě vozu NSU Sport Prinz. [7] [14]

3.1 NSU Spider

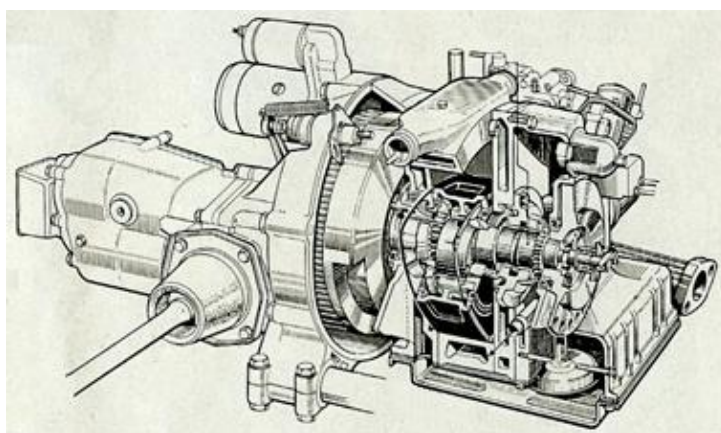


Obrázek 12 - Částečný řez vozidlem NSU Spider [28]

Jak již bylo řečeno, NSU Spider vycházel z vozu NSU Sport Prinz a představen byl roku 1963. Samotná výroba, ale startovala o rok později a trvala relativně krátké 3 roky. Tento lehký dvoudvéřový kabriolet měl posloužit jako testovací platforma pro první

sériové použití Wankelova motoru v automobilu. Svému účelu posloužil, ale vzhledem ke krátké době, ve které byl vyráběn, nestihl motor předvést všechna svá úskalí a zákoutí, z nichž stěžejní záležitostí byla právě životnost. Pouhých 2300 prodaných kusů svědčí o tom, že se Spider hitem nestal především kvůli relativně vysoké pořizovací ceně a také kvůli tomu, že jen málo zákazníků bylo ochotných utratit své peníze za nový a neprověřený produkt.

Motorem Spideru byl jednorotorový Wankel o výkonu 37 kW při otáčkách 6000 1/min s objemem 497,5 cm³. Byl umístěn za zadními sedadly, poháněl zadní nápravu a vzhledem ke kompaktním rozměrům se nad ním nacházel i menší zavazadlový prostor. Spárován byl s čtyřrychlostní plně synchronizovanou manuální převodovkou, jež umožňovala dosahovat maximální rychlosti 155 km/h a akcelarovat z 0 – 100 km/h byl vůz schopen za 14,5 sekundy. Kromě pohonné jednotky a zajímavějšího designu, však revoluci nepřinesl, což však ani nebylo jeho úkolem. První problémy začaly vycházet na povrch "až" (spíš už) ke konci výroby a to NSU směřovala své úsilí k dalšímu projektu jménem Ro80. Výrazně je tedy neřešila. [7] [12] [14]



Obrázek 13 - Motor vozu NSU Spider [28]

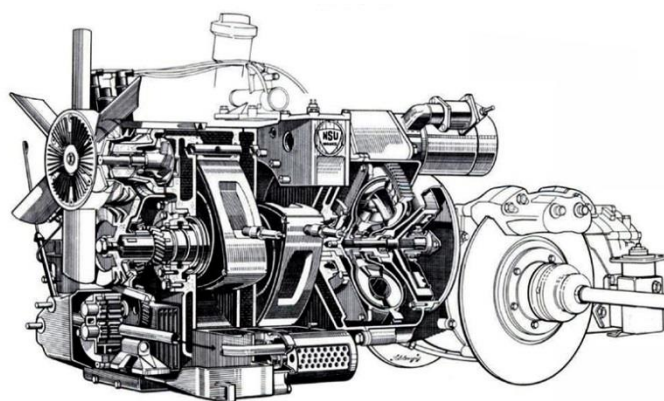
3.2 NSU Ro80



Obrázek 14 - NSU Ro80 [31]

NSU Ro80 bylo prvním vozidlem, ve kterém automobilka NSU Wankelův motor skutečně vyzkoušela. (Označení Ro mělo symbolizovat rotační motor a číslo 80 plánovaný výkon v koňských silách. Ve finále jich však motor měl 115.) Výroba započala v roce 1967 a trvala až do roku 1977. Během těchto deseti let produkce se vyrobilo přibližně 37 000 kusů, ale prodejní úspěchy na počátku vystřídal úpadek na jejich konci. Vůz trápily problémy právě s rotačním motorem, jenž měl opět velmi malou životnost, a i spotřeba, která se pohybovala kolem 14 – 16 litrů na 100 km (zvyšovala se společně s horšícím se stavem) nebyla velkým lákadlem. Přibližně po 20 000 ujetých kilometrech se již objevovaly první problémy a valná většina motorů nedosáhla ani hranice 50 000 km. Poté byla nutná generální oprava, ale ve většině případů došlo na úplnou výměnu za nový kus. Ke konci výroby se problémy sice částečně podařilo vyřešit, ale zákazníci již neměli v tento vůz a automobilku NSU důvěru.

Zmiňovaným motorem byl dvourotorový Wankel o výkonu 85 kW při otáčkách 5500 1/min s objemem 995 cm³. Objem jedné komory se shodoval s objemem motoru u vozu NSU Spider a je pravděpodobné, že s ním dost prvků sdílel. Motoru, jenž poháněl přední kola, byla přidělena třírychlostní poloautomatická převodovka se systémem vypínání spojky při změně polohy řadicí páky a umožňovala vozu dosahovat maximální rychlosti až 180 km/h. Další zajímavostí bylo, že vůz byl vybaven kotoučovými brzdami na obou nápravách, z nichž přední byly umístěny přímo u rozvodovky, kvůli snížení neodpružených hmot. (viz obrázek níže) [14] [31]



Obrázek 15 - Dvourotorový Wankel vozu NSU Ro80 [4]

3.3 Citroën GS Birotor

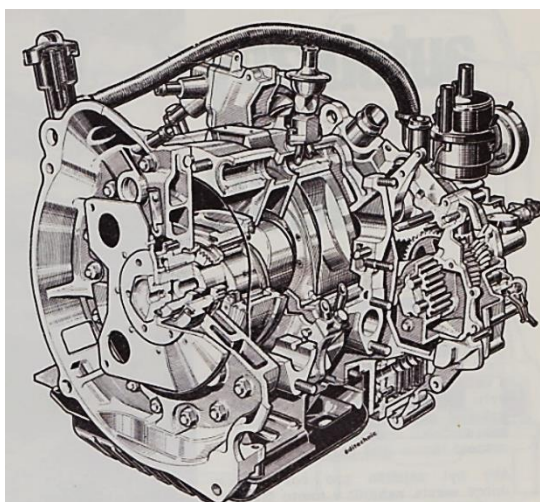


Obrázek 16 - Citroën GS Birotor [18]

Když v roce 1964 koupila společnost Citroën od NSU licenci na výrobu Wankelova motoru, vypadalo to velmi slibně. První zkouškou tohoto motoru v automobilu, kterou Citroën provedl, byl tzv. Projekt M35. Šlo o jednorotorový Wankel osazený v modelu Ami. Tento test postavil Citroënu odrazový můstek na použití Wankelova motoru v jeho dalším vlastním sériovém voze, kterým se stal právě model GS. Citroën GS Birotor byl vlastně standardním modelem GS s několika úpravami, vzhledem k tomu, že byl běžně osazován plochými čtyřválci s krátkou stavbou. Wankel se tedy povedlo usadit, avšak za cenu příčného uspořádání před přední nápravou, umístění rozvodovky mimo osu vozu, různě dlouhých hnacích hřídelů a v neposlední řadě výměnu stávajících brzdových kotoučů za masivnější s vnitřním chlazením a lapači vzduchu.

Samotný motor byl, na rozdíl od Projektu M35, dvourotorový a objem jedné pracovní komory činil $497,5 \text{ cm}^3$ (celkově tedy 995 cm^3), což bylo opět stejné číslo jako u NSU

Ro80. Náhoda to nebyla, jelikož tento agregát (Comotor 624) byl výrobkem společnosti Comotor SA, jež byla společným podnikem společnosti NSU a Citroën. Výkon 79 kW byl dosahován při otáčkách 6500 1/min a oproti NSU Ro80 byl snížen, kvůli příznivějšímu průběhu točivého momentu. Dále spolupracoval s třírychlostní poloautomatickou převodovkou, jež umožňovala dosahovat maximální rychlosti 175 km/h a vůz s ní zrychloval z 0 – 100 km/h za 14 sekund. Všechny tyto parametry, společně s hydropneumatickým pérováním s regulovatelnou tuhostí a automatickým vyrovnáváním světlé výšky dle zatížení, dělaly z Citroënu GS Birotor velice zajímavý vůz. Bohužel kvůli vysoké pořizovací ceně a vysoké spotřebě (udávaná spotřeba byla 12,8 l/100km, ale ve skutečnosti byla vyšší) nebyl pro zákazníky atraktivní, tudíž se prodalo jen velmi málo kusů (cca 850). Na tomto základě Citroën nabídl svým zákazníkům možnost odkupu vozu zpět a jejich následné sešrotování, což je dnes asi také důvodem, proč se těchto vozidel dochovalo jen velmi málo. [3] [10]



Obrázek 17 - Comotor 624 (Motor Citroënu GS Birotor) [3]

3.4 Mazda Cosmo Sport (110S)

Poté, co Mazda v 60. letech minulého století koupila licenci na výrobu Wankelova motoru, začala okamžitě na projektu usilovně pracovat. Mazda Cosmo Sport (označení 110S bylo pro export a symbolizovalo výkon v koňských silách) byla vyvíjena od samotného začátku jako sportovní vůz výhradně pro zástavbu Wankelova motoru. Prvním testovaným motorem v tomto voze byl prototyp s kódovým označením L8A,

jenž měl rovnou dva rotory s celkovým objemem 798 cm³. Byl to však skutečně pouze prototyp a rychle jej nahradil další vývojový stupeň nazvaný L10A, který už měl 982 cm³ a výkon 81 kW (110 koní) při otáčkách 7000 1/min. Tento typ již posloužil Mazdě jako testovací vzorek a do roku 1967 (začátek sériové výroby) tak Mazda sbírala data k dalšímu vývoji.



Obrázek 18 - Mazda Cosmo Sport [19]

První série Mazdy Cosmo Sport (první sériový vůz se dvěma rotory, dokonce ještě před NSU Ro80) byla uvedena s motorem L10A a čtyřrychlostní manuální převodovkou. Tato kombinace umožňovala zrychlení z 0 – 100 km/h za 8,7 sekundy a maximální rychlost 185 km/h. Na trhu však setrvala pouze rok. Již v roce 1968 přišla Mazda s druhou sérií, jež znamenala změny jak v motorizaci, tak lehké změny karoserie i interiéru. Nový motor, který získal označení L10B, byl silnější o dalších 13 kW (celkově tedy 94 kW = 128 koní) a byl spojen s pětirychlostním manuálem. Přestože vůz lehce ztěžkl (asi o 20 kg), zlepšila se jeho jízdní dynamika i vlastnosti. Z 0 – 100 km/h nyní zrychloval už jen za 8,1 sekundy a maximální rychlost se posunula na hranici 200 km/h. Dále byly posíleny brzdy, zvětšeny disky kol a také byl o 150 mm rozšířen rozvor. To vše posunulo Mazdu Cosmo Sport zase o krok kupředu.

Hlavním cílem automobilky Mazda bylo však dokázat kvality rotačního motoru, a tak s modelem Cosmo Sport v roce 1968 absolvovala vytrvalostní 84 – hodinový závod "Marathon de la Route", kde ještě s první generací motoru L10A obsadila 4. místo. To byl opravdu kvalitní výsledek.

Přestože Cosmo Sport byl po celém světě velmi uznáván, především za perfektní jízdní vlastnosti, futuristický vzhled a v neposlední řadě vyjímečný motor, vyrobilo se za 5 let produkce jen něco kolem 1150 kusů. Jednou z hlavních příčin bylo také to, že výroba probíhala ručně, při frekvenci asi jeden kus denně. Pro automobilku Mazda se však stal důležitým milníkem, jelikož u ní nastartoval éru rotačních motorů. [5] [8] [9]



Obrázek 19 - Motor L10A s převodovkou (první série Mazdy Cosmo Sport) [21]

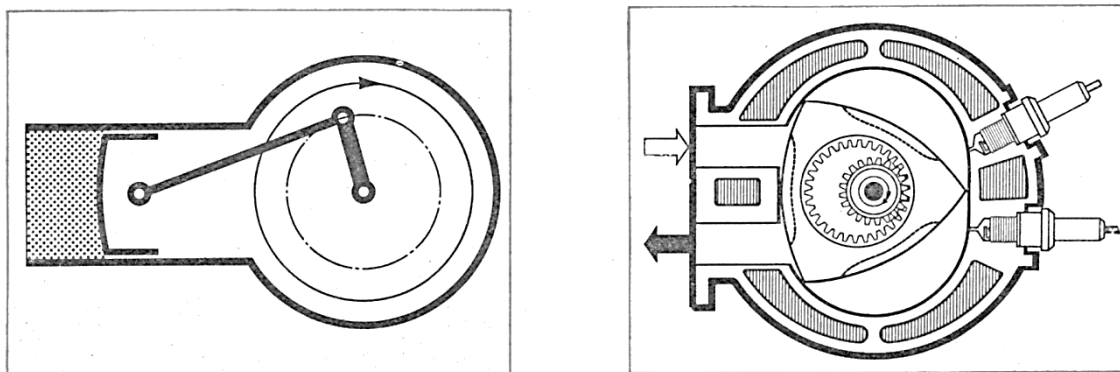
4 Výhody a nevýhody motoru patent Wankel z hlediska ekonomiky a technologie výroby

4.1 Ekonomické a technologické hledisko

Wankelův motor se v automobilovém světě výrazně nerozšířil hned z několika důvodů. Velkým problémem byla krátká životnost tohoto stroje v porovnání s běžnými pístovými motory. Ta dělá vrásky na čele konstruktérům dodnes, a přesto, že se situace značně zlepšila, ba dokonce jsou dnešní rotační motory od Mazdy silně konkurenceschopné, použití termínu "rovnocenné" by v tomto případě nebylo na místě. Na vině jsou zde těsnění vrcholů rotujícího pístu, jež jsou vystavena velkému namáhání a je tedy velice důležité dobře zvolit vhodný materiál k jejich výrobě, stejně jako specifikovat tvar, který by jinak mohl ničit povrch spalovací komory. V případě NSU byl materiálem později karbid titanu, u Mazdy zase hliníko – uhlíkový kompozit. Nyní Mazda používá železné litiny, jejichž přesné složení je předmětem podnikového tajemství.

Největší problém je však v tom, že výroba a hlavně vývoj takto specifického agregátu jsou časově a finančně extrémně náročné, tudíž málokterý automobilový výrobce hodlá tento riskantní a (budeme-li upřímní) aktuálně prodělečný krok podstoupit.

Vzhledem k specifickému tvaru spalovací komory, rotačního pístu a kompletně jiné koncepci, vyžaduje výroba Wankelova motoru naprosto odlišné výrobní postupy, lepší materiály a také přesnost výroby na jiné úrovni. Když srovnáme tvar spalovací komory u konvenčního pístového motoru s tvarem motoru Wankel, dojdeme k závěru, že náročnost výroby kruhového průřezu válce a epitrochoidy je nesrovnatelná.



Obrázek 20 – Srovnání tvaru pracovní komory pístového motoru a Wankelova motoru [3]

Logickou úvahou se dostáváme do situace, kdy výroba takového bloku motoru je velmi nákladnou položkou. Abychom tedy, jako společnost, zůstali v plusu, je nutné prodat dostatečný počet kusů, jež zaručí příjem pro pokrytí výrobních nákladů, výtěžku i dalšího vývoje. To se ovšem nestane. Zákazníkům se dlouholetou zkušeností "vrylo" do paměti, že Wankelův motor "není dobrý", a tak o něm při volbě koupi nového vozu většinou ani neuvažují. Dle aktuálních prodejů vozidel s Wankelovým motorem lze usuzovat, že v blízké době jej výrazné rozšíření nečeká. Dostáváme se tedy do slepé uličky... K odstranění neduhů a vylepšení vlastností rotačního motoru je potřeba vývoj, jenž je velmi nákladný, respektive zahrnuje nutnost dostatku finančních prostředků, které výnosy z prodejů konkrétních modelů nepokryjí, a proto zde pro společnost není důvod ani motivace se jím dále zabývat. V současné době se vývoji Wankelova motoru věnuje pouze Mazda, pro kterou je tato činnost spíše technologickou prezentací jejího know – how a dotuje ji z prodejů ostatních vozů. [5] [14]

4.2 Výhody

Mnoho lidí dnes stále nechápe, proč je zde vlastně snaha udržet Wankelův motor při životě, když jej běžné pístové motory překonávají? Odpověď je jasná. Ačkoliv má rotační motor spoustu zatím nevyřešených neduhů, skrývá v sobě obrovský potenciál, jenž je bohužel více mediálně zahalen do negativ.

První, a dle mého názoru, největší předností je poměr výkonu ku objemu spalovací komory, potažmo jeho rozměrům i hmotnosti. Wankel má při stejném objemu obecně dvakrát až

třikrát vyšší výkon než konvenční pístový motor a je tak velmi vhodný k zástavbě tam, kde je potřeba ušetřit hmotnost i velikost agregátu. To je také důvodem, proč byl a stále je vhodnou volbou pro sportovní automobily a závodní účely. Díky jeho kompaktním rozměrům jej lze ve voze umístit mnohem níže, a tedy má příznivý vliv na jízdní vlastnosti a celkově přispívá ke stabilitě vozidla za jízdy.

Další obrovskou výhodou je fakt, že motor může pracovat ve velice širokém spektru otáček (modely se různí, ale dosáhnout otáček 10 000 1/min není nic nemožného), je velice pružný a neochotou k jejich změnám rozhodně netrpí. Navíc jej lze téměř dokonale vyvážit, což vede k úžasné hladkému chodu, zejména díky skutečnosti, že zde není nutno převádět posuvný pohyb na rotační. Ten totiž už vykonává rovnou samotný rotor.

Rotační pohyb pístu, jak bylo zmíněno o řádek výše, opět hraje Wankelu do karet. Dává možnost naprosto vynechat spoustu dalších nadbytečných komponent, jako jsou ojnice, ventily, vačkový hřídel a jiné, pro běžný pístový motor, nezbytné součásti. Jeho konstrukce je tak mnohem jednodušší a na servis méně náročná.

Veškerý "rozvod" si rotující píst obstarává sám a navíc zvládá tři pracovní cykly během jedné otáčky. Výstupní hřídel má dále na sobě excentrickou vačku (pro každý rotor jednu), jež určuje dráhu rotujícího pístu a zvolený směr rotace má na starost ozubení. Vačka, tak během jedné otáčky pístu, vykoná otáčky rovnou tři a společně s ní i výstupní hřídel. (Jedna otáčka výstupního hřídele = jeden pracovní cyklus) Klasický motor zakončuje pracovní cyklus dvěma otáčkami klikového hřídele. Zajímavostí je, že přesto všechno trvají jednotlivé fáze Wankelu o něco déle a je tedy vhodný pro přímé vstřikování i většího množství paliva, jelikož zde na to "je čas". Tento jev lze i docela dobře zužitkovat pro použití vodíkového pohonu. Zde by totiž ani nemusel vadit nižší kompresní poměr, jenž se u motorů s tímto palivem stejně redukuje.

V neposlední řadě je dalším nezapomenutelným plusem "nemožnost" Wankelův motor zadřít. Konstrukce, jež obsahuje snad vždy hliníkový statický blok a ocelový rotor, zaručuje, že vyšší teplotní roztažnost hliníku nedovolí při přehřátí kolidovat rotoru se stěnami bloku a motor tedy pouze neutěšňuje jednotlivé komory. Nehrozí tak jeho zničení a velice nákladná oprava. [11] [13] [14] [15]

4.3 Nevýhody

Stroj Felixe Wankela bohužel trápí stále stejné bolesti, které jej provázejí v podstatě od počátku a prozatím se je nepodařilo úplně vyřešit. Tou hlavní je už mnohokrát zmiňovaná životnost. Vzhledem k specifickému tvaru spalovací komory a principu pohybu rotoru v ní, je pro správný chod motoru nezbytně nutné, aby jednotlivé komory byly od sebe neustále neprodyšně odděleny. Tento úkol mají na starost těsnící lišty na vrcholech i po stranách rotoru, které sice plní svou funkci, ale vzhledem k vysokému namáhání ne věčně. Namáhány jsou, jak mechanickým třením o stěnu bloku, tak velkými teplotními rozdíly, jež jsou největší u sacího kanálu a v místě hoření směsi. Tomuto také nenapomáhá fakt, že Wankelův motor nelze vnitřně chladit výměnou plynů, jako je tomu u běžného pístového motoru, a tedy v bloku vnikají horká a chladná místa.

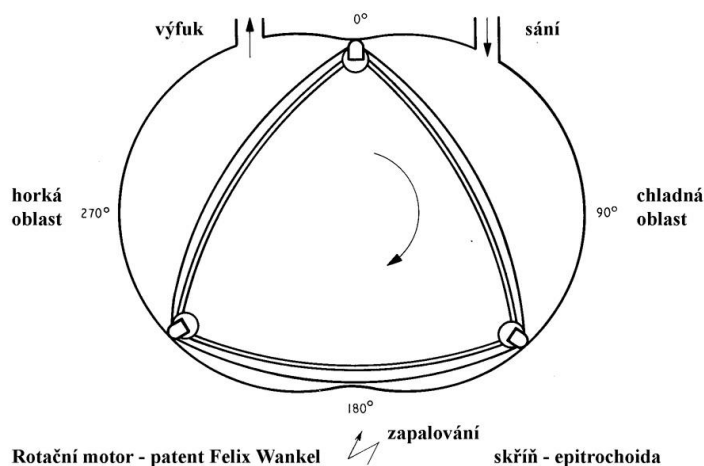
Dobře nedělají lištám ani studené starty, při kterých se špatně ohřívají směrem od jejich středu a vytvářejí nerovnoměrný tlak na stěny spalovací komory. To ústí v další rychlé opotřebení. Zajímavostí je, že největší potíží není ani tolik samotné tření lišty o blok, ale permanentně se měnící tlak, jenž je na ně vyvíjen kvůli excentrickému pohybu pístu.

Postupem času (dříve už kolem 30 000 – 50 000 najetých km, dnes kolem 100 000 – 120 000 km) se dostaví situace, kdy těsnící lišty ztratí svou schopnost udržet jednotlivé komory separované, začne docházet k únikům médií z jedné komory do druhé a tedy ke ztrátě komprese. Z počátku se zvýší spotřeba paliva i oleje, ale situace se stane brzy neúnosnou a motor vyžaduje generální opravu.

Dalším neduhem je realita, že Wankelův motor má nižší tepelnou účinnost než klasický pístový motor. Na pranýř se v tomto případě dostává několik důvodů, z nichž prvním je opravdu nevhodný tvar spalovací skříně (s tím související poměr objem/obsah spalovací komory). Jak je známo, optimálním tvarem pro spalovací skříně je koule, které však pravděpodobně není možno jednoduše dosáhnout. Nedaří se to standardním pístovým motorům, stejně tak jako Wankelu. Naneštěstí pro Wankel, je komora vytvořená pístem a epitrochoidní skříní dokonalému tvaru koule velmi vzdálena. Je vlastně relativně dlouhá a úzká, což se v tomto případě opravdu nehodí a hoření směsi je v ní tedy značně problematické (v tomto bodě má běžný válec výhodu). Naproti tomu obsah komory je dost velký a dochází tedy k nezanedbatelným tepelným ztrátám.

Dalším důvodem nižší tepelné účinnosti je relativně nízký kompresní poměr, jenž je opět velmi omezován tvarem spalovací komory a také teplotou kompresního zdvihu (ta musí být nižší, než teplota samovznícení směsi). Nemožnost jeho zvýšení vede i k nemožnosti zvýšit právě účinnost motoru. Přesto, že kompresní poměr je poté ještě možno ovlivnit množstvím nasátého vzduchu do směsi, i toto řešení má bohužel své limity.

Ke zlepšení situace zrovna nepomáhá problematické chlazení motoru, jelikož (jak už bylo zmíněno) v pracovním prostoru vznikají horká a chladnější místa, která jsou dána konstrukcí motoru. V části, poblíž sacího kanálu, je motor neustále vnitřně (efektivně) ochlazován nově přichozí směsí (v některých případech pouze vzduchem). Naproti tomu druhá strana bloku (u výfukového kanálu a v místě spalování směsi) je permanentně vystavena vysokým teplotám a vnitřní chlazení zde možné není.



Obrázek 21 - Teplotní schéma Wankelova motoru [4]

Je tedy nutno chladit blok intenzivně z vnějšku, což je realizováno systémem integrovaných kanálků, jimiž proudí chladící médium. Výsledkem tedy je, že motor bude nerovnoměrně tepelně namáhán, s čímž nejspíš nezbyvá nic jiného, než se smířit.

Snad skoro všechny výše uvedené skutečnosti nahrávají relativně vysoké spotřebě paliva. (Obecně kolem 15 – 20 litrů na 100 km) Vyšší spotřeba oleje, která je dána především zvýšenou potřebou mazání těsnících lišt (přibližně dvojnásobné množství, než u běžného pístového motoru) a s tím vším spojenými hodnotami emisí. Situace se sice částečně daří řešit, ale v tomto ohledu mají stále navrch konvenční motory. [11] [14] [15] [17]

5 Posouzení ekonomiky a ekologie provozu a možnosti použití alternativních paliv

5.1 Wankelův motor z hlediska ekologického i ekonomického

Wankelův motor nikdy nepatřil mezi úsporné. V samotných počátcích jeho výroby a prvotním objevování jeho skutečných parametrů (míněno 50. – 60. léta minulého století) se vyšší spotřebě paliva nevěnovala velká pozornost, jelikož ceny paliv byly (na dnešní poměry) velice nízké.

Co se týče exhalací, je nutno podotknout, že ty se též nijak výrazně nesledovaly a stanovené limity byly i přesto značně benevolentní. Situace se však změnila s příchodem ropné krize v 70. letech. Lidé najednou začali mnohem více hledět na fakt, že provoz automobilu s Wankelovým motorem je podstatně nákladnější záležitostí, než provoz běžného vozu (spotřeba byla často i dvojnásobná) a této vlastnosti nyní přidělovali vyšší prioritu. Skutečnost, nad kterou by dříve ve prospěch hladšího chodu a dalších Wankelových předností, mávli rukou, byla náhle jedním z rozhodujících faktorů při volbě nového vozu. Navíc novinky o zjištění karcinogenity spalovaného oleje společně s hlediskem nízké životnosti jen přidávaly tomuto projektu pomyslný hřebíček do rakve. To vedlo firmy jako NSU a Citroën ke krachu, jež se výzkumem a výrobou Wankelova motoru finančně vyčerpaly.

5.1.1 Vývoj a snaha o zlepšení spotřeby i exhalací

Tvar spalovací komory Wankelu propůjčuje vyšší odolnost při použití paliva s méně oktany, zatímco pístový motor je na jeho použití náchylnější. Méně příjemným faktem už je, že tento tvar je také důvodem nedokonalého spalování směsi s větším počtem nespálených uhlovodíků ve výfukových plynech, ale i to má k sobě drobnou kompenzaci. Nižší spalovací teploty jsou důvodem relativně nízkého obsahu NO_x , což bylo v prvních modelech motorů ještě umocněno použitím recirkulace spalín (EGR). Už v roce 1920 sir Harry Ricardo dokázal, že každé 1% obsahu výfukových plynů ve vstupující směsi navíc, znamená snížení teploty hoření o 7,2 °C. Toto zjištění dovolilo Mazdě splnit Clean Air Act of 1970 v USA roku 1973, za

použití jednoduchého a levného "tepelného reaktoru", což byla vlastně zvětšená komora ve výfukovém potrubí. Ten měl za úkol, při snižování poměru vzduch – palivo, spalovat zbylé uhlovodíky až do doby, dokud ještě podporovaly hoření. (Naopak, aby se s nespálenými uhlovodíky a emisemi NO_x vypořádaly i pístové motory, bylo vyžadováno použití relativně drahých katalyzátorů.) Toto levné řešení zlepšilo spotřebu, jež byla velkou slabinou Wankelova motoru, právě v době, kdy vlivem ropné krize v roce 1973, prudce stouply ceny pohonných hmot. Mazdě se takto podařilo zlepšit využití paliva (právě za použití tepelného reaktoru) u svého modelu RX-7 o 40 %. I přesto nakonec stejně přešla k použití katalyzátorů. Podle výzkumu Curtisse-Wrighta je množství nespálených uhlovodíků přímo úměrné povrchové teplotě rotoru, přičemž čím vyšší je teplota, tím menší je jejich obsah ve výfukových plynech. Curtiss-Wright také přišli s objevem, že rotor může být rozšířen i bez dalších změn zbytku motoru, což má za následek snížené ztráty třením a zvýšené množství spálené směsi i výkon. Limitujícím faktorem pro rozšiřování rotoru však jsou hlavně mechanická hlediska, zejména pak deformace hřídele při vysokých otáčkách.

Předností Wankelova motoru vždy byla možnost dosahovat vysokých otáček, ale velkým neduhem byl také malý točivý moment v otáčkách nízkých. Postupným vývojem se ukázalo, že brzké otevírání sacích kanálů, a tedy prodloužená doba sání společně s větší excentricitou rotoru, může točivý moment v nízkých otáčkách znatelně zvýšit. Tvar a momentální poloha rotor – spalovací komora mají pak dále vliv na emise a využití paliva, jež je možno ještě ovlivnit volbou konkrétního umístění a počtu zapalovacích svíček.

Mazda RX-8 s motorem Renesis splnila požadavky na využití paliva státu Kalifornie, dokonce i pro standardy nízkoemisních vozidel. Tento úspěch v sobě zahrnoval spoustu inovací. Výfukové kanály byly přesunuty z obvodu do stěn spalovací komory, což vyřešilo problém s hromaděním nespálených částic a tepelnými deformacemi kanálů sání a výfuku. Byla použita nová boční těsnění po stranách rotoru a dále bylo přidáno několik keramických prvků. Tento krok umožnil Mazdě eliminovat přesah mezi otevřením sacího a výfukového kanálu, zatímco vzrostla plocha pro výfukový kanál. Postranní kanály zachytily nespálené palivo v komoře, snížily spotřebu oleje a zlepšily stabilitu hoření směsi v nízkých otáčkách a při malém zatížení. Emise uhlovodíků z těchto bočních výfukových kanálů jsou o 35 – 50 % nižší, než u původních kanálů situovaných po obvodu pracovní komory, díky téměř nulovému

překryvu doby sání a výfuku. Obvodové kanály mají také lepší hodnoty středního efektivního tlaku, (zvláště ve vysokých otáčkách) čemuž napomáhá i obdélníkový tvar sacího kanálu. Bohužel i přes veškerá tato nesporná zlepšení byla Mazda nucena model RX-8 stáhnout, jelikož motor stále nedokázal splnit emisní normu EURO 5. Jeho produkce tak byla v roce 2012 pozastavena. [1] [5] [27] [29]

5.1.2 Shrnutí

Pokud tedy výše rozebrané skutečnosti shrneme, dostáváme se k výsledkům, které, přes dosud velmi vyčerpávající vývoj, stejně neprezentují nijak růžové vyhlídky. Nevýhod je relativně dost a z emisního hlediska jsou problematické hlavně obsahy HC, CO a CO₂, jež jsou obecně vyšší než u pístových motorů. Z hlediska zdravotního, je pak hlavním problémem spalování motorového oleje, jež je karcinogenní, což se ale v případě Mazdy daří udržet pod hladinou určenou předpisy za pomoci oxidačních katalyzátorů. Světlejší stránkou jsou pak (ve výfukových plynech) alespoň nižší obsahy NO_x.

Spotřeba paliva se sice stále pohybuje výše, než bychom si představovali, ale vzhledem k účtyhodným výkonům, menším rozměrům i váze a jiným kladným vlastnostem si troufám tvrdit, že je relativně přiměřená.

Naštěstí se situace postupně daří vylepšovat, a není tedy nereálné, aby se v těchto ohledech Wankelův motor postupem času nedokázal konvenčním motorům vyrovnat, nebo je dokonce i překonat.

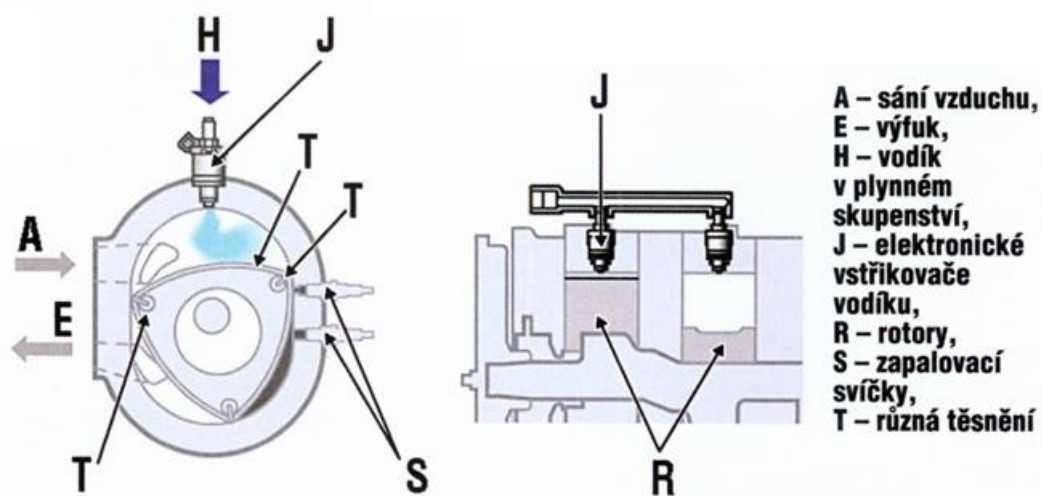
5.2 Budoucí koncept Wankelova motoru

Nyní Mazda pokračuje ve vývoji Wankelova motoru nové generace s kódovým označením 16X. Společnost zkoumá možnosti zážehu směsi za použití laseru, a tím eliminaci standardních zapalovacích svíček. Dále by měl být motor doplněn o přímé vstřikování, k němuž je (jak už bylo jednou zmíněno) relativně vhodný. Toto vede k větší excentricitě rotoru, jež dorovnává délku cyklu pístového motoru a navíc dále zvyšuje točivý moment v nízkých otáčkách. Mazda si od těchto inovací slibuje opětovné snížení spotřeby paliva i hodnot emisí.

Pro další zvýšení efektivity využití paliva chce Mazda využívat Wankelův motor jako podpůrný agregát k prodloužení dojezdu v nových řadách hybridních automobilů. Výsledkem tohoto snažení je například Mazda2 EV. Provoz Wankelu v úzkém (neměnném) rozsahu provozních otáček má tak několik významných výhod. Měla by být zajištěna delší životnost stroje, významně nižší spotřeba právě díky možnosti optimalizace provozního režimu (a tedy efektivnější využití paliva) a snížení vlivu ostatních nevýhod tohoto druhu motoru. [5] [22] [30]

5.3 Možnosti použití alternativních paliv

Jako vhodným alternativním palivem pro Wankelův motor se zdá být vodík. Vlastností motoru (jak je zmíněno o kus výše) je totiž nižší kompresní poměr, který je pro vodíkový pohon relativně vhodný. Hlavní předností Wankelova motoru, pro tento druh paliva, je však jeho technická konstrukce. Vzhledem k specifickému pohybu rotoru, při kterém jsou vytvářeny jednotlivé, od sebe vzájemně oddělené komory, je možno pohodlně vstříkovat (vefukovat) vodík, aniž by zde hrozilo riziko zpětného šlehnutí do sacího kanálu, jelikož spalovací a sací komora nejsou propojeny. Dalším bonusem pak je nižší teplota v části sání, díky které by nemělo dojít k samovznícení směsi, ještě před transportem do spalovací komory. Tyto skutečnosti je třeba při použití vodíku ve standardním pístovém motoru řešit, jelikož je zde pouze jedna komora na všechny cykly spalování paliva, která je navíc ovlivněna teplotou z předcházejícího cyklu hoření.



Obrázek 22 - Schéma rotačního motoru RENESIS Hydrogen RE [4]

Skvělou zprávou (a hlavním důvodem použití tohoto paliva) je, že emisemi je zde jen velmi nepatrné množství NO_x , voda ve formě páry a žádný CO_2 . Tento druh paliva je tedy velmi ekologickým. [5] [20] [24]

Konkrétními případy kombinace Wankelova motoru a vodíku, jsou dnes 2 druhy využití této technologie:

- 1. Vodík jako palivo pro přímý pohon vozu**
- 2. Vodík s Wankelovým motorem sloužícím jako prodlužovač dojezdu elektromobilů**

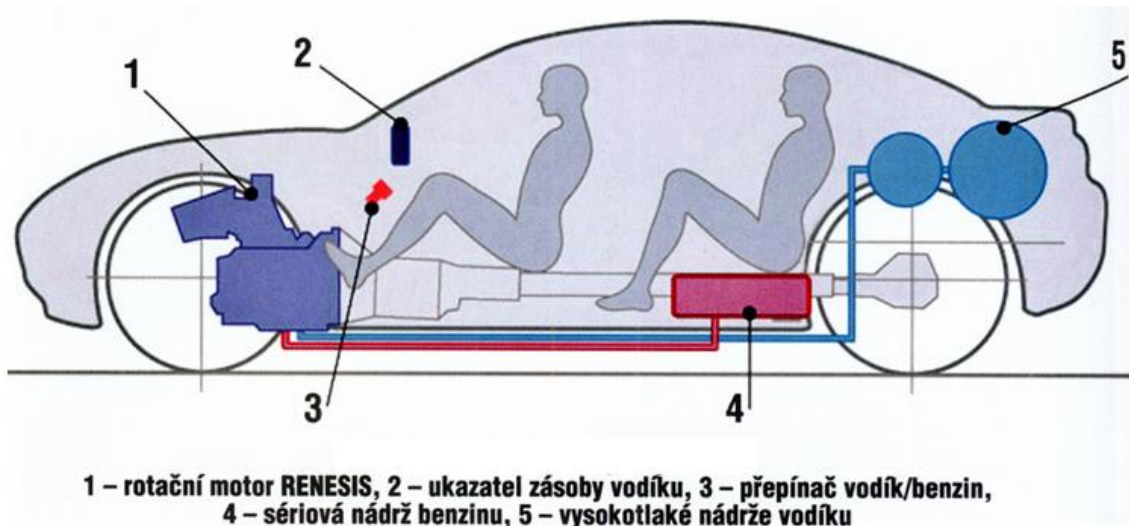
5.3.1 Vodík jako palivo pro přímý pohon vozu

V prvním případě je zde zatím asi jediný větší zástupce z hlediska sériových vozů, kterým je Mazda RX-8 Hydrogen RE. Pohonnou jednotkou je v tom případě upravený motor z modelu RX-8 RE, jenž může pracovat jak s vodíkem, tak s benzínem. Systém Dual-fuel technology implantovaný v tomto voze tak dovoluje plynule přepínat mezi preferovaným palivem, jež umožňuje dojezd 100 km s vodíkem a 550 km s benzínem. (Celkový dojezd tedy činí 650 km)

Úpravy motoru se týkaly především změn sacích a výfukových kanálů, a to jak jejich tvaru, tak i polohy a počtu. Dále byly přidány vstřikovače vodíku (dva na každý rotor), jež jsou umístěny v prostoru sání a samotné rotory byly odlehčeny.

Rapidně snížen byl výkon i točivý moment motoru, ale pouze v případě běhu na vodík. Při provozu na benzín tak motor stále vykazuje uspokojivých 154 kW s točivým momentem 222 Nm, oproti 80 kW a 140 Nm při běhu s vodíkem.

Vozidlo bylo dále vybaveno systémem recirkulace spalin (přesto, že emise NO_x jsou i tak velmi malé) a optimalizovány byly i rozměry pneumatik, kvůli snížení spotřeby. [5] [20] [24]



Obrázek 23 - Příčný řez vozem Mazda RX-8 Hydrogen RE [4]

5.3.2 Vodík s Wankelovým motorem sloužícím jako prodlužovač dojezdu elektromobilů

V poslední době je trendem využívat rotační motor jako podpůrnou pohonnou jednotku pro pohon elektromobilů. Přesto, že ve většině případů je palivem benzín, je možno i v tomto případě použít jako alternativu vodík. Hlavní hnací jednotkou je tedy elektromotor s akumulátorem, jenž je pro prodloužení dojezdu dobíjen generátorem poháněným vodíkovým Wankelem, případně se využívá výkonu elektromotoru i Wankelu zároveň.

Takovým vozem je již od roku 2009 Mazda Premacy Hydrogen RE Hybrid. Její pohonné ústrojí obsahuje stejný motor jako Mazda RX-8 Hydrogen RE, ale s tím rozdílem, že k tomuto motoru je navíc připojen generátor, jenž pohání elektromotor. Ten zde funguje jako hlavní pohonná jednotka. Wankelův motor, který opět funguje na systému Dual-fuel technology, tak může dle potřeby spalovat vodík či benzín, ale z hlediska pohonu vozu je koncipován jen jako motor pro generátor elektrické energie. O samotný pohyb vozu se tudíž stará pouze elektromotor, jenž svých 110 kW a 350 Nm posílá na přední kola. Tato konfigurace dovoluje vozu ujet až 200 km pouze na vodík, což je oproti RX-8 Hydrogen RE dvojnásobek. Příkladná benzínová nádrž má kapacitu 25 litrů a prodlužuje pak dojezd vozu o dalších 400 km. [22] [23] [24]

5.3.3 Vodík z hlediska ekologie i ekonomie

Temnější stránkou vodíkového pohonu je bohužel skutečnost, že přesto, že spalování vodíku v motoru automobilu je ekologické, s jeho výrobou už to tak úplně není. Ekologická elektrolýza je velmi drahá a energie z větrných, či solárních elektráren ještě dražší. To je tedy důvod, proč se vodík nejčastěji získává rozkladem zemního plynu, nebo je na jeho výrobu použita elektřina z tepelných elektráren. Z ekologického hlediska je tak výsledek většinou ještě horší, než kdybychom vůz provozovali na benzín. Na povrch nám tedy vyplývá ekonomická stránka věci. Pokud chceme být ekologičtí, je potřeba si velmi tvrdě připlatit, což bohužel většina majitelů vozů není ochotna učinit, a bohužel se tomu nelze nijak divit. To je tak nejspíš jeden z hlavních důvodů, proč není vodík jako palivo zatím masově rozšířen. [25]

Přesto, že vozidel s kombinací Wankelova motoru a alternativních paliv je zatím pomálu, je evidentní, že tento projekt není slepou uličkou. Osobně se domnívám, že pro Wankelův motor je vodík vhodnou cestou do budoucna, jelikož zde jeho neduhy nabývají menšího významu, než při použití běžného benzínu a princip oddělených komor je zde značnou výhodou.

6 Závěr

V první polovině bakalářské práce se zabývám rozdělením motorů na rotačním principu a objasněním jejich funkce i použitím. Texty jsem též doplnil schématickými ilustracemi pro snadné porozumění a názornost, jež dotváří celkový obraz.

V druhé polovině potom vyzdvihuji hlavní přednosti i nedostatky Wankelova motoru, na který je tato práce především orientována, přičemž se zabývám hledisky technologickými, mechanickými, exhalacími i ekonomickými. Popisovány jsou zde problémy, na které se postupným vývojem narazilo, společně s řešeními, ke kterým se dospělo od počátku výroby v 50. – 60. letech minulého století až do dnešních dnů.

V závěru je také zmíněna možnost provozu Wankelova motoru s alternativními palivy, z nichž zatím asi jediným skutečným řešením je vodík, jenž ve svých modelech používá japonská Mazda.

Při psaní mi byly velmi nápomocné rady Ing. Branka Remka, na jejichž základě jsem často dospěl k zajímavým závěrům a dávaly mi vhodný směr při volbě zdrojů. Dále jsem využíval materiálů poskytnutých českým zastoupením Mazdy, starších i novějších vydání časopisu Automobil, knih věnujících se problematice Wankelova motoru, textů z archivu Ústavu automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel společně s internetově dostupnou literaturou, jež mi dobře posloužila i při volbě obrazových ilustrací.

O daném tématu se mi psalo příjemně, jelikož mne problematika baví a toto téma jsem navrhoval z vlastního zájmu.

7 Seznam literatury a použitých zdrojů

7.1 Literatura

- [1] HROMÁDKO, Jan. Speciální spalovací motory a alternativní pohony: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol. 1. vyd. Praha: Grada, 2012, 158 s. ISBN 978-80-247-4455-1.
- [2] FELIX WANKEL. TECHNISCHE ENTWICKLUNGSSTELLE DER FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT LINDAU/BODENSEE. *Einteilung der Rotations-Kolbenmaschinen*. [Faks. der Ausg.] Stuttgart, Dt. Verl.-Anst., Abt. Fachverl., 1963. Nürnberg: Pagma-Verl, 2011. ISBN 978-398-1075-830.
- [3] *Automobil*. Praha: Nakladatelství technické literatury, nár. podnik, Praha 1, Spálená ulice č. 51, 1974, 18(1).

7.2 Archivy

- [4] Archiv 12120 – Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, FS ČVUT v Praze
- [5] Archiv Mazda Motor Logistics Europe NV, Ing. Jan Machač

7.3 Internetové zdroje

- [6] Wankel Engine. *Animated Engines*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: <http://www.animatedengines.com/wankel.html>
- [7] Classic drive – the 1966 NSU Spider. *AUTOWEEK*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: <http://autoweek.com/article/car-life/classic-drive-1966-nsu-spider>
- [8] 1968 Mazda Cosmo Sport 110 S. *Automobile catalog*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: http://www.automobile-catalog.com/make/mazda/cosmo_1gen/cosmo_sport_110s/1968.html
- [9] History. *Mazda Cosmo Sport*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: http://www.mazdacosmosport.com/Mazda_Cosmo_110_Sport/History.html
- [10] 1973 Citroen GS Birotor. *Autocognito*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: <http://autocognito.com/2012/1973-citroen-gs-birotor/>
- [11] Wankelův rotační motor. Jak to vlastně funguje?. *auto.idnes.cz*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: http://auto.idnes.cz/wankeluv-rotacni-motor-jak-to-vlastne-funguje-f47-/ak_aktual.aspx?c=A080401_015114_ak_aktual_vok

- [12] Cars of Futures Past – 1964-1967 NSU Spider. *Hemmings Daily*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z:<http://blog.hemmings.com/index.php/2013/12/19/cars-of-futures-past-1964-1967-nsu-spider/>
- [13] Wankel Mazdy RX-9 dostane unikátní zapalování, vyřešit má spotřebu i emise. *autoforum.cz*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z:<http://www.autoforum.cz/technika/wankel-mazdy-rx-9-dostane-unikatni-zapalovani-vyresit-ma-spotrebu-i-emise/>
- [14] Faily automobilového světa: Wankelův motor. *Autíčkář*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: <http://www.autickar.cz/clanek/faily-automobiloveho-sveta-wankeluv-motor/>
- [15] MARTINEC, JIŘÍ. *NEÚSPĚŠNÉ KONCEPCE SPALOVACÍCH MOTORU* [online]. Brno, 2010, 2010 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=29664. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. LUBOR ZHÁŇAL.
- [16] Felix Wankel vyvinul nový druh spalovacího motoru s rotujícím pístem. *Česká televize*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z:<http://www.ceskatelevize.cz/ct24/archiv/1371539-felix-wankel-vyvinul-novy-druh-spalovaciho-motoru-s-rotujicim-pistem>
- [17] DOBIÁŠ, LADISLAV. *POROVNÁNÍ TRADIČNÍCH A NETRADIČNÍCH OBĚHŮ TEPELNÝCH MOTORŮ* [online]. Brno, 2012, 2012 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=54778. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Doc. Ing. JOSEF ŠTĚTINA, Ph.D.
- [18] Der vergessene Wankel. *OLDTIMER MARKT*. [online]. 4.1.2016 [cit. 2016-01-04]. Dostupné z: <http://www.oldtimer-markt.de/aktuell/nachrichten/der-vergessene-wankel>
- [19] Mazda Cosmo Sport is \$169,500 on eBay. *autoevolution*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: <http://www.autoevolution.com/news/mazda-cosmo-sport-is-169500-on-ebay-video-photo-gallery-97354.html>
- [20] FORBELSKÝ, ANTONÍN. *SPALOVÁNÍ VODÍKU V PÍSTOVÝCH SPALOVACÍCH MOTORECH* [online]. Brno, 2009, 2009 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17041. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. RADIM DUNDÁLEK, Ph.D.
- [21] 1967 – 1972 Mazda Cosmo Sport. *TopSpeed*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: <http://www.topspeed.com/cars/mazda/1967-1972-mazda-cosmo-sport-ar36795.html>
- [22] Mazda 2 RE Range Extender: Wankel nejspíše přežije v malém hatchbacku. *autoforum.cz*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z:<http://www.autoforum.cz/predstaveni/mazda-2-re-range-extender-wankel-nejspise-prezije-v-malem-hatchbacku/>
- [23] Mazda Rotary hydrogen/Hybrid – Vodíková jízda. *automobil*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z:http://www.automobilrevue.cz/rubriky/automobily/novinky/mazda-rotary-hydrogen-hybrid-vodikova-jizda_38726.html
- [24] Hydrogen Vehicle. *Mazda*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: <http://www2.mazda.com/en/technology/env/hre/>

- [25] Budoucnost, nebo nákladný sen?. *TÝDEN.cz*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: http://www.tyden.cz/rubriky/auta/zelena-stopa/budoucnost-nebo-nakladny-sen_958.html
- [26] 27. Plynová turbína (spalovací turbína) v technologickém celku. *TRANSFORMAČNÍ TECHNOLOGIE*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: <http://www.transformacni-technologie.cz/plynova-turbina-spalovaci-turbina-v-technologickem-celku.html>
- [27] Wankel engine explained. *Everything Explained.At*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: http://everything.explained.today/Wankel_engine/
- [28] NSU Spider Technical Specifications. *Unique Cars and Parts USA*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: http://uniquecarsandparts.com/nsu_spider_technical_specifications.htm
- [29] Mazda kills off RX-8 sports coupe. *AUTOCAR*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: <http://www.autocar.co.uk/car-news/motoring/mazda-kills-rx-8-sports-coupe>
- [30] Mazda stays loyal to rotary engines. *The Telegraph*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: <http://www.telegraph.co.uk/motoring/news/9550675/Mazda-stays-loyal-to-rotary-engines.html>
- [31] NSU Ro 80 (1967–77): Wankel v praxi. *Veterán autocz*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: <http://veteran.auto.cz/clanek/685/nsu-ro-80-1967-77-wankel-v-praxi>
- [32] Co předcházelo použití proudových motorů v letadlech.... *Fronta.cz*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: <http://www.fronta.cz/co-predchazelo-pouziti-proudovych-motoru-v-letadlech>
- [33] Gas Turbine for Power Generation: Introduction. *WARTSILA*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: <http://www.wartsila.com/energy/learning-center/technical-comparisons/gas-turbine-for-power-generation-introduction>
- [34] Vzpomínáme na exoty: Chrysler Turbine Car. *iPrima.cz*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: <http://autosalon.iprima.cz/vzpominame-na-exoty-chrysler-turbine-car>
- [35] GAS TURBINE. *YOUR DICTIONARY*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: <http://www.yourdictionary.com/gas-turbine>
- [36] Motor s rotačními písty – Král rotace Felix Wankel. *automobil*. [online]. 6.1.2016 [cit. 2016-01-06]. Dostupné z: http://www.automobilrevue.cz/rubriky/automobily/technika/motor-s-rotacnimi-pisty-kral-rotace-felix-wankel_41358.html

8 Seznamy

8.1 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Řez spalovací turbínou [35]	4
Obrázek 2 - Průběh točivého momentu spalovací turbíny [26]	4
Obrázek 3 - schéma dvouhřídelové spalovací turbíny [4]	5
Obrázek 4 - Chrysler Turbine Car [34]	5
Obrázek 5 - Spalovací turbína Chrysler CR2A [4]	6
Obrázek 6 - Možné koncepce spalovacích motorů [2]	6
Obrázek 7 - Drehkolbenmotor DKM 54 [36]	7
Obrázek 8 - 1. Pracovní fáze Wankelova motoru (KKM) [6]	8
Obrázek 9 - 2. Pracovní fáze Wankelova motoru (KKM) [6]	8
Obrázek 10 - 3. Pracovní fáze Wankelova motoru (KKM) [6]	9
Obrázek 11 - 4. Pracovní fáze Wankelova motoru (KKM) [6]	9
Obrázek 12 - Částečný řez vozidlem NSU Spider [28]	10
Obrázek 13 - Motor vozu NSU Spider [28]	11
Obrázek 14 - NSU Ro80 [31]	12
Obrázek 15 - Dvourotorový Wankel vozu NSU Ro80 [4]	13
Obrázek 16 - Citroën GS Birotor [18]	13
Obrázek 17 - Comotor 624 (Motor Citroënu GS Birotor) [3]	14
Obrázek 18 - Mazda Cosmo Sport [19]	15
Obrázek 19 - Motor L10A s převodovkou (první série Mazdy Cosmo Sport) [21]	16
Obrázek 20 – Srovnání tvaru pracovní komory pístového motoru a Wankelova motoru [3]	18
Obrázek 21 - Teplotní schéma Wankelova motoru [4]	21
Obrázek 22 - Schéma rotačního motoru RENESIS Hydrogen RE [4]	25
Obrázek 23 - Příčný řez vozem Mazda RX-8 Hydrogen RE [4]	27