VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

LETADLOVÉ HVĚZDICOVÉ MOTORY
RADIAL CYLINDER AIRCRAFT ENGINES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR´S THESIS

AUTOR PRÁCE — PETR ŠIMÍČEK
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. LUBOMÍR DRÁPAL
SUPERVISOR

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Petr Šimíček

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

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

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

Letadlové hvězdicové motory

v anglickém jazyce:

Radial cylinder aircraft engines

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pojednání o konstrukci pístových leteckých pohonných jednotek s válci uspořádanými do hvězdice, popis specifik, jejich vývoj v historickém kontextu a celkové zhodnocení.

Cíle bakalářské práce:

Uveďte obecně požadavky kladené na pístové letecké motory. Dále zmapujte v historickém přehledu vývoj motorů hvězdicových, jejich konstrukční řešení, technické parametry a porovnejte s výkonnostně srovnatelnou konkurencí s jiným uspořádáním válců. Popište soudobé konstrukce a nastiňte další možný vývoj v této oblasti. V závěru vše celkově zhodnoťte.

Seznam odborné literatury:

[1] KOCÁB, J., ADAMEC, J. Letadlové motory. KANT, První vydání, Praha, 2000. ISBN 80-902914-0-6.
[2] MASLENNIKOV, M. M., RAPIPORT, M. S. Letadlové pístové motory Díl 1. Praha, 1955.
[3] MASLENNIKOV, M. M., RAPIPORT, M. S. Letadlové pístové motory Díl 2. Praha, 1955.
[4] KOŠŤÁL, J., SUK, B. Pístové spalovací motory. Nakladatelství Československé akademie věd, První vydání, Praha, 1963.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Lubomír Drápal

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 19.11.2013

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
L.S.
DĚKANÁT

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na konstrukční řešení letadlových hvězdicových motorů. Úvod je pojednáním o historii letadlových hvězdicových motorů a jejich vývoji v historickém kontextu. Druhá část je zaměřena na konstrukci letadlových hvězdicových motorů, následně jsou uvedena některá zajímavá konstrukční řešení a porovnání s motorem jiného druhu konstrukce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Hvězdicový motor, rotační motor, klikový hřídel, rozvody, výkon, přeplňování, historie, vačkový kotouč, Světová válka.

ABSTRACT

The bachelor's thesis is focused on design of aircraft radial engines. Home is a treatise on the history of aircraft radial engines and their development in historical context. The second part is focused on the construction of radial engines of aircraft, then are some interesting construction solutions and compared with the engine of another type of construction.

KEYWORDS

Radial engine, rotary engine, crankshaft, distribution of engine, performance, supercharging, history, cam disc, world war.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠIMÍČEK, P. *Letadlové hvězdicové motory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 72 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Lubomír Drápal.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Lubomíra Drápala a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 29. května 2014 ……..……..

Jméno a přímení

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Lubomíru Drápalovi za jeho odborné vedení a rady při tvorbě této práce. Dále bych rád poděkoval firmě Verner Motor za poskytnuté informace a za svolení k použití fotografické dokumentace jejich motoru. A také děkuji svým rodičům za podporu po dobu mého studia.

OBSAH

Úvod 10
1 Historický vývoj letadlového hvězdicového motoru 11
2 Požadavky na letadlové pístové motory 16
2.1 Výkon 16
2.2 Výškovost motorů 17
2.3 Hmotnost motoru 17
2.4 Hospodárnost motorů 17
2.5 Rozměry 17
2.6 Provozní spolehlivost 18
2.7 Vyvážení 18
2.8 Provoz a obsluha 18
2.9 Výrobní možnosti 18
3 Konstrukce letadlového hvězdicového motoru 19
3.1 Definice letadlového hvězdicového motoru 19
3.2 Klikový mechanismus 19
3.2.1 Kinematika klikového mechanismu 20
3.2.2 Síly působící na klikový mechanismus 22
3.2.3 Síly v ose válce 23
3.2.4 Síly působící v ose ojnice a na stěnu válce 23
3.2.5 Síly působící na klikový čep 24
3.2.6 Zapalování válců hvězdicového motoru 24
3.2.7 Vyvažování hvězdicových motorů 26
3.3 Hlavní části klikového mechanismu 27
3.3.1 Píst 27
3.3.2 Ojnice 29
3.3.3 Klikový hřídel 31
3.4 Válce a hlavy válců 32
3.5 Klikové skříně 33
3.6 Rozvody 34
3.6.1 Ventilový rozvod 34
3.6.2 Šoupátkový rozvod 37
3.7 Reduktory 38
3.7.1 Druhy reduktorů 38
3.7.2 Reduktory hvězdicových motorů 39
3.8 Přeplňování hvězdicových motorů 39

3.8.1 Mechanicky hnaný kompresor 40
3.8.2 Turbokompresor 41
3.9 Mazací soustavy motoru 41
3.9.1 Vnitřní mazací soustava 41
3.9.2 Vnější mazací soustava 42
3.10 Chlazení 43
3.10.1 Chlazení kapalinou 44
3.10.2 Chlazení vzduchem 45
4 Příklady konstrukce hvězdicových motorů 47
4.1 Le Rhone 9 47
4.2 Walter K-14 49
4.3 Packard Diesel 50
4.4 Bristol Perseus 52
4.5 Švecov AŠ-82 54
5 Porovnání hvězdicového motoru s motorem s jiným uspořádáním válců 56
5.1 Focke-Wulf Fw 190 56
5.1.1 BMW 801 57
5.2 Supermarine Spitfire 59
5.2.1 Rolls-Royce Merlin 61 60
5.3 Porovnání 62
5.4 Zhodnocení 62
6 Využití letadlového hvězdicového motoru v 21. Století 63
Závěr 65
Seznam použitých zkratek a symbolů 70
Seznam příloh 72

ÚVOD

Letadlové hvězdicové motory jsou neodmyslitelnou součástí historie letectví, kam se zapsaly díky své zajímavé konstrukci a širokému využití, hlavně v letounech 2. Světové války. Dnes jsou hvězdicové motory jen vzpomínkou minulosti, která byla v poválečném období překonána modernějšími konstrukcemi pohonů letadel. I přes tuto skutečnost si tento konstrukčně zajímavý unikát zaslouží pozornost.

Hvězdicový motor byl jedním z několika konstrukčních řešení letadlových pístových motorů. První hvězdicové motory byly zkonstruovány na počátku 20. století. Využití těchto motorů bylo velice široké, sloužily jako pohonná jednotka mnoha bojových letounů 2. Světové války, například Boeing B-17 nebo Focke Wulf Fw-190 a své využití měly i po skončení 2. Světové války.

Na hvězdicové motory byly kladeny stejné požadavky, jako na ostatní typy letadlových pístových motorů. Ovšem konstrukční řešení jednotlivých dílů motoru bylo upraveno podle požadavků hvězdicových motorů. Samotná konstrukce byla na pohled velice robustní v porovnání s motory řadovými nebo s motory do V. Hvězdicový motor měl své výhody, ovšem i nevýhody, které komplikovaly jeho použití. Nakonec však našel své uplatnění a dokázal v jistých směrech překonat i motory řadové.

V dnešní době, kdy pro pohon letounů slouží proudové nebo turbovrtulové motory, se s hvězdicovými motory setkáme jen opravdu výjimečně. Ale v dobách jejich největší slávy se jednalo o kvalitní a spolehlivou pohonnou jednotku.

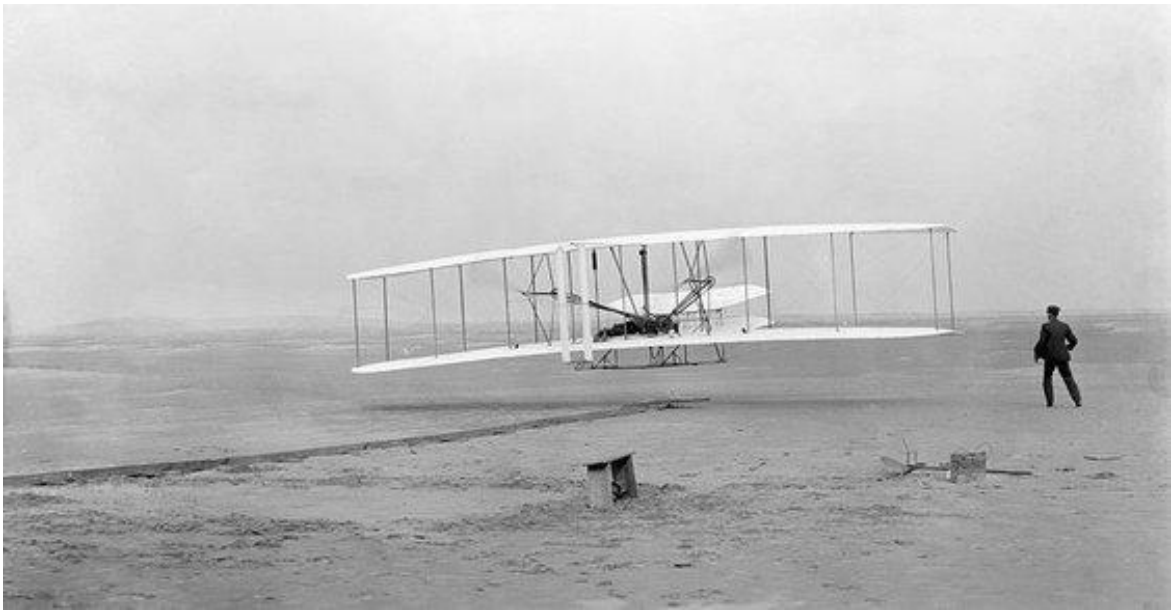
1 HISTORICKÝ VÝVOJ LETADLOVÉHO HVĚZDICOVÉHO MOTORU

Z historie a mýtů je známo mnoho příkladů, kdy se člověk pokusil dobýt vzdušný prostor, například mýtus o Daidalovi a Ikarovi ukazuje pokus o napodobení ptáků. Další a nepříliš zdařilé pokusy o létání jsou zmíněny i v jiných kulturách. Až renesanční umělec Leonardo da Vinci se svým návrhem Ornitoptéry ukázal, že dobytí vzduchu je v lidských silách.

Postupem času bylo vynalezeno mnoho druhů balonů a kluzáků, které ovšem nebylo možné příliš ovládat. První let řiditelné vzducholodi uskutečnil v roce 1852 Francouz Henri Giffard, který k pohonu své vzducholodi zkonstruoval parní stroj o výkonu 2,2 kW a váze 150 kg.

Dalším milníkem v dobývání nebes byl první let letounu těžšího než vzduch. Ten uskutečnil Rus Alexander Fedorovič Možajskij v roce 1882. V roce 1882 byly spalovací motory příliš rozměrné a těžké, proto se Možajskij rozhodl pro pohon použít dva parní stroje o výkonech 14,7 kW a 7,4 kW. Parního stroje využil v 1890 i Francouzský inženýr Clement Ader pro vzlet letadla Eole 1.

Na přelomu 19. a 20. století dochází k rychlému rozvoji automobilního průmyslu a tedy i k zdokonalení pístových spalovacích motorů. Toho využili v roce 1903 bratři Orville a Wilbur Wrightové, kteří dne 3. 12. uskutečnili první let letounu těžšího než vzduch a poháněného spalovacím motorem. Letoun Flyer byl poháněn řadovým vodou chlazeným čtyřválcem o výkonu 8,8 kW a hmotnosti 110 kg.



Obr. 1 Letoun bratří Wrightů Flyer I [26]

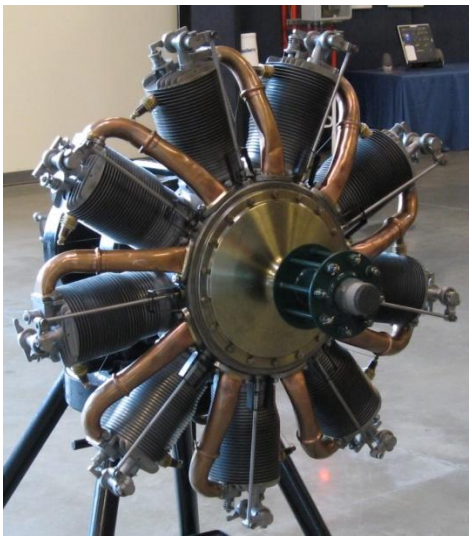
V období po tomto zlomovém historickém okamžiku dochází ke vzniku mnoha motorů s různým uspořádáním válců chlazených vodou nebo vzduchem. Řadové motory dostávají větší počet válců, vznikají motory s uspořádáním válců do V a motory hvězdicové.

Prvním typem letadlového hvězdicového motoru byl motor rotační. Jednalo se o motor s válci uspořádanými do hvězdice kolem klikové hřídele. Rotační pohyb vykonávaly válce kolem nepohyblivé klikové hřídele. Hvězdicové motory, u kterých rotační pohyb vykonávala kliková hřídel, se začaly ve větší míře využívat v meziválečném období.

V období před 1. Světovou válkou, byly hvězdicové motory vyráběny z větší části Francouzskou společností „Gnôme“ (později firma „Gnôme-Rhône”). Roku 1912 byl vyráběn sedmiválcový rotační motor „Gnôme“ o výkonu 60 koní při 1200 min^{-1}. Od roku 1914 byly vyráběny další dva typy motorů. Prvním byl pětiválcový rotační motor „Rhôme-80“ o výkonu 80 koní, a druhý byl devítiválcový rotační motor „Monosoupape 100“ s výkonem 100 koní.

Dalším státem, který se zajímal o výrobu hvězdicových motorů, bylo Rusko. V roce 1909 konstruktér A. G. Ufimcev vynalezl hvězdicový motor birotativního typu, u něhož se válce a hřídel otáčejí v opačném směru. Motor měl výkon 90 kW při 1200 min^{-1}. Vznikaly i další motory, například F. G. Kalep vytvořil motor „Kalep“ K-80 – jednalo se o rotační hvězdicový motor se sedmi válci o výkonu 80 koní. Díky použití hliníku byl motor o 15 kilo lehčí než sedmiválcový motor „Gnôme“.

Se začátkem 1. Světové války dochází k nárůstu výroby hvězdicových motorů. Jednalo se hlavně o motory rotační. Francouzská firma „Rhône” vyvinula rotační motor Le – Rhône 9J. Jednalo se o devítiválcový vzduchem chlazený motor o výkonu 110 koní. Tento motor byl použit v několika typech stíhacích letounů 1. Světové války (Nieuport 17, Nieuport 27, Avro 507, atd.). Německá firma Oberursel Motoren vyráběla kopie motoru Le-Rhône 9J pod označením Oberursel Ur.II. Tento motor byl použit ve stíhacím letounu Fokker Dr.I, na kterém létal Manfred von Richthofen, známější pod přezdívkou Rudý baron. Další Francouzská strojírenská firma Cleret založena v roce 1913 vyráběla motory, které poháněly celou řadu letounů Trojdohody. Cleret 9B byl vzduchem chlazený rotační devítiválec o výkonu 130 koní.

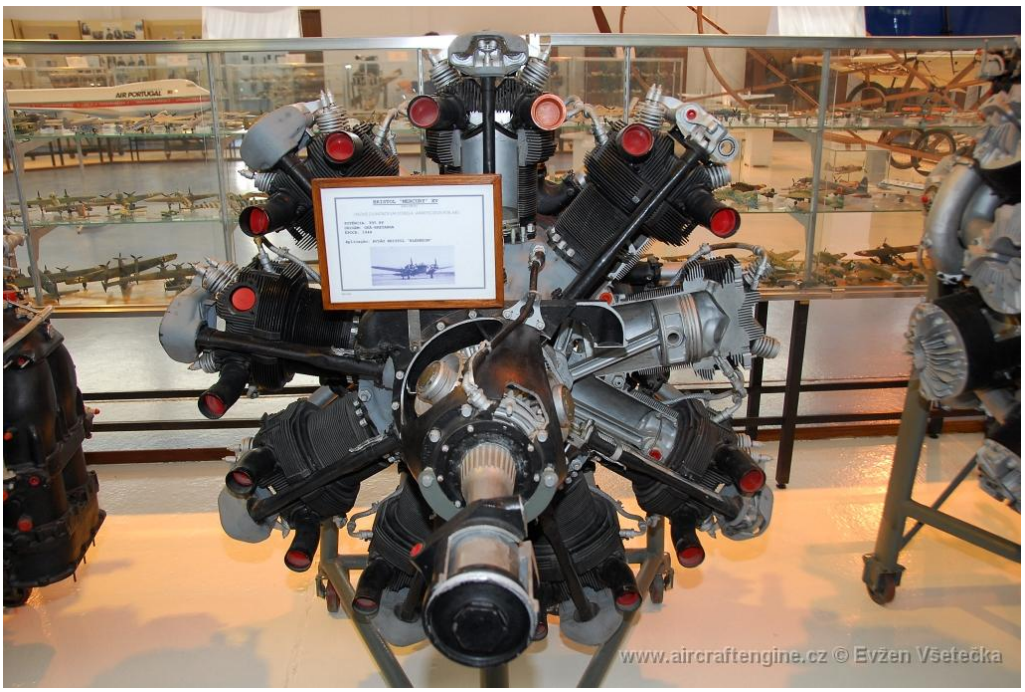


Obr. 2 Motor Le-Rhone 9 [27]

V meziválečném období se upouští od používání rotačních motorů a začínají se vyvíjet a používat motory s pohyblivou klikovou hřídelí. Motory měly vyšší výkon, delší životnost, lepší spolehlivost a výrazně zlepšily letové vlastnosti letounů. Pro vyšší výkon se začaly konstruovat motory s větším počtem hvězdic, které byly uspořádány v radě za sebou. Jako další prvek pro zvýšení výkonu se používalo přeplňování pomocí kompresoru a díky zvýšenému plnícímu tlaku mohla letadla létat ve vyšších výškách. Letadlové hvězdicové motory se licenčně vyráběly po celém světě.

V Rusku se vyrábělo několik typů hvězdicových motorů, například sedmiválcový hvězdicový motor M-26, dále devítiválcový hvězdicový motor M-15, nebo několikařadový hvězdicový motor M-20 zkonstruovaný A.A. Mikulinem v roce 1926.

Britský motor Bristol Jupiter byl devítiválcový vzduchem chlazený hvězdicový motor vyrobený v roce 1918. Vyráběl se v několika verzích a licenčně se vyráběl v mnoha zemích. Dosahoval výkonu až 580 koní. V roce 1925 byl motor Jupiter nahrazen novým výkonějším motorem Bristol Mercury. Mercury dosahoval výkonu až 870 koní. Tento motor našel uplatnění v mnoha letounech 2. Světové války.

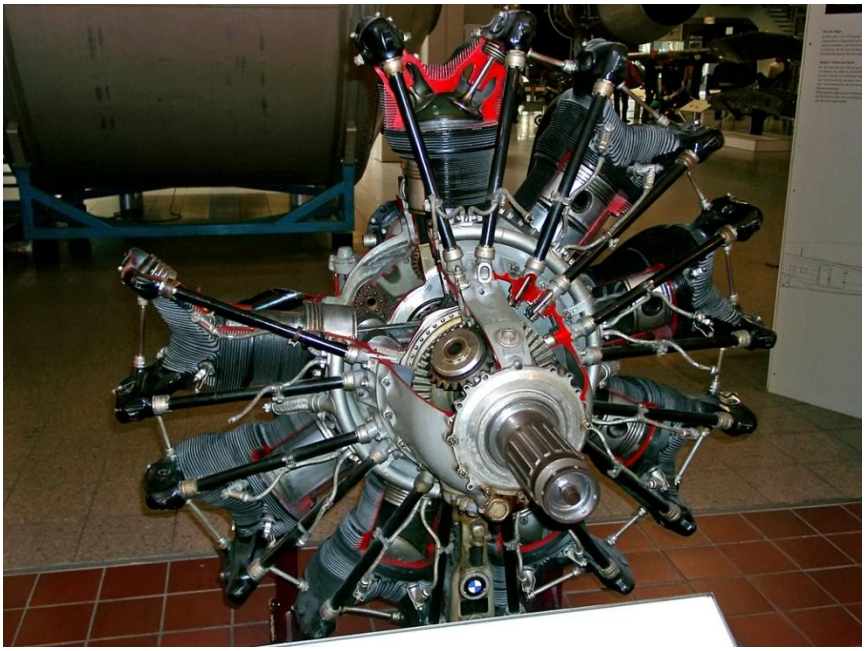


Obr. 3 Britský motor Bristol Mercury [28]

Vývoj probíhal také u Francouzských leteckých firem. Firma „Gnôme-Rhône“ vyvinula dvouřadový čtrnáctiválcový hvězdicový motor Rhône 14. Ten našel uplatnění v několika Francouzských a Německých letounech 2. Světové války.

S příchodem druhé světové války dochází k masivnímu rozvoji hvězdicových motorů. Rychlost zbrojení vyžadovala rychlý vývoj letadlových motorů. Letecké firmy vyvíjely nové typy hvězdicových motorů, které dále zdokonalovaly. Firma BMW patřila v období 2.

Světové války k největším Německým výrobcům hvězdicových motorů. Motoru BMW 801 bylo vyrobeno 61 000 kusů a byl to druhý nejvíce vyráběný letadlový motor v nacistickém Německu. Dalším typem byl motor BMW 132, jednalo se o devítiválcový hvězdicový vzduchem chlazený motor.



Obr. 4 Motor BMW 132 [29]

Ve Spojených státech Amerických bylo několik firem, které se zabývaly vývojem a výrobou hvězdicových motorů. Například firma Curtis vyráběla přeplňovaný devítiválcový hvězdicový motor Wright Cyclone, který se licenčně vyráběl i v Rusku. Tento motor byl použit v bombardovacím letounu B-17 Flying Fortress.

Obr. 5 Boeing B-17 Flying Fortress využívající motor Wright Cyclone [30]

Další Americkou firmou vyvíjející hvězdicové motory byla firma Pratt and Whitney. Vyráběla několik typů hvězdicových motorů, které si našly uplatnění v Amerických stíhacích letounech.

Obr. 6 Letoun Vought F4U Corasir využívající motor Pratt and Whitney R-2800 [31]

V Rusku se licenčně vyrábělo několik typů amerických motorů. Od těchto motorů následně Ruští inženýři odvodili své vlastní hvězdicové motory.

Po skončení 2. světové války začaly hvězdicové motory pomalu ustupovat pokroku v podobě proudových a turbovrtulových motorů. V dnešní době mají hvězdicové motory své uplatnění například v modelářství, kde jsou s oblibou používány, dále se používají v replikách bojových letounů z 1. Světové války, nebo v ultra lehkých letounech. [1] [2] [3] [4] [8] [11]

2 POŽADAVKY NA LETADLOVÉ PÍSTOVÉ MOTORY

Podle odborné literatury od autorů Maslennikova a Adamce jsou hlavní požadavky na letadlové pístové motory tyto: [1] [3]

- dostatečný výkon,
- výškovost (jmenovitá výška) podle účelu letounu,
- nízká hmotnost motoru,
- co největší hospodárnost motoru,
- malé rozměry,
- provozní spolehlivost při dostatečně dlouhé životnosti,
- vyvážení,
- snadný provoz a obsluha,
- výrobní možnosti.

2.1 VÝKON

Základní letové charakteristiky jako rychlost, stoupavost, obratnost a užitečné zatížení jsou ovlivněny výkonem motoru. Motory s vyšším výkonem dodávají letounům vyšší rychlost, lepší stoupavost, letouny mohou nést vyšší zátěž a tak dále.

Výkon motoru lze zvýšit dvěma způsoby – zvětšením zdvihového objemu, nebo zvětšením litrového výkonu, což znamená zvýšit výkon motoru připadající na jeden litr zdvihového objemu jeho válců.

Objem válců lze zvětšit, buď zvětšením rozměrů válce při nezměněném počtu válců, nebo zvětšením počtu válců. Zvětšování rozměrů má své meze. Při zbytečně velkých rozměrech válce dochází k nárůstu tepelného namáhání a zvětšení měrné váhy motoru. Zvýšení počtu válců je nejjednodušším způsobem jak zvýšit výkon motoru, ovšem při větším počtu válců vzniká složitost konstrukce celého motoru.

Nejvhodnější způsob zvětšení výkonu je zvýšení litrového výkonu. Litrový výkon je úměrný počtu otáček motoru a střednímu efektivnímu tlaku. Zvyšováním maximálních otáček dochází ke snížení životnosti a spolehlivosti motoru, což je nežádoucí. Proto se jeví jako nejvýhodnější možnost zvýšení středního efektivního tlaku. Zvýšení středního efektivního tlaku se nejsnáze dosáhne pomocí přeplňování, a to pomocí kompresoru nebo turbokompresoru. [1] [3]

2.2 VÝŠKOVOST MOTORŮ

Výškovostí se rozumí jmenovitá výška, do které může letoun vystoupat. Podle výškovosti lze pístové motory rozdělit do tří skupin:

a) motory malé výškovosti, dostup asi 3000 metrů,

b) motory střední výškovosti, dostup 5000 až 6000 metrů,

c) motory velké výškovosti, dostup nad 6000 metrů.

2.3 HMOTNOST MOTORU

Hmotnost motorové jednotky je součtem hmotnosti motoru, hmotnosti motorové instalace a hmotnosti paliva a oleje. Motorovou instalací jsou myšleny nezbytné součásti sloužící k bezpečnému chodu motoru, jako například palivové a olejové nádrže, olejové a vodní chladiče atd. Celková hmotnost motorové jednotky je potom vyjádřena jako součet všech těchto prvků.

Snížení hmotnosti letové jednotky má vliv na letové vlastnosti letounu, na rychlost, dolet, zatížení atd. Snížení letové hmotnosti lze dosáhnout snížením hmotnosti motoru, motorové instalace a snížením spotřeby paliva a oleje. [1] [3] [4]

2.4 HOSPODÁRNOST MOTORŮ

Měrná spotřeba je důležitým kritériem při hodnocení motoru. Spotřeba paliva výrazně ovlivňuje dobu letu, což je důležité pro všechny typy letadel. Při nižší spotřebě a stejné velkosti palivových nádrží je letoun schopen delší doby letu. Dlouhý dolet byl jedním z důležitých kritérií hodnocení letounu.

Celková efektivní měrná spotřeba paliva závisí na indikované a mechanické účinnosti, na výhřevnosti paliva a stupni využití energie výfukových plynů. Zlepšení indikované účinnosti lez dosáhnout zvětšením kompresního poměru a použitím chudší směsi paliva. Mechanická účinnost je určena hlavně ztrátovým výkonem. Do ztrátového výkonu je zahrnován výkon potřebný pro překonání tření a výkon pro pohon pomocných zařízení např. rozvodový mechanismus, zařízení chladicího a mazacího systému. [1] [3] [4]

2.5 ROZMĚRY

Motor a celá motorová instalace vyvozují aerodynamický odpor, na jehož překonání se spotřebuje část výkonu motoru. Aby byl aerodynamický odpor co nejmenší, tak byly motory umístěny za krytem. To ovšem vyvolávalo problém u hvězdicových motorů, které byly z velké části chlazeny vzduchem a krytování bránilo proudění vzduchu. Hvězdicové motory měly průměr 1250 až 1500 mm, což odpovídalo ploše 1,2 až 1,7 m^2. Hvězdicové motory sice měly velký odpor, ale zároveň byly kratší, než motory řadové nebo motory s válci do V.

Nadměrná délka motoru ovlivňovala ovladatelnost letounu, což byl rozhodující faktor pro stíhací letouny. [1] [3]

2.6 PROVOZNÍ SPOLEHLIVOST

Spolehlivost motoru je způsobilost pracovat bez přerušení běhu z důvodu závady bez toho, aby klesl výkon, nebo se zvýšila spotřeba paliva a oleje. Spolehlivost je základní podmínkou bezpečnosti létání. Spolehlivost motoru je určena těmito faktory: [1] [2] [3] [4]

a) použití materiálů pokud možno s dokonalými mechanickými vlastnosti – mechanické vlastnosti jsou ovlivněny chemickým složením a tepelným zpracováním,

b) přesnou výrobou jednotlivých součástí a dodržení předepsaných rozměrů a tolerancí,

c) precizní montáží celého motoru,

d) kontrolami jakosti materiálů a kontrolami dodržování technologického postupu,

e) zkouškami motoru za pracovních podmínek.

2.7 VYVÁŽENÍ

Správné vyvážení motoru ovlivňuje celkové chování letounu za letu (viz. kapitola Konstrukce hvězdicových motorů). [1] [3]

2.8 PROVOZ A OBSLUHA

Letecký motor by měl být konstrukčně, pokud je to možné, co nejjednodušší. Měl by se snadno spouštět, při pravidelné údržbě by měly být hlavní části co nejpřístupnější a při práci s motorem by se mělo dát použít více druhů paliv a olejů a v neposlední řadě by měl být motor snadno smontovatelný a rozmontovatelný. [1] [3]

2.9 VÝROBNÍ MOŽNOSTI

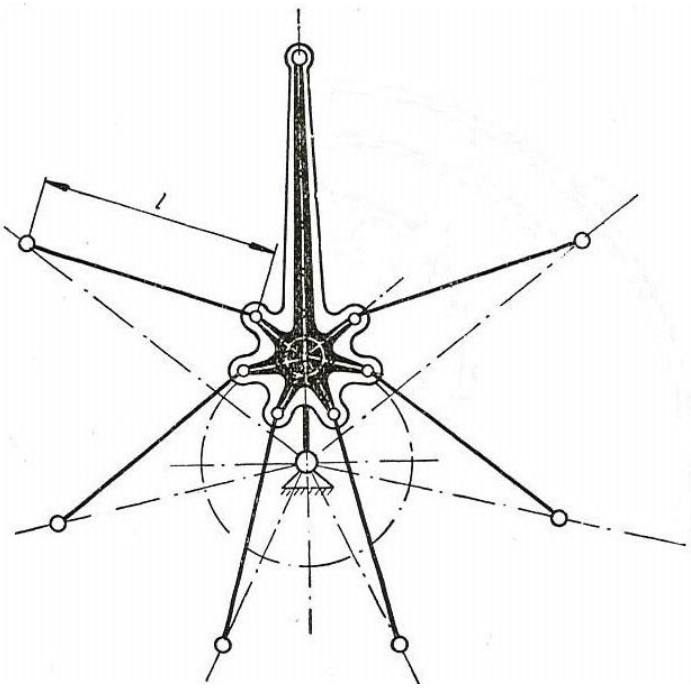
Při návrhu a konstrukci motoru se přihlíží k mnoha podmínkám a požadavkům, mezi něž patří například použití vhodných materiálů, které odpovídají daným podmínkám práce motoru, a také co nejjednodušší tvary jednotlivých součástí z hlediska výroby. [1] [2] [3] [4]

3 KONSTRUKCE LETADLOVÉHO HVĚZDICOVÉHO MOTORU

Konstrukce hvězdicového motoru vychází ze stejných principů jako konstrukce motorů řadových nebo s válci do V. Princip všech těchto motorů je stejný, avšak konstrukce každého z nich je odlišná. Rozdíly najdeme v konstrukčních řešeních jednotlivých dílů, dále v použití motoru a ve výhodách a nevýhodách jednotlivých typů. V následující kapitole je nastíněna konstrukce jednotlivých dílů hvězdicového motoru.

3.1 DEFINICE LETADLOVÉHO HVĚZDICOVÉHO MOTORU

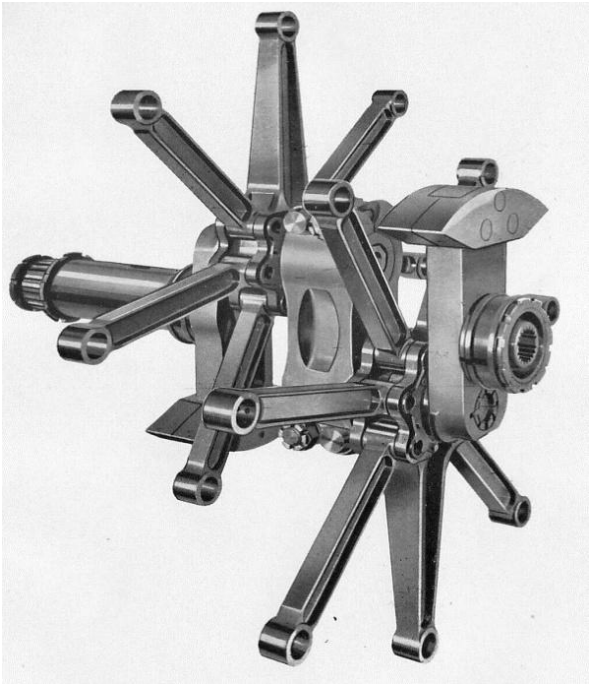
Hvězdicový motor je koncipován jako pístový spalovací motor s uspořádáním válců v kruhu kolem klikové hřídele. Jedná se o tepelný stroj, který mění teplo vzniklé hořením paliva na mechanickou práci. Za hvězdicový motor lez považovat motor, který má kolem klikové hřídele v kruhu uspořádány alespoň tři válce. Válce leží v jedné rovině, která je kolmá na osu klikové hřídele, a válce mezi sebou svírají stejný úhel. [1] [2] [3] [13]



Obr. 7 Schéma uspořádání hvězdicového motoru [3]

3.2 KLIKOVÝ MECHANISMUS

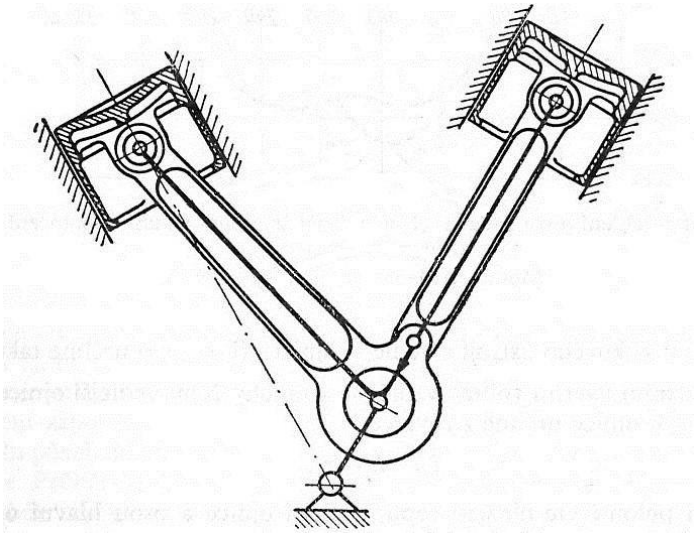
Klikový mechanismu je hlavní součástí každého pístového motoru. Jeho úkolem je měnit tepelnou energii vzniklou hořením paliva na energii mechanickou. Přímočarý pohyb pístu je převáděn na rotační pohyb klikového hřídele. Celý klikový mechanismu se skládá z pístu, ojnice a klikového hřídele. [1] [3] [4]



Obr. 8 klikový mechanismus dvouhvězdicového motoru [7]

3.2.1 KINEMATIKA KLIKOVÉHO MECHANISMU

Dále uvedené rovnice kinematických veličin platí pro centrický klikový mechanismus. U hvězdicových motorů se používá rovnic pro klikový mechanismus s vedlejší ojnicí.



Obr. 9 Schéma klikového mechanismu s vedlejší ojnicí [3]

Kinematika klikového mechanismu je řešena při stálých otáčkách klikového hřídele, to znamená při stálých pracovních podmínkách.

U rovnoměrného pohybu klikového hřídele je úhel natočení úměrný době, proto se dráha, rychlost a zrychlení pístu vyjadřují v závislosti na úhlu natočení klikového hřídele. Závislost pootočení na čase je vyjádřena z rovnice pro čas

$$t = \frac{\alpha}{\frac{360n}{60}} = \frac{\alpha}{6n} \text{ [s]}, \tag{1}$$

z této rovnice je vyjádřen úhel natočení klikového hřídele

$$\alpha = 6nt \text{ [°]}, \tag{2}$$

kde α je úhel pootočení kliky ve stupních, a n jsou otáčky klikového hřídele za minutu.

Za výchozí polohu, odkud je měřen úhel natočení a dráha pístu, považujeme okamžik, kdy je píst v horní úvrati.

Úhlová rychlost při rovnoměrném otáčení je stálá a vypočte se

$$\omega = \frac{\pi n}{30} \text{ [s}^{-1}\text{]}. \tag{3}$$

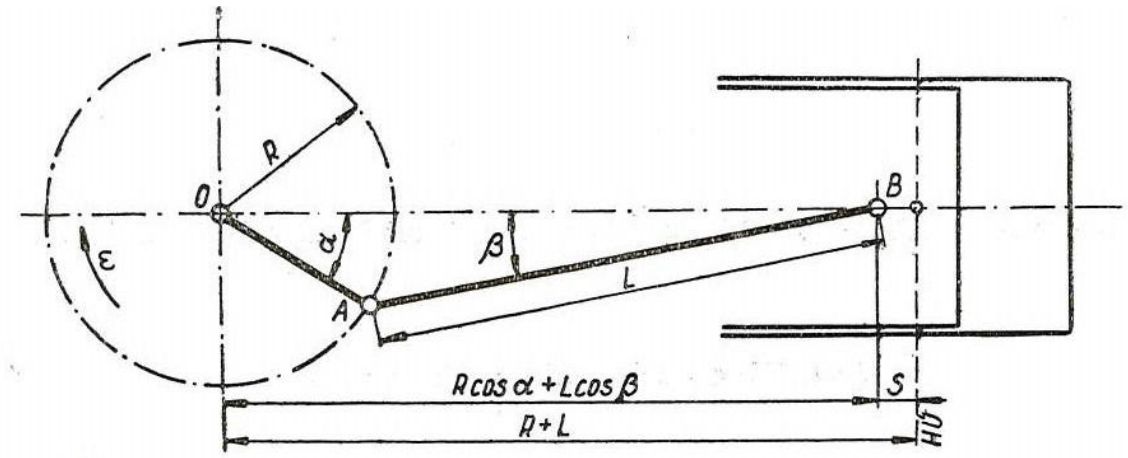
Z úhlové rychlosti je poté vyjádřena obvodová rychlost a obvodové zrychlení ojničního čepu.

Obvodová rychlost:

$$v_0 = \omega R \text{ [ms}^{-1}\text{]}, \tag{4}$$

Obvodové zrychlení:

$$a_d = R\omega^2 \text{ [ms}^{-2}\text{]}. \tag{5}$$



Obr. 10 Schéma centrického klikového mechanismu [3]

Dráha pístu v závislosti na úhlu natočení klikového hřídele je vypočtena ze vztahu:

$$s = L + R - (L\cos\beta + R\cos\alpha)\,[\mathrm{m}], \tag{6}$$

upravením tohoto vztahu a po rozvoji do binomického rozvoje vznikne vztah:

$$s = R\left[(1-\cos\alpha) + \frac{1}{4}\lambda(1-\cos 2\alpha)\right][\mathrm{m}], \tag{7}$$

kde R je délka ramene kliky a λ je klikový poměr, pro který platí vztah:

$$\lambda = \frac{R}{L}, \tag{8}$$

kde L je délka ojnice.

Rychlost pístu je změna dráhy pístu v závislosti na čase a určí se jako:

$$v = R\omega(\sin\alpha + \frac{1}{2}\lambda\sin 2\alpha)\,[\mathrm{ms^{-1}}]. \tag{9}$$

Poslední a neméně důležitou kinematickou veličinou je zrychlení pístu. Zrychlení vyjadřuje změnu rychlosti pístu v závislosti na čase a vypočítá se ze vzorce:

$$a = R\omega^2(\cos\alpha + \lambda\cos 2\alpha)\,[\mathrm{ms^{-2}}]. \tag{10}$$

[1] [3] [4]

3.2.2 SÍLY PŮSOBÍCÍ NA KLIKOVÝ MECHANISMUS

Při chodu motoru jsou v klikovém mechanismu rozlišovány dva druhy sil:

A) SETRVAČNÉ SÍLY POHYBUJÍCÍCH SE ČÁSTÍ

Setrvačné síly vznikají jako následek zrychlení jednotlivých částí klikového mechanismu. Rozdělují se na dvě skupiny.

a) Setrvačné síly vyvolané hmotností součástí pohybujících se přímočaře

Tyto síly jsou vyvolány přímočarým pohybem pístu, pístního čepu a části ojnice. Určí se z výpočtu:

$$F_S = m_p R\omega^2(\cos\alpha + \lambda\cos 2\alpha)\,[\mathrm{N}], \tag{11}$$

kde m_p je celková hmotnost přímočaře se pohybujících částí.

b) Setrvačné síly vyvolané hmotností součástí konajících rotační pohyb

Rotační pohyb v klikovém mechanismu koná kliková hřídel a část ojnice. Výsledná setrvačná síla rotujících částí má vzorec:

$$F_r = m_r R\omega^2 \text{ [N]}, \tag{12}$$

kde m_r je celková hmotnost součástí konajících rotační pohyb.

B) SÍLY VYVOLANÉ TLAKEM PLYNU NA PÍST

Pro určení síly působící na píst je použita základní rovnice pro určení tlaku:

$$p = \frac{F}{S} \text{ [Pa]}, \tag{13}$$

jednouchou úpravou je vypočtena výsledná síla působící na píst:

$$F = pS = \frac{\pi D^2}{4}(p - p_0) \text{ [N]}, \tag{14}$$

kde p je tlak působící na píst, p_0 je tlak působící na vnitřní stranu dna pístu (tlak vnějšího prostředí ve výpočtové výšce), a S je plocha pístu.

Výše uvedené síly působí v klikovém mechanismu, ale při chodu motoru jsou silově zatěžovány i další součásti motoru. [1] [2] [3] [4]

3.2.3 SÍLY V OSE VÁLCE

V ose válce působí setrvačná síla posuvně se pohybujících hmotností Fs a síla vyvolaná tlakem na píst F. Tyto síly jsou periodicky proměnné s periodou dvou otáček klikového hřídele. Součtem těchto sil dostaneme sílu výslednou: [1] [3]

$$F_\Sigma = F_S + F\,. \tag{15}$$

3.2.4 SÍLY PŮSOBÍCÍ V OSE OJNICE A NA STĚNU VÁLCE

K tomu, aby bylo možné vypočítat síly působící v ose ojnice a síly působící na stěnu válce, musí být proveden rozklad výsledné síly F_Σ. Výsledná síla je rozložena na normálovou složku N, která vyvozuje tření mezi pístem a válcem, a na složku K, která působí v ose ojnice. Obě síly lze vypočítat z těchto vzorců:

$$N = F_\Sigma tg\beta\,, \tag{16}$$

$$K = \frac{F_\Sigma}{\cos\beta}\,. \tag{17}$$

3.2.5 SÍLY PŮSOBÍCÍ NA KLIKOVÝ ČEP

V ose ojnice působí síla K, která se přenáší na klikový čep. Pro určení sil na klikovém čepu se provede rozklad na normálovou složku Z a tangenciální složku T:

$$Z = K\cos(\alpha + \beta), \tag{18}$$

$$T = K\sin(\alpha + \beta). \tag{19}$$

Výsledná tangenciální síla vyvozuje krouticí moment:

$$M_K = TR \tag{20}$$

U hvězdicových motorů působí na klikový čep síly od několika válců. Jednotlivé složky normálových a tangenciálních sil je možné sčítat. Průběh sil ve válcích bude posunut v pořadí zapalování. K tomu, aby bylo možné síly sčítat, je nutné nejdříve pochopit systém zapalování válců hvězdicového motoru (viz. Zapalování válců hvězdicového motoru). Výsledná síla se určí jako součet tangenciálních sil působících na jednotlivé kliky. [1] [3] [4]

3.2.6 ZAPALOVÁNÍ VÁLCŮ HVĚZDICOVÉHO MOTORU

Při určování pořadí zapalování válců je třeba řídit se několika pravidly.

a) Za celou periodu, která se rovná 720 º, se musí vystřídat zážehy všech válců.

b) Zalomení klikového hřídele musí být uspořádáno tak, aby byly vyváženy odstředivé síly.

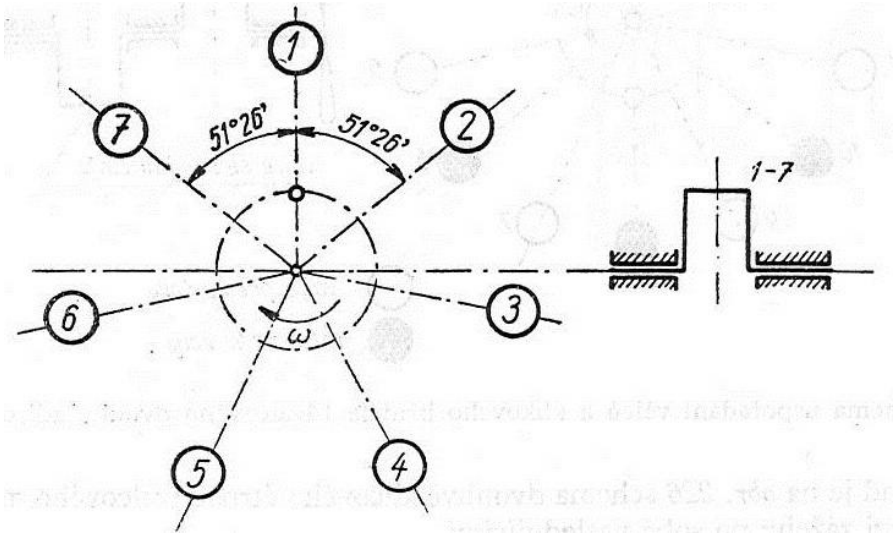
c) Pořadí zážehu u jedno hvězdicových motorů je voleno tak, aby za sebou jdoucí zážehy vznikaly ve válcích, co nejvzdálenějších. A u více hvězdicových motorů bylo pořadí zážehů voleno tak, aby zážehy nevznikaly ve válcích za sebou.

ZAPALOVÁNÍ JEDNOHVĚZDICOVÝCH MOTORŮ

Jednohvězdicové motory mají jedenkrát zalomený hřídel a válce rozloženy v radiálních paprscích. Pro pravidelnost běhu je důležité, aby zapalování probíhalo vždy ob jeden válec. Jako příklad lze použít sedmiválcový hvězdicový motor:

$$\gamma = \frac{720}{i} = \frac{720}{7} \approx 102^{\circ}52', \tag{21}$$

kde *i* je počet válců ve hvězdici.



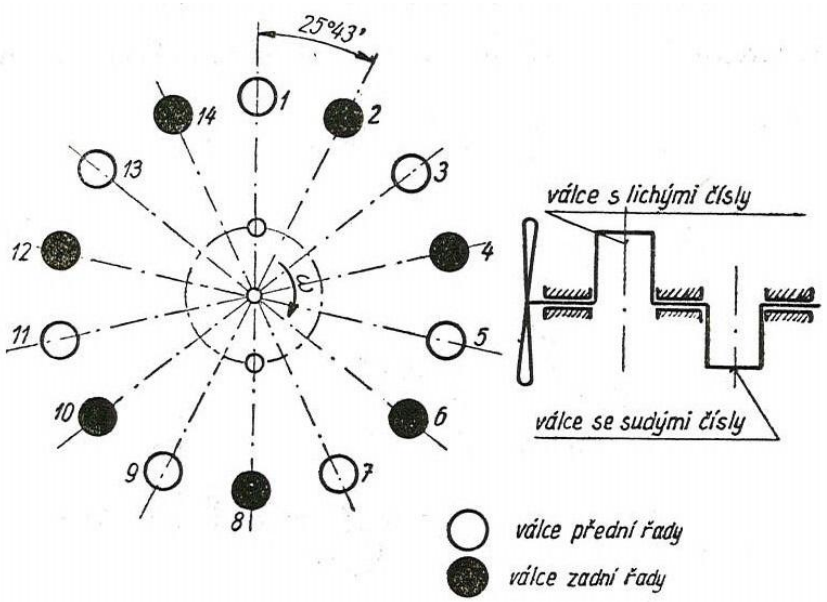
Obr. 11 Schéma uspořádání válců a klikové hřídele sedmiválcového hvězdicového motoru [3]

Pořadí zážehů tedy bude: 1-3-5-7-2-4-6.

Podmínka zapálení všech válců za jednu periodu bude splněna pouze u motoru s lichým počtem válců. Například u osmiválcového motoru budou zažehnuty všechny válce, ale zapálení proběhne s určitou nepravidelností.

ZAPALOVÁNÍ DVOUHVĚZDICOVÝCH MOTORŮ

Dvouhvězdicové motory mají dvakrát zalomený hřídel. Vzájemný úhel mezi zalomeními je 180º. Válce jsou uspořádány na paprscích dvou hvězd. Při pohledu na motor zepředu je vidět, že válce jedné hvězdy jsou mezi válci hvězdy druhé. Zážehy obou hvězd se pravidelně střídají.



Obr. 12 Schéma uspořádání válců a klikové hřídele čtrnáctiválcového dvouhvězdicového motoru [3]

Úhel mezi zážehy po sobě následujícími je tedy:

$$\gamma = \frac{720}{14} \approx 51°26´. \tag{22}$$

Pořadí zážehu pak probíhá v uvedeném sledu:

$$1 – 10 – 5 – 14 – 9 – 4 – 13 – 8 – 3 – 12 – 7 – 2 – 11 – 6.$$

U více hvězdicových motorů může být zapalování válců provedeno několika způsoby. Zapalování se liší podle konstrukčního řešení klikové hřídele, kdy se dá použít několika typů zalomení hřídele a tím ovlivnit pořadí zapalování válců. [3]

3.2.7 VYVAŽOVÁNÍ HVĚZDICOVÝCH MOTORŮ

Při práci motoru působí různé síly. Tyto síly lze nejjednodušeji rozdělit na síly vnější a vnitřní. Vnitřními silami se rozumí například síly od tlaku plynu, třecí síly atd. K vnějším silám patří síly, které způsobují pohyb motoru. Tyto síly jsou přenášeny na uložení motoru. Jsou to například síly setrvačné, síly od pohybu vrtule. Vnější síly proměnné, co do velikosti a směru, způsobují vibrace motoru a vedou k dynamickému nevyvážení. Vnější síly stálé např. hmotnost motoru jsou zachyceny uložením a neprojevují se škodlivě.

Hlavním zdrojem vibrací jsou setrvačné síly a setrvačné momenty. Tyto síly lze rozdělit do dvou skupin:

a) setrvačné síly rotujících částí,

b) setrvačné síly posuvných částí.

Vyvážení setrvačných sil a jejich momentů je možné provést dvěma způsoby:

a) vhodným zalomením klikového hřídele tak, aby se setrvačné síly vzájemně vyvažovaly,

b) použitím protizávaží, které vyvažují setrvačné síly.

Cílem dynamického vyvažování je vyrovnání účinku vnějších proměnných sil. Úplným vyvážením se rozumí vyvážení setrvačných sil rotujících hmot a setrvačných sil posuvně se pohybujících hmot.

U jednohvězdicových motorů výslednice všech setrvačných sil posuvně se pohybujících hmot působí vždy se směru kliky a co do velikosti je stálá. Tato setrvačná síla se dá snadno vyvážit pomocí protizávaží na prodloužených ramenech kliky.

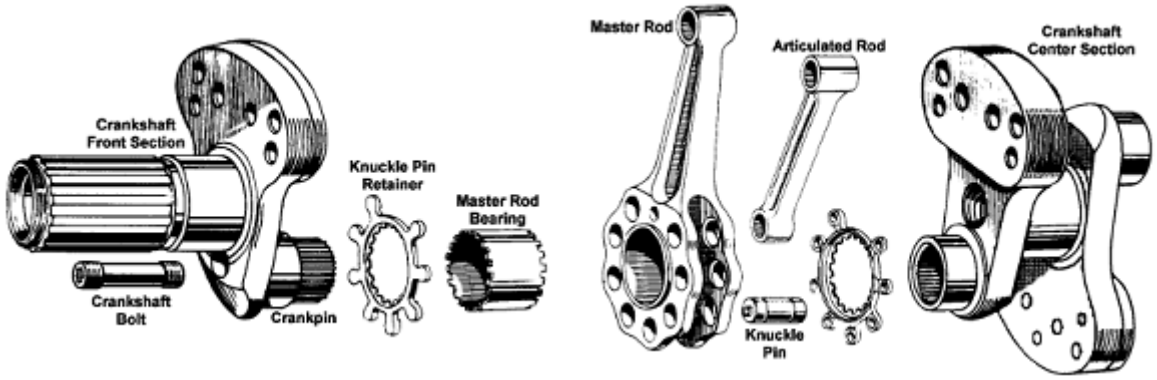
U dvouhvězdicových motorů je klikový hřídel vzájemně zalomen o 180º. Z toho vyplývá, že setrvačné síly působící na kliky jsou stejné, tudíž u tohoto motoru jsou hlavní setrvačné síly

vyváženy. Ovšem u tohoto motoru nejsou vyváženy momenty setrvačných sil. Vyvážení se provádí pomocí protizávaží umístěného v prodloužení krajních ramen klikového hřídele.

Čtyřhvězdicový motor lze považovat za systém čtyř jednohvězdicových motorů, nebo za systém několikařadových čtyřválcových motorů. Je-li setrvačná síla vyvážena ve hvězdě nebo v příslušném řadovém motoru, bude vyvážena i v celém čtyřhvězdicovém motoru.

K vyvážení setrvačných sil rotujících částí se používají protizávaží, která mají různá konstrukční provedení. [1] [3]

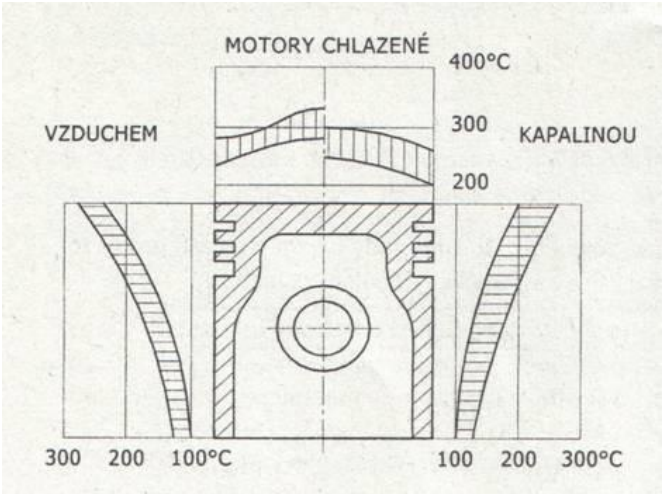
3.3 HLAVNÍ ČÁSTI KLIKOVÉHO MECHANISMU



Obr. 13 Schéma rozloženého klikového mechanismu hvězdicového motoru [11]

3.3.1 PÍST

Píst přenáší tlakovou sílu vyvolanou spalováním paliva na další členy klikového mechanismu. Dalším úkolem pístu se utěsnit válec. Válec je potřeba utěsnit, aby se zabránilo pronikání plynů do klikové skříně a naopak, aby do pracovního prostrou válce nepronikal olej z klikové skříně.



Obr. 14 Schéma tepelného namáhání pístu [11]

Píst pracuje za obtížných podmínek. Na píst současně působí tlaková síla a síla setrvačná. Dále je píst namáhán vysokým tepelným namáháním, jelikož přichází do přímého styku s horkými plyny. Chlazení pístu je obtížné, proto má píst vyšší teplotu než válec, která dosahuje až 330ºC.

Při návrhu konstrukce pístu musí být splněny následující požadavky:

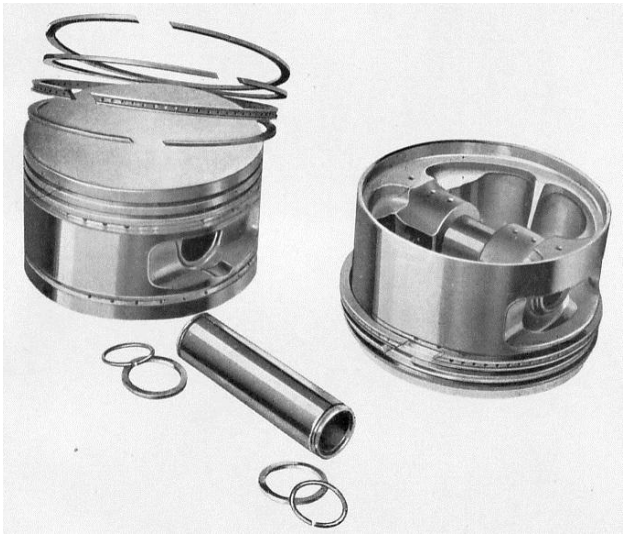
- píst musí bezpečně utěsnit vnitřní prostor válce,
- musí mít dostatečnou pevnost a tuhost,
- odvod tepla musí být dostačující, aby se píst nepřehřál,
- malé opotřebení třecích ploch,
- tření pístu o stěny válce musí být co nejmenší,
- samotná váha pístu musí být co nejmenší z důvodu snížení setrvačných sil.

Dodržet všechny tyto požadavky je obtížné, některé z nich jsou protichůdné. Proto píst pracuje na hraně tepelného a mechanického namáhání.

Úplný píst se skládá z těchto částí – vlastního pístu, pístního čepu a pístních kroužků.

Vlastní píst má tvar válcové nádoby s masivním dnem plochého, vydutého nebo vypouklého tvaru. Horní část pístu má silnější konstrukci a přenáší tlakovou sílu. Dále jsou v horní části vytvořeny drážky pro pístní kroužky. Spodní část pístu přenáší na stěnu válce boční sílu N, která způsobuje opotřebení válce.

Píst je spojen s ojnicí pomocí pístního čepu. Používá se dvou uložení pístního čepu. Jedná se o plavmo uložený čep, který se může otáčet jak v nálitcích, tak v ojničním čepu. Nebo lze použít pevně uloženého čepu, kde je čep pevně uložen v ojničním oku nebo nálitcích. Většinou se používá plavmo uloženého pístního čepu a jeho axiální pohyb je zajištěn pomocí pojistných kroužků.



Obr. 15 Kompletní píst včetně pístního čepu [7]

Aby spaliny nepronikaly do prostoru klikové skříně, je píst opatřen těsnícími kroužky. Těsnící kroužky jsou v jednom místě rozříznuty, tzv. zámek a v uvolněném stavu mají větší průměr, než má válec. Po vložení pístu do válce jsou tyto kroužky vlastní silou přitlačovány na stěny válce.

Těsnící kroužky nedokážou zabránit pronikání oleje do prostoru válce. Při pohybu válce dolů a vzhůru se olej tlačí skrze těsnící kroužky. K zamezení pronikání oleje se používá stíracích kroužků. Stírací kroužek nedoléhá na stěnu válce celou svou výškou. To znamená, že vzniká prostor, kudy může být olej odveden zpátky do klikové skříně.

Písty se vyrábějí jako výkovky z lehkých slitin, nejčastěji hliníku. Pístní čepy jsou vyráběny z ocelí, které jsou vhodné k nitridování a cementování. [1] [2] [3] [4] [6] [7]

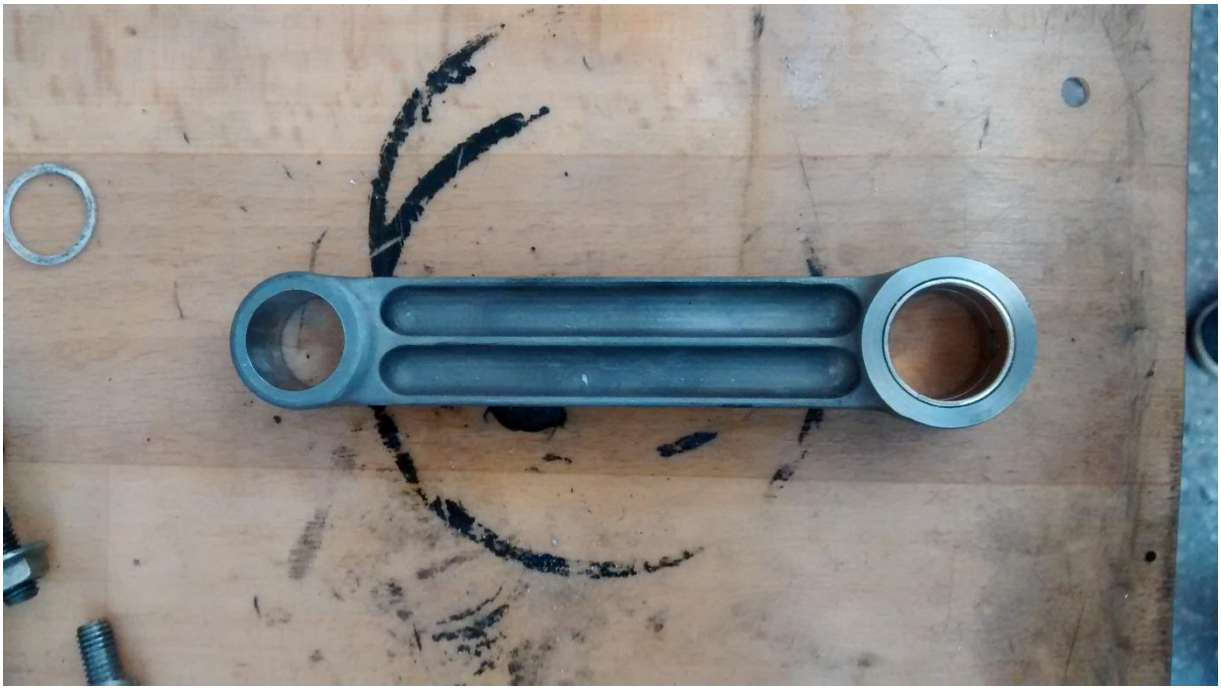
3.3.2 OJNICE

Ojnice spojuje píst s hřídelem a přenáší na klikovou hřídel síly působící na píst. Ojnice je namáhána střídavě na tah a tlak. Ojnice se skládá ze tří částí – ojničního oka, které je spojeno s pístním čepem, ojniční hlavy, která je spojena s klikovou hřídelí, a dříku.

U hvězdicového motoru se používá systém hlavních a vedlejších ojnic. Pro každou hvězdici je jedna hlavní ojnice a příslušný počet ojnic vedlejších.

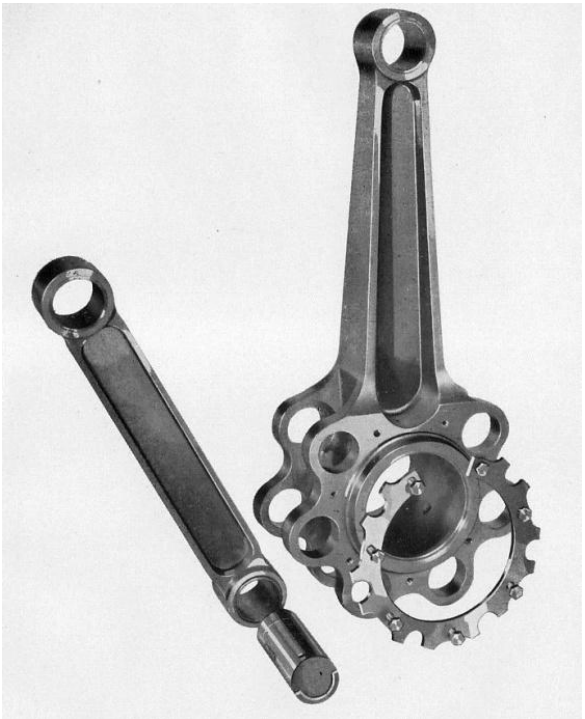
Obr. 16 Hlavní ojnice motoru Verner Scarlett 7H [32]

Vedlejší ojnice jsou pomocí čepu přichyceny k ojnici hlavní. U většiny hvězdicových motorů se používá dělená kliková hřídel, proto může být ojnice bez dělené ojniční hlavy. Dřík ojnice má průřez ve tvaru písmene I. Ojnice se vyrábí z legovaných ocelí kováním v zápustce.



Obr. 17 Vedlejší ojnice motoru Verner Scarlett 7H [33]

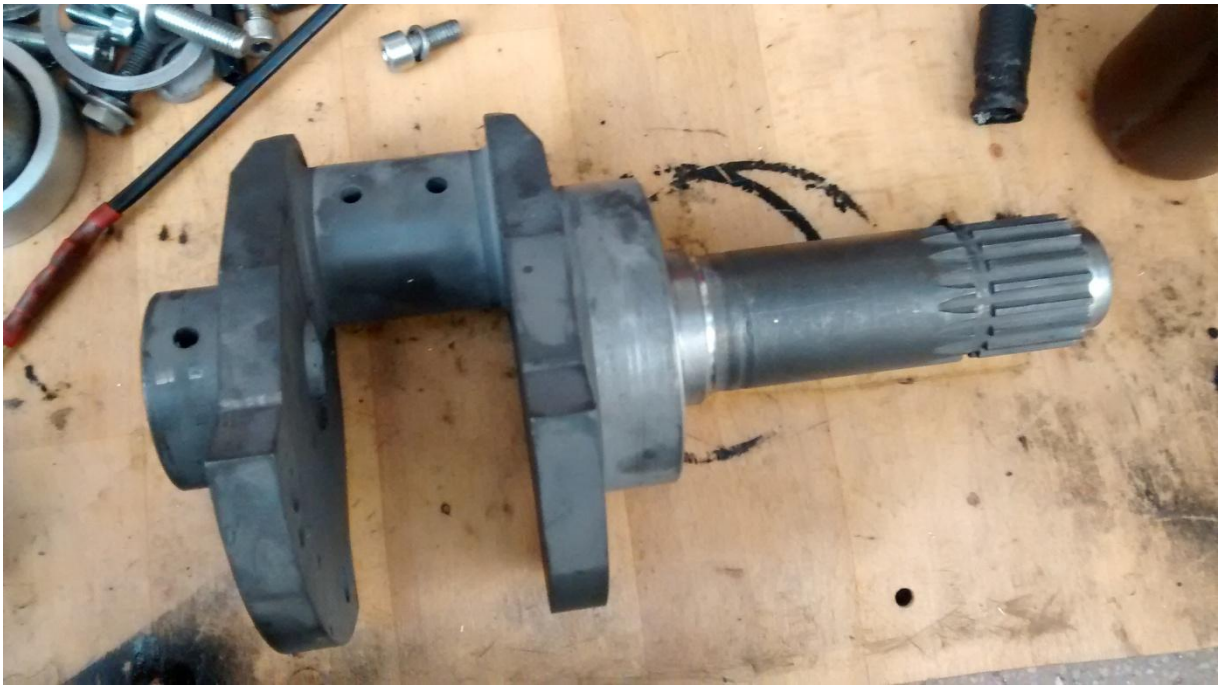
Jako ložisek se používá bronzových pouzder zalisovaných do ojničního oka a do ojniční hlavy. Mazání je provedeno pomocí rozstřiku oleje (viz. Mazání). [1] [2] [3] [4] [7]



Obr. 18 Hlavní a vedlejší ojnice [7]

3.3.3 KLIKOVÝ HŘÍDEL

Úkolem klikového hřídele je přenos výkonu, vzniklého ve válci, na vrtuli. Kromě toho klikový hřídel pohání další ústrojí motoru.



Obr. 19 Klikový hřídel jednohvězdicového motoru Verner Scarlett 7H [34]

Tvar klikového hřídele závisí na uspořádání a počtu válců motoru a musí splňovat tyto podmínky:

- samočinné vyvážení setrvačných sil posuvných a otáčejících se hmot, nebo možnost vyvážit je proti závažím,
- pravidelné pořadí zážehu válců.

Klikový hřídel je složen z těchto částí:

a) hlavní čep je uložen v opěrných nebo hlavních ložiscích, které jsou uloženy v klikové skříni,

b) klikový čep, na kterém jsou na něm uloženy ojniční hlavy,

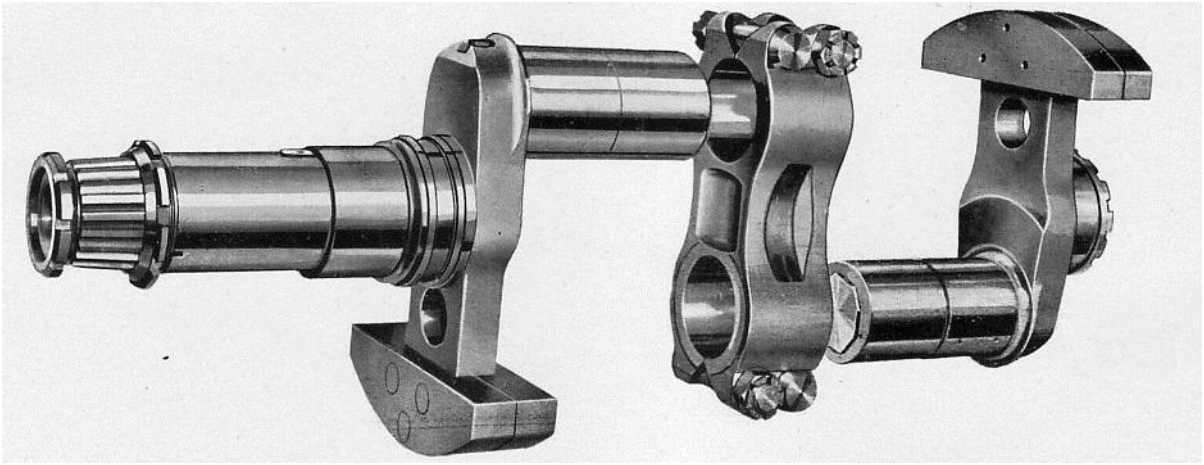
c) ramena, která spojují hlavní a klikové čepy,

d) přední konec, na kterém jsou uložena ozubená kola převodu reduktoru,

e) zadní konec, kde jsou upevněna ozubená kola nebo příruby pro pohon soustav motoru.

U většiny hvězdicových motorů se používá dělená kliková hřídel. Jednotlivé části jsou spolu spojeny v místech klikových čepů u ložisek. Kliková hřídel je uložena v klikové skříni

pomocí valivých ložisek. Valivá ložiska mají menší nároky na mazání, ale montáž celé soustavy je složitější. Na ramenech jsou umístěna protizávaží, která vyvažují setrvačné síly.



Obr. 20 Příklad klikového hřídele dvouhvězdicového motoru [7]

Klikové hřídele jsou vyráběny jako výkovky legovaných ocelí s přísadami niklu, chromu, molybdenu atd. Celý povrch hřídele je opracován a všechny přechody a zaoblení musí být plynulé. [1] [2] [3] [4] [7]

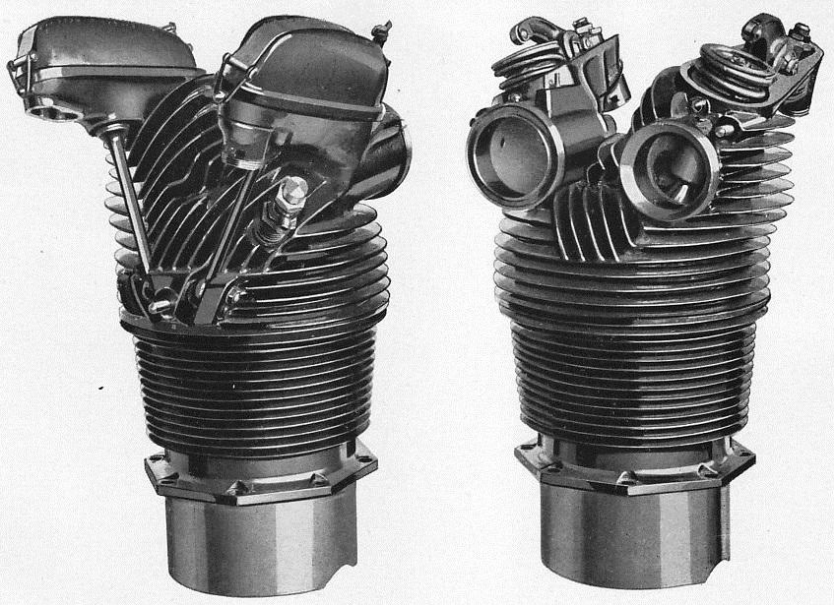
3.4 VÁLCE A HLAVY VÁLCŮ

Při provozu motoru musí válce a hlavy válců vydržet vysoké mechanické a tepelné namáhání. Mechanické namáhání je vyvoláno tlaky ve válci a teplené je vyvoláno přestupem a sáláním tepla z horkých spalin. Tepelné namáhání válce je nerovnoměrné. Na straně výfukových ventilů je teplota vyšší než na straně ventilů sacích. Je to zapříčiněno z toho důvodu, že sací ventil je pokaždé ochlazen novou směsí přivedenou do pracovního prostoru válce. Rozdíl teplot v různých místech hlavy může být 100 až 200 ºC a teplota nejvíce zahřáté části hlavy i 300 ºC.

U hvězdicového motoru se používá chlazení vzduchem, proto se hvězdicový motor řadí do skupiny motorů s jednotlivými válci vzájemně nezávisle připevněnými ke klikové skříni. K tomu, aby bylo dosaženo rovnoměrného chlazení válců, se používá žebrování. Toto žebrování má za úkol odvádět teplo vzniklé hořením paliva ve válci.

Další důležitou veličino při návrhu válce a hlavy je tvar spalovacího prostoru. Ten se volí tak, aby bylo dosaženo co největšího součinitele plnění. K tomu nejlépe slouží spalovací prostory ve tvaru půlkulového, střechovitého nebo válcovitého. Tvary se mohou měnit z důvodů umístění ventilů a svíčky.

U hvězdicového motoru jsou rozvody složitější a používá se hlava se dvěma ventily – jeden sací a druhý výfukový. Aby bylo zajištěno dostatečné průtokové množství, musí mít ventily co největší průměr talíře. Toho se dosáhne velkým úhlem mezi ventily, který je 70 až 80º.



Obr. 21 Válec hvězdicového motoru společně s namontovanou hlavou [7]

U vzduchem chlazených motorů jsou válce uchyceny ke klikové skříni pomocí dvou způsobů. Prvním způsobem je přitažení válce i s hlavou pomocí dlouhých šroubů ke klikové skříni. A druhý způsob spočívá v přichycení válce pomocí krátkých závrtných šroubů ke klikové skříni, hlava se poté na válec našroubuje nebo přichytí pomocí šroubů.

Válce a hlavy se odlévají z lehkých slitin, nejčastěji z hliníku. Hliník je vhodný pro jeho dobrou schopnost k odlévání, čím se dosáhne složitější tvarů a také je vhodný z důvodu dobré tepelné vodivosti. [1] [2] [3] [4] [5] [7]

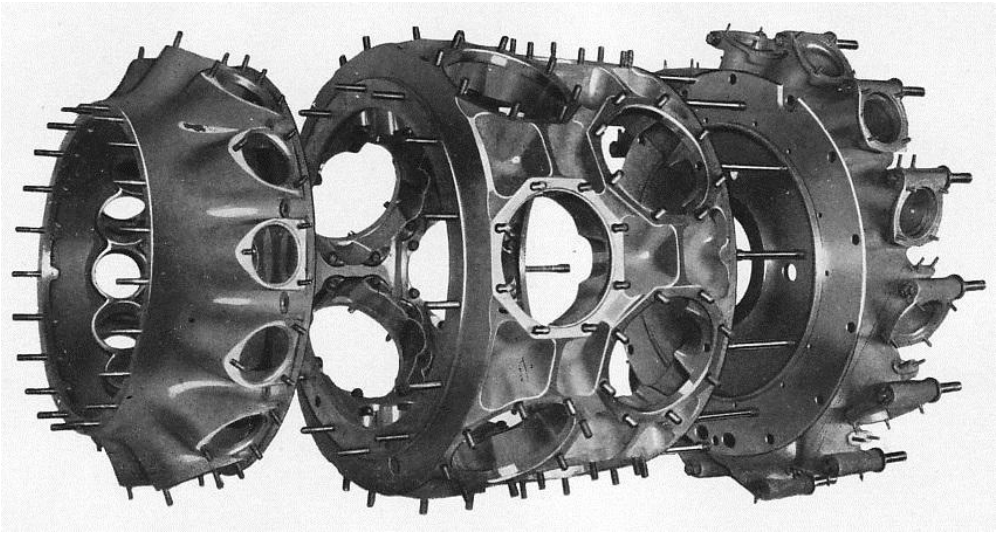
3.5 KLIKOVÉ SKŘÍNĚ

Kliková skříň je hlavní nosný prvek motoru. Na klikovou skříň se montují válce, části rozvodů, části pomocných ústrojí a pomocí klikové skříně se motor připevňuje na motorové lože letounu. Na klikovou skříň jsou přenášeny síly od tlaků plynů působících ve válci a setrvačné síly. Síly, které působí na píst a klikovou hřídel, se přenášejí do klikové skříně, mají ovšem opačný směr a zatěžují klikovou skříň v oblasti pod ložisky, ve kterých je kliková hřídel uložena.

Kliková skříň hvězdicových motorů se skládá z několika částí, jejichž vzájemná poloha je zabezpečena kruhovým osazením nebo středícími kolíky. Klikovou skříň lze rozdělit do tří částí – přední, střední a zadní. V přední části je připevněno přední víko klikové skříně. Ve střední části je nosné těleso, na které se montují válce motoru, a v zadní části se nachází skříň kompresoru a zadní víko.

Hvězdicové motory mají nosné těleso klikové skříně vyrobeno jako výkovek nebo výlisek z lehkých slitin. Občas se používá nosné těleso ocelové. Nevýhodou ocelového nosného tělesa je obtížnost výroby, ale výhodou je, že ocelový nosný prvek dokáže vydržet vetší zatížení.

Nosné těleso je děleno ve svislé rovině os válců, což usnadňuje montáž klikového mechanismu. U motorů s nižším a středním výkonem jsou nosná tělesa z jednoho kusu bez dělení v rovině válců, tím se zjednoduší výroba, ale montáž klikového mechanismu je obtížnější.



Obr. 22 Klikové skříň dvouhvězdicového motoru skládající se ze tří částí [7]

U několika hvězdicových motorů jsou mezi hvězdicemi přepážky, v nichž jsou upevněna ložiska. To dovoluje lepší rozložení sil přenášených klikovým mechanismem.

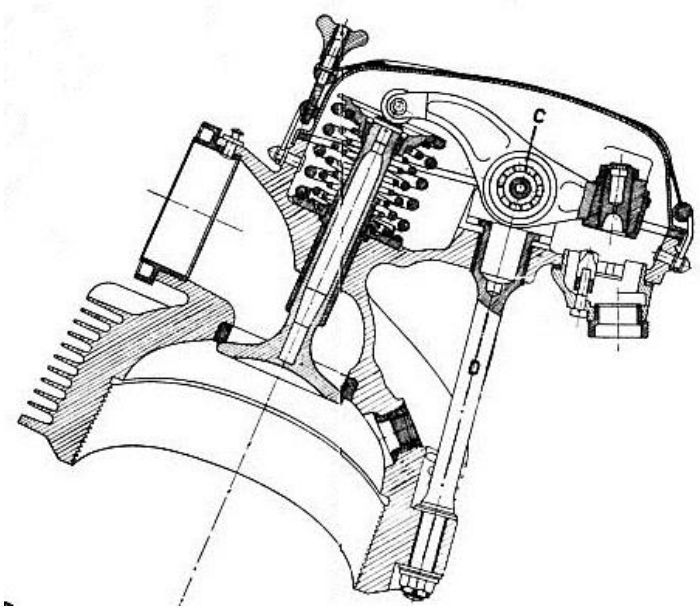
Klikové skříně hvězdicových motorů jsou tzv. „suché klikové skříně“. Mazání probíhá pomocí rozstřiku oleje pomocí rotačního pohybu klikové hřídele. Tím vzniká ve skříni olejová mlha, která se sráží na olejové kapičky, které jsou potom odčerpány zpět do olejové nádržky. [1] [2] [3] [4] [7]

3.6 ROZVODY

Funkcí rozvodů je ovládání ventilů, přičemž dochází k výměně náplně ve válci. Rozlišují se sací a výfukové rozvody. Sací rozvod má za úkol nasát do válce novou směs, zatím co výfukové rozvody mají za úkol odvést z prostoru válce výfukové plyny. U hvězdicových čtyřtaktních motorů se používalo dvou typů mechanických rozvodů – ventilový a šoupátkový. [1] [3] [5]

3.6.1 VENTILOVÝ ROZVOD

U hvězdicových motorů se nejvíce používalo tzv. OHV rozvodu, což znamená, že vačkový kotouč koná rotační pohyb a tím ovládá ventily pomocí zdvihátek, tyček a vahadel.



Obr. 23 Řez hlavou hvězdicového motoru ukazující uložení ventilu v hlavě válce [7]

U hvězdicových motorů je vačkový hřídel nahrazen vačkovým kotoučem. Vačkový kotouč je soustředný s klikovým hřídelem, a na svém obvodu má vačky. Řešení vačkového kotouče může být dvojího typu. První provedení spočívá v tom, že na jednom vačkovém kotouči jsou umístěny vačky, jak pro sání, tak pro výfuk. Při druhém provedení mají sací i výfukové ventily svůj vlastní vačkový kotouč. Pohon vačkového hřídele je uskutečněn pomocí ozubeného převodu z klikového hřídele na vačkový kotouč. Tento převod je závislý na počtu válců a smyslu otáčení vačkového kotouče. Počet vaček na vačkovém kotouči neodpovídá počtu válců motoru i zde je vše závislé na smyslu otáčení vačkového kotouče.

Vačkový kotouč musí mít tolik vaček, aby při jeho otočení o 360º/i nasály všechny liché válce (i je počet válců). Z této podmínky potom vyplývá pro počet vaček tato rovnice:

$$X_S = \frac{i}{2} + 0,5\,. \tag{23}$$

Při otáčení vačkového kotouče proti směru otáčení klikového hřídele bude vzorec vypadat takto:

$$X_P = \frac{i}{2} - 0,5\,. \tag{24}$$

Převod mezi vačkovým kotoučem a klikovým hřídelem musí být takový, aby se kotouč za dvě otáčky hřídele otočil o úhel mezi dvěma sousedními vačkami. To znamená, že se vačkový kotouč bude otáček pomaleji než klikový hřídel. Pokud se vačkový kotouč otáčí ve stejném smyslu, pak platí:

$$Y_S = 2X_S\,, \tag{25}$$

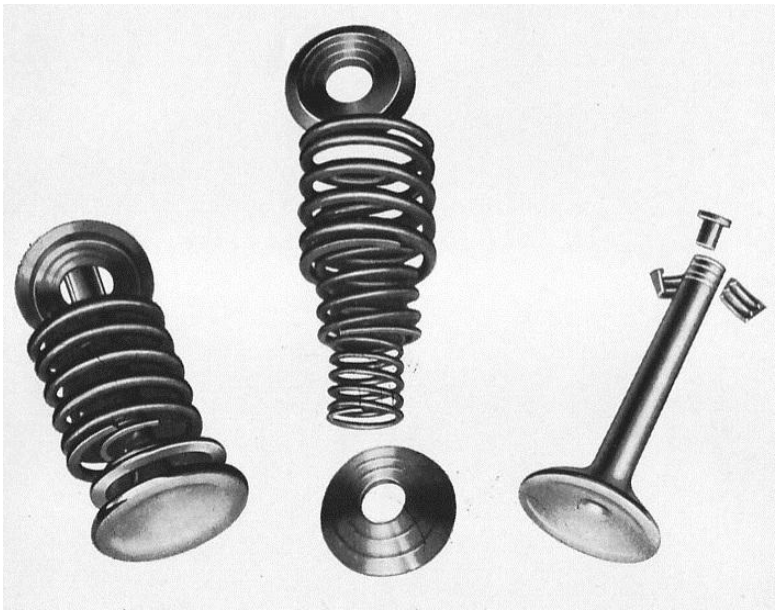
a pokud se točí proti, platí:

$$Y_P = 2X_P . \tag{26}$$

Tab. 1 Počet vaček a příslušný převod vačkového kotouče [5]

Počet válců		**3**	**5**	**7**	**9**
Směr otáčení proti klice	Počet vaček	1	2	3	4
	Převod od kliky	1:2	1:4	1:6	1:8
Směr otáčení stejný jako klika	Počet vaček	2	3	4	5
	Převod od kliky	1:4	1:6	1:8	1:10

Ventily jsou poskládány ze tří částí – talíře, pružiny a válcového dříku sloužícího k vedení. Ventily jsou mechanicky a tepelně namáhány.

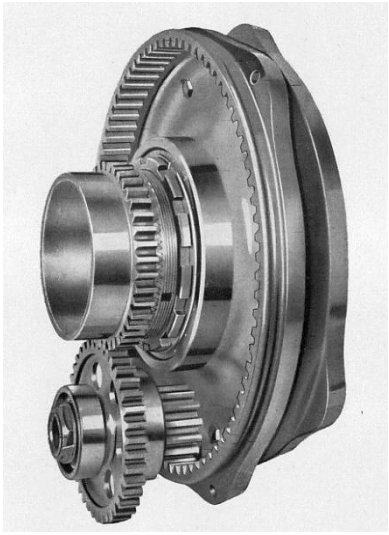


Obr. 24 Ventil hvězdicového motoru [7]

Nepříznivé tepelné namáhání je u výfukových ventilů, které se plnily sodíkem, aby se zlepšilo chlazení. Sací ventil je vždy ochlazen čerstvou směsí. Rychlost a zrychlení ventilu určuje tvar vačky. Tvar vačky dále určuje průběh zdvihu a dobu otevření ventilu. Průběh zdvihu a doba otevření ventilu výrazně ovlivňuje funkci plnění a výfuku. Tvar vaček na vačkovém kotouči bývá různý.

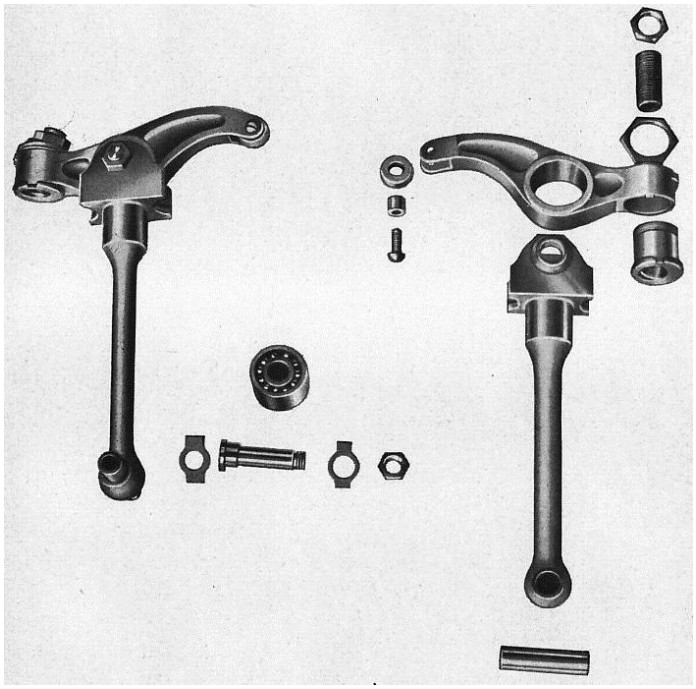
O dotlačení ventilu do sedla se starají pružiny. Toto dotlačení zabezpečuje sledování dráhy vačky. Zdvihátko je v podstatě válcová tyčinka, která má na jednom konci kladičku pohybující se po vačce a na druhém konci je lůžko. Do lůžka dosedá ventilová tyčka, která je

uložena v trubce a druhým koncem dosedá do lůžka vahadlo. Vahadlo přenáší pohyb ventilové tyčky dna ventil.



Obr. 25 Vačkový kotouč s pohonem [7]

Většina prvků OHV rozvodu je vyráběna z klasických konstrukčních ocelí, které se legují a dále tepelně zušlechťují. Výjimku tvoří ventily, které jsou vyráběny ze žáruvzdorných legovaných ocelí s přísadami wolframu, chromu a niklu. [1] [3] [4] [5] [7] [11]



Obr. 26 Vahadlo a stojánek vahadla [7]

3.6.2 ŠOUPÁTKOVÝ ROZVOD

U šoupátkových rozvodů je výměna náplně ve válci ovládána pomocí šoupátka. Směs se do válce dostane pomocí otvoru ve stěně válce, přičemž výfuk probíhá obdobně. Šoupátkové

rozvody byly použity jen ve výjimečných případech, na vině byla jejich výrobní náročnost, obtížné utěsnění šoupátka, atd. V porovnání s ventilovými rozvody měly větší objemovou účinnost a dovolovaly použít vyšší kompresní poměr. [1] [3] [5] [11]

3.7 REDUKTORY

Reduktor je zařízení, které přenáší otáčivý pohyb klikového hřídele na hřídel vrtulový. Reduktor má za úkol zmenšit počet otáček vrtulového hřídele proti otáčkám hřídele klikového. Vzájemný poměr těchto otáček se nazývá převod reduktoru, nebo také stupeň redukce.

Reduktor se používá z důvodu maximálního využití účinnosti vrtule. Vrtule má největší účinnost při nižších otáčkách, asi 1000 až 1600 min^{-1}. Použitím reduktoru se zmenší výkon přivedený na vrtuli z důvodu mechanických ztrát v ložiscích, ale získání vyšší účinnosti vrtule však tuto ztrátu kompenzuje. [1] [3] [7]

3.7.1 DRUHY REDUKTORŮ

U letadlových motorů rozlišujeme dva typy reduktorů:

a) reduktory nesouosé,

b) reduktory souosé.

REDUKTORY NESOUOSÉ

Osa vrtulového hřídele a osa klikového hřídele neleží na jedné ose, tyto osy jsou však rovnoběžné. Tyto využívají převod pomocí čelních kol s rovnými nebo šípovými zuby. Převodový poměr se vypočte se vzorce:

$$i_N = \frac{n_v}{n} = \frac{z_1}{z_2}, \tag{27}$$

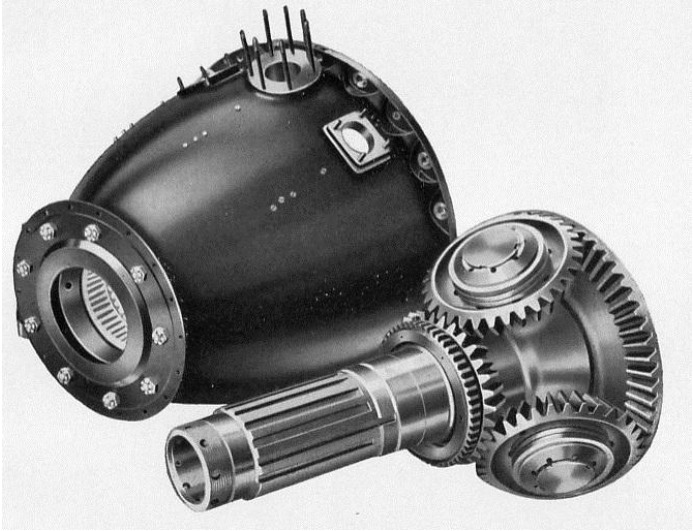
kde z_1 a z_2 jsou počty zubů kol. Hřídele reduktorů jsou uloženy v kluzných nebo valivých ložiscích, přičemž jedno z ložisek zachycuje axiální síly.

REDUKTORY SOUOSÉ

Osa vrtulového a klikového hřídele leží v jedné rovině. Souosé reduktory používají planetového převodu s kuželovými nebo čelními koly. Hnací kolo souosého reduktoru je pěvně spojeno s klikovým hřídelem. Druhé kolo je pěvně uchyceno v klikové skříni a je tudíž nepohyblivé. Planetové kolo se otáčí kolem čepu spojeného s vrtulí a odvaluje se po ozubení hnacího a pevného kola. Pro výpočet převodu se použije vztah:

$$i_S = \frac{n_v}{n} = \frac{z_1}{z_1 + z_3}, \tag{28}$$

kde z_1 je počet zubů hnacího kola a z_3 je počet zubů pevného kola. Při takovémto užití reduktoru se vrtulový hřídel točí ve stejném smyslu jako hřídel klikový. [1] [3] [7]



Obr. 27 Souosý reduktor [7]

3.7.2 REDUKTORY HVĚZDICOVÝCH MOTORŮ

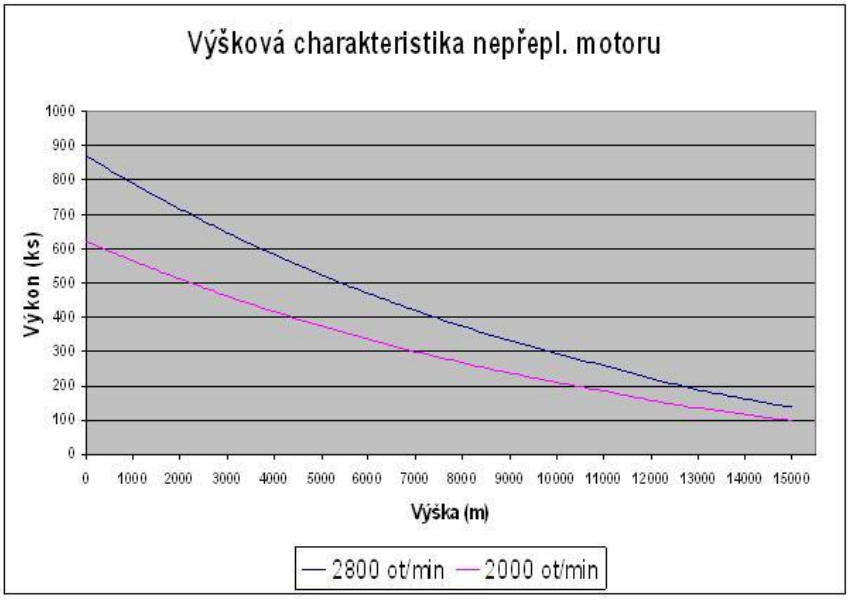
U hvězdicových motorů se používá výhradně souosý reduktor. Při použití reduktoru nesouosého dochází ke špatnému chlazení válců, a motor je tak nepoužitelný.

Souosé reduktory hvězdicových motorů mají planetový převod s kuželovými nebo čelními koly. U jednotlivých konstrukcí se používá 3 až 20 planetových kol. Větší počet kol, znamená složitější konstrukci a vyšší hmotnost, klesá však zatížení jednotlivých zubů. Nedostatkem planetového reduktoru je obtížná výroba kol s vnitřním ozubením. [1] [3] [7] [11]

3.8 PŘEPLŇOVÁNÍ HVĚZDICOVÝCH MOTORŮ

Důvodem přeplňování letadlových motorů je skutečnost, že s rostoucí výškou letu klesá barometrický tlak a motory pracující na principu přirozeného sání s rostoucí výškou ztrácely výkon. Výkon bylo možné zvýšit několika způsoby, například zvýšením otáček, zvýšením počtu válců nebo zvětšením celkového objemu při stejném počtu válců. Tyto způsoby však představovaly značné nevýhody. Rostlo namáhání jednotlivých součástí motorů a s vyšším počtem válců rostly rozměry a hmotnost motorů. Nejjednodušším způsobem bylo zvýšení litrového výkonu motoru, čehož se dosáhlo právě pomocí přeplňování. Přeplňování mohlo zvýšit výkon motoru téměř o 100%, aniž by jeho váha rapidně vzrostla. S vyšším výkonem se zlepšily letové charakteristiky letounů, byly rychlejší, obratnější a dosahovaly vyšších výšek letu.

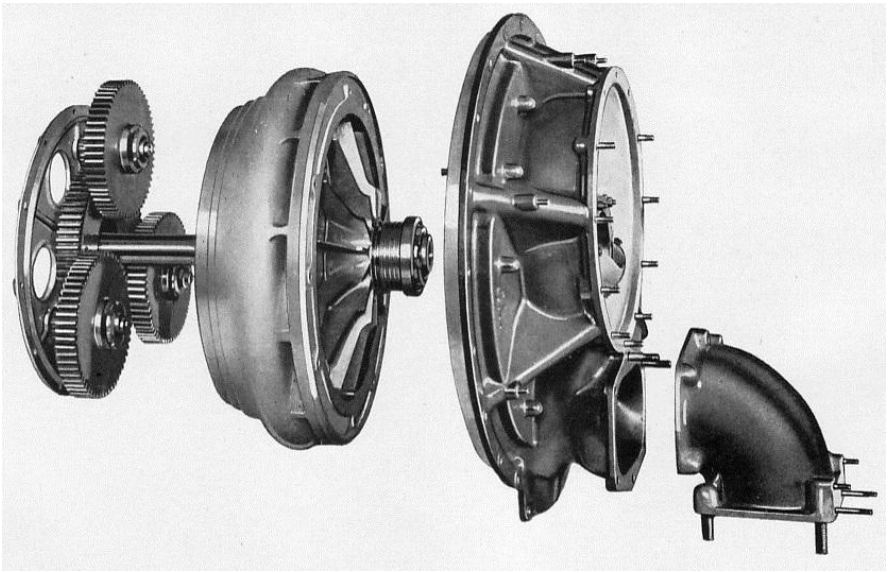
Během 2. Světové války se u pístových motorů, ať už řadových, do V nebo hvězdicových, nejvíce používalo přeplňování pomocí mechanicky hnaného kompresoru, nebo turbokompresoru. [1][2][3][7][11]



Obr. 28 Graf závislosti výkonu na výšce letu [11]

3.8.1 MECHANICKY HNANÝ KOMPRESOR

Mechanický hnaný kompresor je principielně nejjednodušším druhem kompresoru. Vznikne, pokud je kompresor poháněn klikových hřídelem a výfuk zůstává volný, to znamená, že se nevyužívá energie výfukových plynů. Úkolem mechanický hnaného kompresoru je zvýšení tlaku pomocí komprese nasávaného vzduch. Existuje velké množství kompresorů, jednostupňové, dvoustupňové, atd.



Obr. 29 Kompresor s pohonem [7]

Výkon kompresoru (poměr stlačení) je určen pomocí tzv. *celkového stupně zvýšení tlaku vzduchu*, který udává poměr tlaků vzduchu na výstupu z kompresoru a na vstupu do kompresoru. Stupeň zvýšení obvykle bývá 4 až 5. To umožňuje udržet plnící tlak do výšky zhruba 6000 až 7000 metrů. Pro vyšší výšky se dá použít dvoustupňového kompresoru, u kterého bude stupeň zvýšení vyšší, nebo kompresoru s měnitelným kompresním poměrem. [1] [2] [3] [11]

3.8.2 TURBOKOMPRESOR

Turbokompresor neboli turbodmychadlo je druhý způsob přeplňování leteckých motorů. Celé zařízení se skládá z kompresoru a turbíny. Kompresor a turbína jsou na společné hřídeli, turbína je zařazena ve výfukovém potrubí, kde využívá kinetické a tepelné energie výfukových plynů a pohání tak kompresor. Kompresor není přímo spojen s klikovou hřídelí. U turbomotorů je potřeba věnovat pozornost tvaru výfukového potrubí, které do značné míry ovlivňuje chod turbokompresoru. Za 2. Světové války se používalo svedení svodů do jednoho primárního potrubí, které vedlo k turbíně. [1] [2] [3] [11]

3.9 MAZACÍ SOUSTAVY MOTORU

Primárním úkolem mazací soustavy motoru je dodávat mazací olej na plochy namáhané mechanickým třením a snížit tak velikost samotného tření, ale i opotřebení. Mazací soustava vykonává další úkoly:

a) chladí tepelně namáhané součásti,

b) ohřívá součásti palivové soustavy,

c) slouží jako hydraulická kapalina v systémech motoru (servomechanismus, kompresor),

d) chrání části motoru před korozí.

Mazací soustava zajišťuje nepřetržitou a dostatečnou dodávku oleje na namáhané plochy a neustálý oběh oleje v motoru. Při oběhu dochází ke ztrátám oleje, proto se musí olej doplňovat z olejové nádrže a chladit v olejovém chladiči, aby nedošlo k jeho přehřátí.

Celá mazací soustava se skládá z vnitřní soustavy, což jsou prvky, které jsou upevněny na motoru, a soustavy vnější, jejíž prvky jsou umístěny na draku letadla. [1] [3] [4] [7] [11]

3.9.1 VNITŘNÍ MAZACÍ SOUSTAVA

U vnitřní mazací soustavy jsou dvě hlavní mazací soustavy:

a) rozstřikovací,

b) tlaková.

V případě rozstřikovací soustavy je motor mazán pomocí jemně rozptýleného oleje. Olej je rozstřikován pomocí rychle se otáčejících součástí například pomocí klikové hřídele. Volný prostor v motoru je vyplněn olejovou mlhou.

U tlakového mazání se olej dopravuje pomocí soustavy kanálků na třecí plochy. Toho je dosaženo pomocí tlakových čerpadel. Nejběžněji se používají čerpadla zubová. Jejich výhodou je jednoduchá konstrukce, malá hmotnost a vysoká spolehlivost.

U hvězdicových motorů se používalo smíšené mazací soustavy. Nejvíce zatížené třecí plochy se mazaly tlakovou soustavou a ostatní rozstřikováním oleje. [1] [3] [4] [11]

3.9.2 VNĚJŠÍ MAZACÍ SOUSTAVA

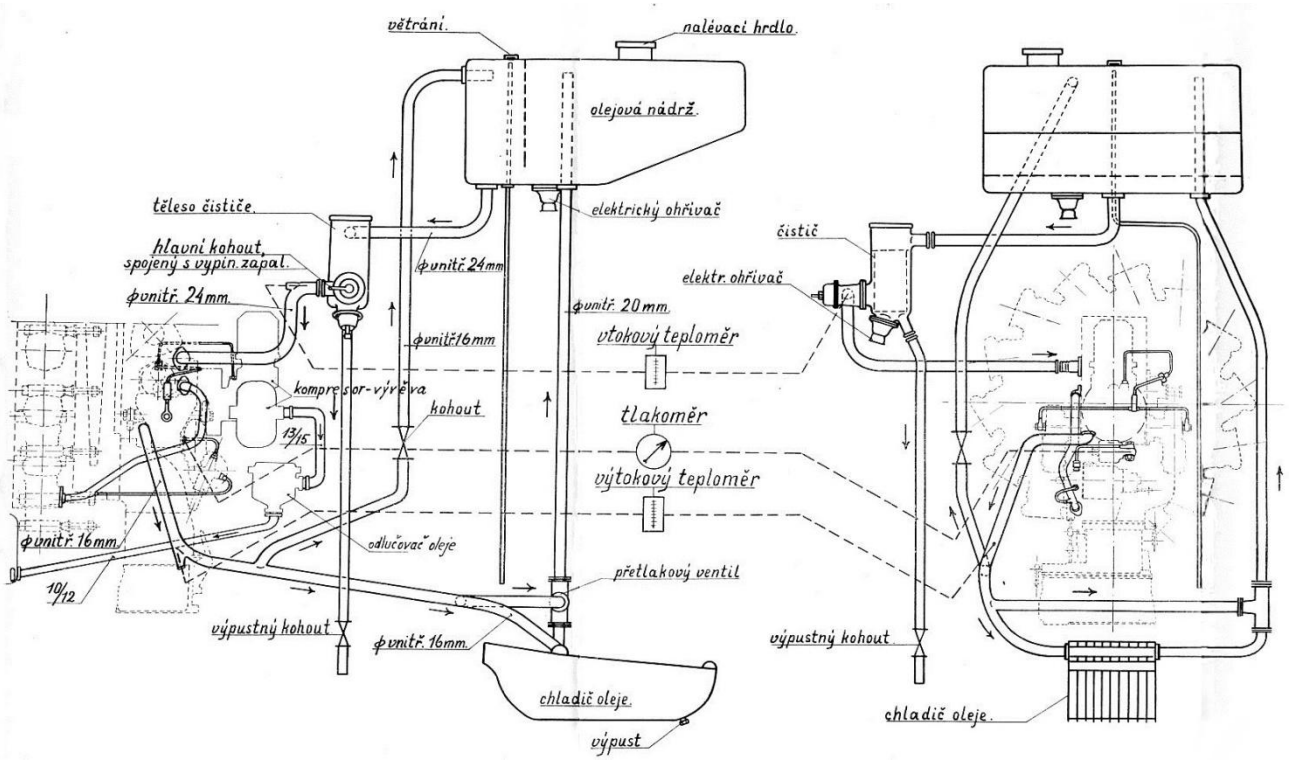
Vnější mazací soustava obsahuje tyto části:

a) olejovou nádrž,

b) potrubí vedoucí olej z nádrže k čerpadlu,

c) potrubí vedoucí olej z klikové skříně zpátky do nádrže.

Vnější olejová soustava se nachází mezi oběma potrubími. Na potrubí vedoucí olej od motoru jsou umístěny další prvky soustavy, jako jsou čistič a chladič. Na potrubí vedoucí olej do motoru zpravidla nejsou žádné prvky, které by zvětšovaly hydraulický odpor.



Obr. 30 Schéma vnější mazací soustavy hvězdicového motoru [7]

Hlavním úkolem vnější mazací soustavy je spolehlivé mazání motoru za provozních podmínek. Aby byla vnější olejová soustava spolehlivá, je nutné dosáhnout potřebné teploty oleje na vstupu do motoru, co možná nejmenšího obsahu vzduchu ve vstupním oleji a minimálního hydraulického odporu olejové soustavy. K dosažení potřebné teploty oleje se olej ochlazuje v chladiči. Odstranění vzduchu probíhá hlavně v nádrži. Zpěněný olej od motoru se vede do horní části nádrže, kde je nad olejovou hladinou dostatek prostoru pro uvolněný vzduch. Snížení hydraulického odporu je dosaženo pomocí použití dostatečně velkého průřezu trubek potrubí, dále plynulými přechody a ohyby. V celém obvodu musí být co nejméně přídavných zařízení (kohouty, chladiče, atd.), který by mohly zvýšit hydraulický odpor. [1] [3] [4] [11]

3.10 CHLAZENÍ

Při chodu motoru vzniká teplo nejen od hoření paliva ve válci, ale také mechanickým třením. Chladící soustava má za úkol odvádět z motoru tolik tepla, kolik je potřeba, aby se teplota udržela v přípustných mezích.

Nedostatečné chlazení způsobí přehřívání, což má za následek snížení pevnosti materiálu jednotlivých součástí, zadírání pístních kroužků, propalování ventilů, praskání hlav atd. Příliš vysoké chlazení je také nežádoucí, jelikož snižuje výkon odvodem tepla, který by mohlo být přeměněno v práci. U přechlazeného motoru dochází ke snížení mazacích schopností maziv a tím k nedostatečnému mazání jednotlivých součástí.

Termomechanika rozlišuje tři druhy sdílení tepla – jsou to vedení tepla, proudění a sálání. U vedení se teplo šíří v tuhých tělesech i tekutinách, jestliže v tělesech a tekutinách existuje teplotní rozdíl. Při proudění se teplo šíří v kapalinách. Výměna tepla probíhá při kontaktu tekutiny s pevnou stěnou. Sálání je přenos tepla mezi dvěma tělesy bez jejich vzájemného styku. U pístových motorů dochází ke sdílení tepla pomocí všech tří způsobů. Proces sdílení tepla u pístového motoru lez popsat takto:

a) přestup tepla při spalování paliva do povrchu stěn,

b) vedení tepla stěnou válce,

c) přestup ze stěn do chladícího prostředí, které může být plynné nebo kapalné.

Celkové teplo, které prostupuje rovinou stěnou, se vypočítá z termodynamické rovnice ve tvaru:

$$Q = kS\Delta T = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_0} + \frac{1}{\alpha_2}}, \tag{29}$$

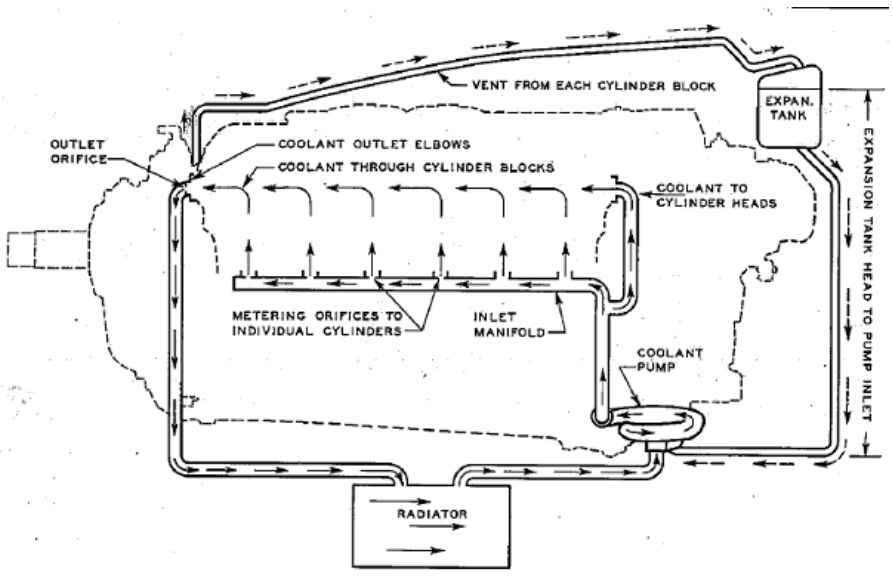
kde k, je součinitel prostupu tepla, α_1 a α_2 jsou součinitelé přestupu tepla, λ_0 je součinitel tepelné vodivosti materiálu stěny, a ΔT je rozdíl teploty plynů ve válci a chladícího média.

U pístových motorů se používá dvou způsobu chlazení, a to chlazení pomocí kapaliny nebo chlazení pomocí vzduchu. Kapalinového chlazení se spíše využívalo u motorů řadových, nebo s válci do V. U motorů hvězdicových se z větší části používalo chlazení vzduchem. [1] [3] [4] [7] [11]

3.10.1 CHLAZENÍ KAPALINOU

Při chlazení kapalinou je nejběžnější chladící medium voda. Teploty v chladící soustavě by měly být zpravidla o 5 až 10 ºC nižší než je teplota varu vody. Tedy u země je teplota varu vody asi 100 ºC a v otevřené chladící soustavě by neměla být teplota vyšší než 90 až 95 ºC. Ovšem ve vyšší výšce letu je atmosférický tlak nižší a tím se snižuje i teplota varu vody. Například v 10 000 metrech je teplota varu vody 65 až 70 ºC. Aby mohla být kapalina ochlazena, musí být chladící soustava opatřena chladičem větších rozměrů. Ke zvýšení teploty chladicí kapaliny a zároveň ke zmenšení rozměrů chladiče se dá použít uzavřené chladící soustavy a použitím ventilu. V chladící soustavě vzroste tlak a je udržován automaticky na požadované hodnotě, tím posuneme bod varu vody na 120 až 130ºC.

Voda, jako chladící medium, by neměla být tvrdá, aby se v chladícím oběhu netvořily usazeniny a oddálil se vznik koroze. Voda může být čištěna přímo v chladícím zařízení, a to pomocí přidání dvojchromanu draselného ($K_2Cr_2O_7$). Dále lze vodu čistit a měkčit při nalévání do soustavy, například pomocí filtrace.

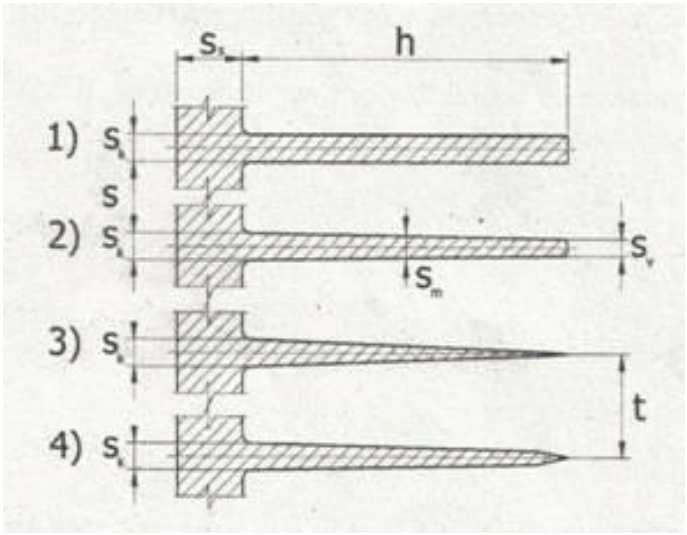


Obr. 31 Schéma kapalinového chlazení [11]

Výhodou kapalinového chlazení patří rovnoměrný odvod tepla z kritických oblastí motorů. Mezi nevýhody patří nutnost důkladného utěsnění soustavy, korozní opotřebení a ztrátový výkon pro chladící soustavu. [1] [3] [4] [7] [11]

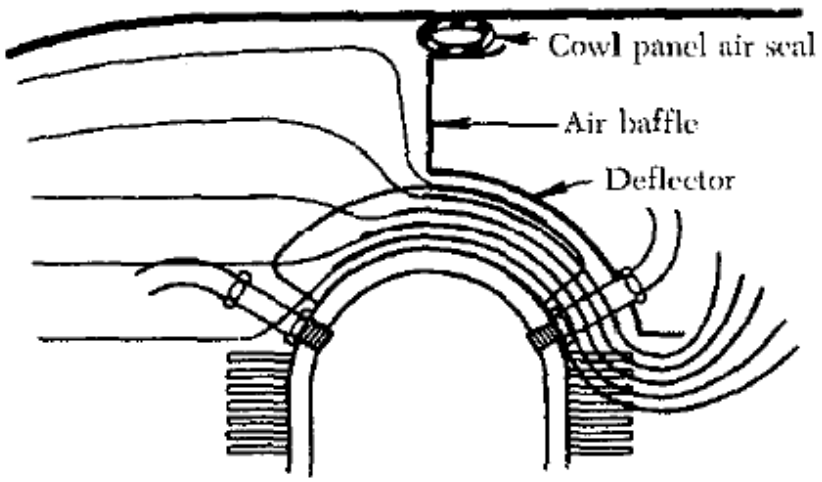
3.10.2 CHLAZENÍ VZDUCHEM

Chlazení vzduchem je nejběžnější typ chlazení hvězdicových motorů. Teplo odvedené od motoru je přímo předáváno okolnímu vzduchu, který motor obklopuje. Množství tepla odvedeného od motoru je přímo úměrné velikosti teplosměnné plochy. Zvýšení teplosměnné plochy se dosáhne pomocí žebrování. Konstrukční návrh žeber (tloušťka a hustota žeber) se určí s ohledem na maximální efektivitu chlazení.



Obr. 32 Konstrukční tvary chladicích žeber [11]

Hvězdicové motory mají velký čelní odpor a snížení tohoto odporu vyžaduje použití krytu. Nejjednodušší je kryt válcový, který je kolem vnějšího průměru motoru. Kryt je opatřen prstencem, který usměrňuje vzduch k válcům. Aby bylo chlazení vzduchem pokud možno, co nejefektivnější, montují se na motor deflektory, které mají za úkol usměrnit proud vzduchu těsně kolem válců. U dvou- a vícehvězdicových motorů mají deflektory za úkol vést vzduch k válcům zadních hvězd, které se chladí hůře než hvězdice přední.



Obr. 33 Schéma usměrnění proudění vzduchu pomocí deflektoru [11]

Podmínky chlazení vzduchem závisí na režimu letu, letové výšce a na stavu okolního vzduchu. Tyto podmínky ovlivňují správné chlazení. U režimu letu rozlišujeme hlavně to, jestli se jedná o vodorovný let nebo stoupání. Při stoupání má letadlo nižší rychlost a množství vzduchu nemusí být dostatečné ke správnému chlazení. Pokud dojde při stoupání k přehřátí, pilot musí přejít na vodorovný let a nechat tak teplotu klesnou.

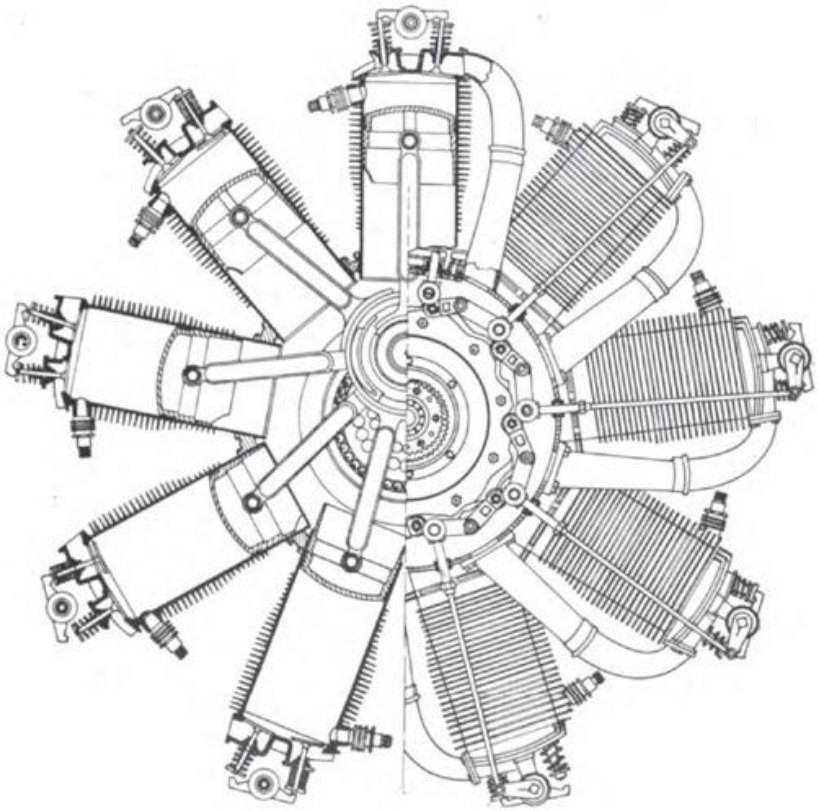
Jestliže množství vzduchu není dostatečné, používá se u motorů nucené obtékání vzduchu. Motor se vybaví ventilátorem, který zabezpečí dostatečné množství vzduchu pro správné chlazení.

Mezi hlavní výhody patří, že odpadá použití chladící soustavy. Ovšem použitím žeber a deflektorů narůstá celková hmotnost motoru a z toho plynoucí nevýhody. [1] [3] [4] [7] [11]

4 PŘÍKLADY KONSTRUKCE HVĚZDICOVÝCH MOTORŮ

4.1 LE RHONE 9

Le Rhone 9 byl rotační motor vyráběný Francouzskou firmou Societé des Moteurs Le Rhone v roce 1910. Jednalo se devítiválcový, vzduchem chlazený motor. Le Rhone 9 se nevyráběl pouze ve Francii, licenčně se vyráběl také ve Velké Británii a Spojených státech Amerických. Německá firma Oberursel Motoren vyráběla kopii tohoto motoru pod označením Oberursel Ur.II.



Obr. 34 Částečný řez motorem Le Rhone 9 [35]

V období 1. Světové války by tento motor osazen do spousty typů letadel, například poháněla Nieport 17, Nieuport 27, Hanriot HD 1 atd. Kopie německé firmy model Oberursel Ur. II. byl namontován letounu Fokker Dr. I, toto letadlo je známější díky přezdívce „Rudý Baron“.

Motor Le Rhone měl klasický systém sání. Směs vzduchu a paliva šla nejprve do prstencové komory na zadní straně klikové skříně a odtud byla rozvedena pomocí leštěných měděných trubek k hlavám válců, kde se nacházel klasický ventilový rozvod.

Le Rhone měl zajímavý způsob ovládání ventilů. Jediné vahadlo bylo zkonstruováno tak, aby ovládalo sací i výfukový ventil zároveň. V praxi to znamenalo, že pohybem dolů se otevřel

sací ventil a pohybem nahoru se otevřel ventil výfukový. Tento způsob ovládání ventilů fungoval dobře a používal se až do dvacátých let minulého století.

Obr. 35 Motor Le Rhone 9 [36]

Motor Le Rhone 9 se vyráběl od roku 1914 až do dvacátých let. Motor byl vyroben v několika verzích, které měly různé výkony. [12]

Technické parametry motoru Le Rhone 9J

Typ:	devítiválcový rotační hvězdicový vzduchem chlazený motor
Vrtání:	112 mm
Zdvih:	170 mm
Objem:	15,074 litru
Hmotnost:	146,5 kg (bez provozních kapalin)
Rozvody:	OHV rozvod, 2 ventily na válec
Výkon:	82 kW (110 koní) při 1200 min^{-1}
Kompresní poměr:	5:1

Varianty motoru:

Le Rhone 9Ja	82 kW
Le Rhone 9Jb	89 kW

Le Rhone 9Jby 97 kW

Motor byl namontován v letounech:

Airco DH.	2Airco DH. 5	Avro 504
Bristol M. 1	Cierva C. 6	Hanriot HD. 1
Nieuport 16	Nieuport 17	Nieuport 20
Fokker Dr. 1		

4.2 WALTER K-14

Motor Walter K-14 je čtrnáctiválcový, čtyřdobý, vzduchem chlazený hvězdicový motor, vyrobený v roce 1935. Válce jsou uspořádány ve dvou hvězdicích po sedmi válcích.

Motor byl vyroben firmou Walter ve 30. letech minulého století. Firma Walter byla založena na počátku 20. století panem Josefem Waltrem. Nejdříve vyráběla motocykly a automobily, ale ve 20. letech se začala specializovat na letadlové motory. Licenci pro výrobu motoru K-14 získala firma Walter od francouzské firmy Gnome-Rhone.

Obr. 36 Hvězdicový motor Walter K-14 [37]

Jednalo se o klasický hvězdicový motor přeplňovaný mechanicky hnaným kompresorem. Rozvod byl OHV se dvěma ventily na válec. Vačkový kotouč měl převod 6:1 a měl opačný smysl otáčení než klikový hřídel. O přenos otáček klikové hřídele na vrtuli se staral souosý reduktor.

Motor K-14 byl vyroben ve dvou verzích K-14 I a K-14 II. Druhá verze se lišila jiným provedením válců a hlav s hustějším žebrováním a zesíleným klikovým hřídelem a ojnicemi. [7] [23] [25]

Technické parametry motoru Walter K-14 I

Typ:	14 -ti válcový hvězdicový vzduchem chlazený motor
Vrtání:	146 mm
Zdvih:	165 mm
Objem:	38,7 litru
Hmotnost:	595 kg (bez provozních kapalin)
Rozvody:	OHV rozvod, 2 ventily na válec
Výkon:	515 kW (700 koní) při 2400 min^{-1}
Kompresní poměr:	5,5:1

Varianty motoru:

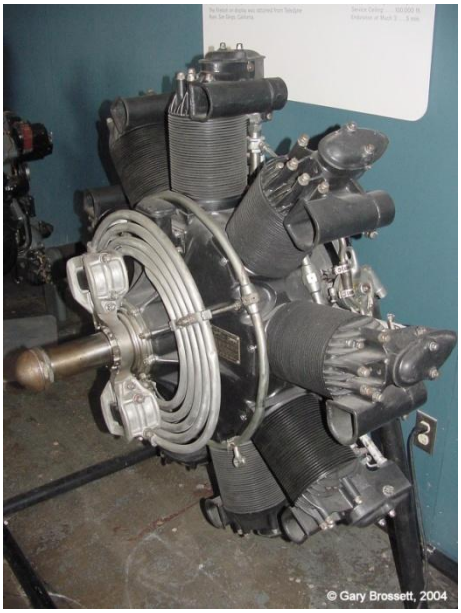
Walter K- 14 I	515 kW
Walter K- 14 II	588 kW

Motor byl namontován v letounech:

Aero MB 200	Letov Š 528	Letov Š 331

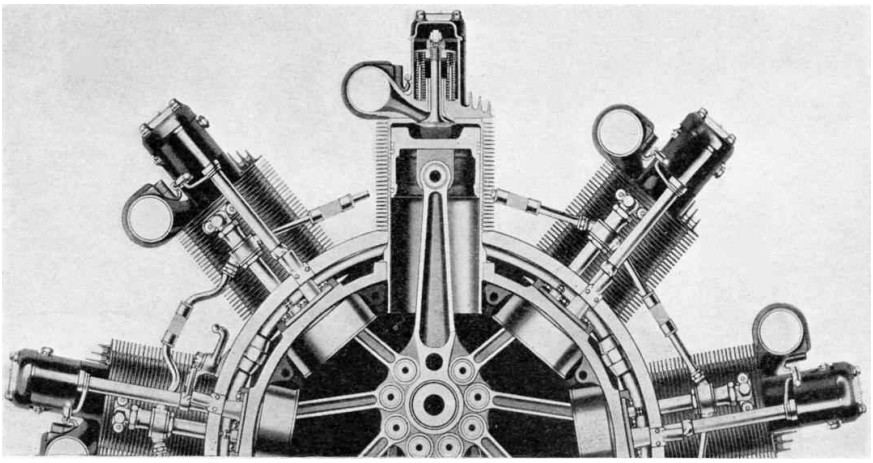
4.3 PACKARD DIESEL

Motor Packard Diesel je čtyřdobý, vzduchem chlazený, devítiválcový, naftový hvězdicový motor bez kompresoru a reduktoru. Jednalo se o první americký letecký naftový motor, který byl zkonstruován L. M. Woolsonem v roce 1928.



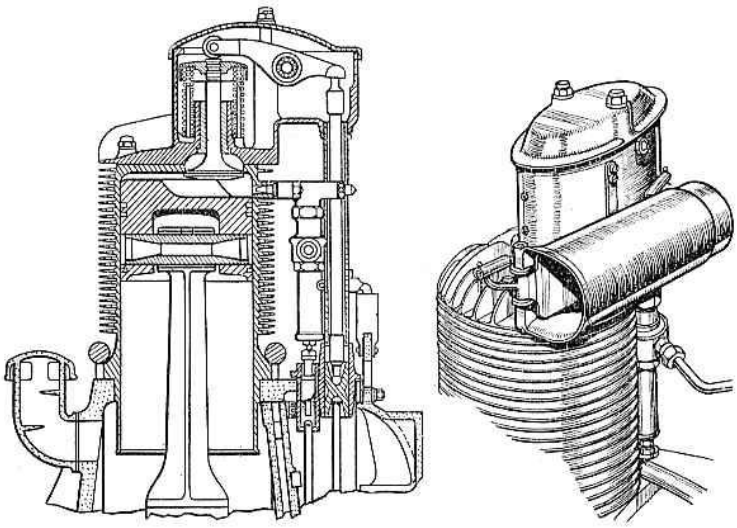
Obr. 37 Hvězdicový motor Packard Diesel [38]

Měl zajímavou konstrukci, která byla zaměřena na problémy vstřikování a mechanickou odolnost při malé hmotnosti motoru. Byl navržen tak, aby ve srovnání s tehdejší benzínovou konkurencí vydržel podstatně větší mechanická namáhání. Toto namáhání bylo způsobeno výrazně větším spalovacím tlakem, který byl téměř dvojnásobný než u benzínových bezkompersorových agregátů.



Obr. 38 Částečný řez motorem Packard Diesel [39]

Kliková skříň byla řešena naprosto novým způsobem. Obvykle se tlaky vzniklé hořením směsi přenášely na skříň pomocí upevňovacích šroubů jednotlivých válců, a to mělo za následek namáhání skříně na tah. U klikové skříně motoru Packard bylo vytvořeno předpětí v tlaku pomocí ocelových prstenců, které svíraly z obou stran příruby válců. Při chodu motoru se v jednotlivých místech skříně toto předpětí snižovalo, aniž by vzniklo namáhání skříně v tahu. Všechna namáhání, způsobená tlaky ve válcích, se přenášela namáháním v tahu prstence. Musela zde být splněna podmínka, aby velikost původního stažení válců byla o tolik větší, než maximální tlaky, aby příruby válců byly přitaženy na dosedací plochy s dostatečným předpětím.



Obr. 39 Řez válcem motoru Packard Diesel [40]

Válce motoru byly vyrobeny jako neprůchozí s otvorem pro ventil a hliníková hlava s chladícími žebry byla na válec upevněna pomocí šroubů. Hlava válce nebyla namáhána tlakem plynů. Sloužila k odvedení tepla a k vytvoření jediného společného sacího a výfukového kanálu.

Na každém válci byl společný ventil pro sání i výfuk. Ventil zůstával otevřen dvojnásobně dlouho, tedy po dobu sacího i výfukového zdvihu. K výfuku i k nasávání byla použita společná trubice umístěna na boku hlavy. Vzduch proudil do trubice pohybem letounu za letu, nebo byl proud vzduchu hnán od vrtule, když letadlo stálo na zemi. Ventilový rozvod měl jeden dostatečně velký ventil, který byl málo dynamicky namáhán a střídavě ohříván a ochlazován. [5] [6]

Technické parametry Packard Diesel

Typ:	9 -ti válcový, hvězdicový, vzduchem chlazený, naftový motor
Vrtání:	122,2 mm
Zdvih:	152,4 mm
Objem:	16,2 litru
Hmotnost:	231 kg (bez provozních kapalin)
Rozvody:	OHV rozvod, 1 společný ventil pro sání i výfuk
Výkon:	177 kW (240 koní) při 2050 min^{-1}
Kompresní poměr:	16:1

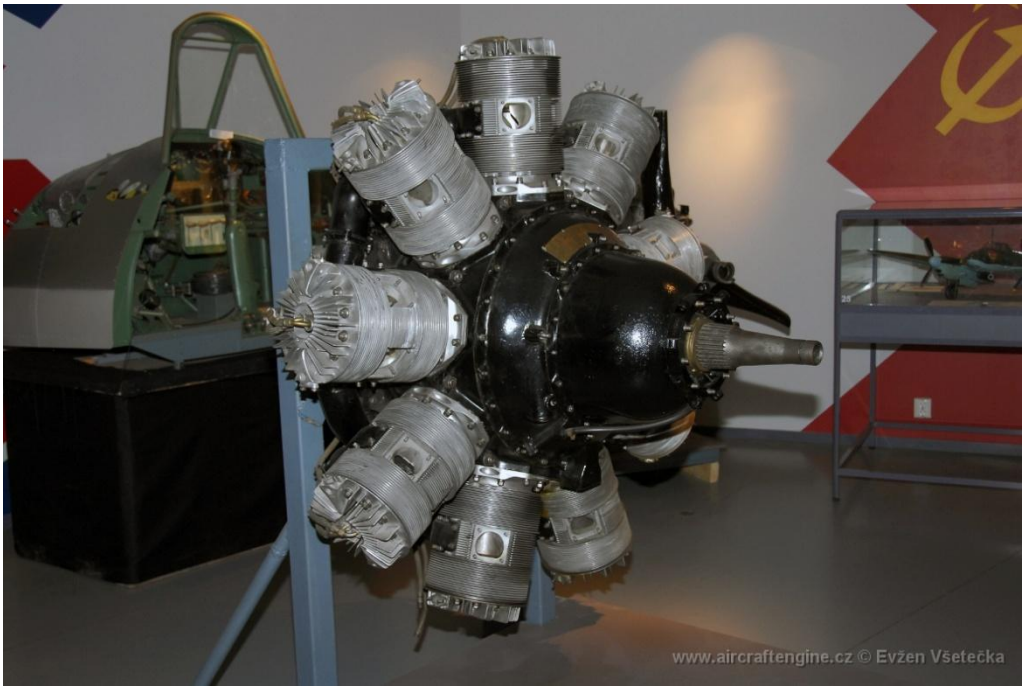
Motor byl namontován v letounech:

Bellanca CH-200	Bellanca CH-300	Brunner -Winkle Bird
Ford Model 11	Stewart M-2	Stinson Detroiter

4.4 BRISTOL PERSEUS

Perseus byl devítiválcový, hvězdicový, vzduchem chlazený motor, který měl rozvody pomocí šoupátek. Motor byl zkonstruován na začátku 30. let 20. století. Poprvé byl rozběhnut v roce 1932.

V roce 1927 začíná společnost Bristol Company vyvíjet motor se šoupátkovými rozvody. Hlavní šéfkonstruktér firmy Bristol Roy Fedden sestrojil dvouválcový motor s válci do V, ovšem tento motor byl pouze testovací. Hlavním cílem bylo vytvoření dvanáctiválcového motoru s válci do V a šoupátkovým rozvodem. Ale problémy s konstrukcí zapříčinily konec této myšlenky. Po šesti letech úprav a pokusů nakonec v roce 1933 vznikl Bristol Perseus. Od původní myšlenky s válci do V bylo upuštěno a vytvořil se motor s válci do hvězdice.



Obr. 40 Motor Bristol Perseus [41]

Šoupátka v motoru byla ocelová v hliníkovém válci. Na každém válci byla 3 nasávací šoupátka a 2 výfuková. Šoupátka byla poháněna malými klikami s kulovými čepy od předního konce klikové hřídele pomocí ozubených kol.

Výhodou rozvodu se šoupátky byla skutečnost, že šoupátkové ventily měly lepší objemovou účinnost, než klasické ventily sedlové, a dokázaly pracovat při vyšších otáčkách.

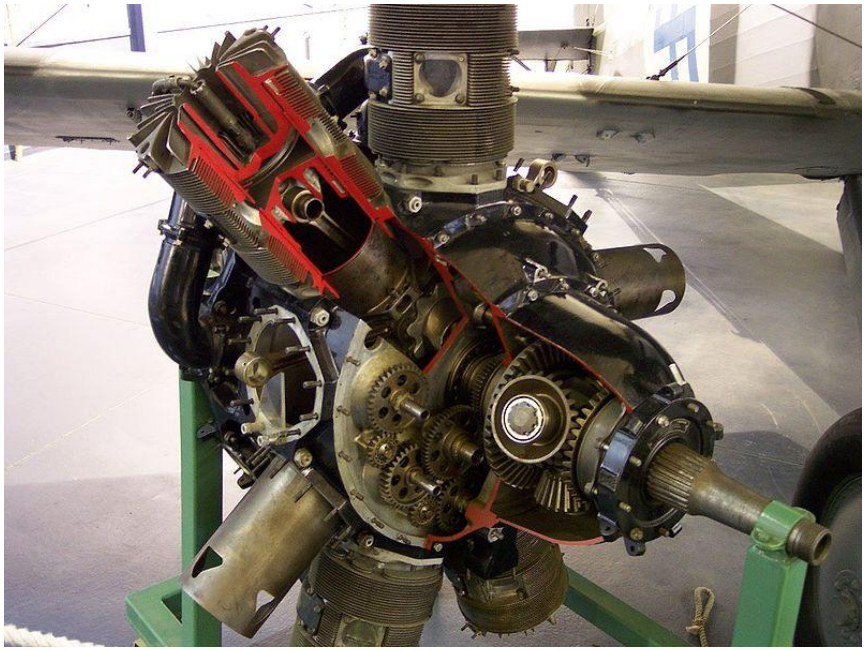
V roce 1936 vyvinula firma Bristol další motor se šoupátkovými rozvody. Jednalo se o model Hercules, což byl čtrnáctiválcový vzduchem chlazený hvězdicový motor. [5] [15] [21] [22]

Technické parametry motoru Bristol Perseus

Typ:	devítiválcový, hvězdicový, vzduchem chlazený motor
Vrtání:	146 mm
Zdvih:	165 mm
Objem:	24,8 litru
Hmotnost:	492 kg (bez provozních kapalin)
Rozvody:	šoupátka
Výkon:	694 kW (945 koní) při 2400 min^{-1}
Kompresní poměr:	6,75:1

Motor byl namontován v letounech:

Blackburn Botha	Bristol Bulldog	Bristol type 148
Gloster Goring	Hawker Hart	Westland Lysander



Obr. 41 Řez motorem Bristol Perseus [42]

4.5 ŠVECOV AŠ-82

AŠ-82 byl 14-ti válcový, vzduchem chlazený, hvězdicový motor, přeplňovaný kompresorem vyvinutý ruskou konstrukční kanceláří A. D. Švecova v roce 1940.

Obr. 42 Ruský hvězdicový motor Švecov AŠ-82 [43]

Motor AŠ-82 konstrukčně vycházel z Amerického motoru Wright R-1820 Cyklon, který byl v Rusku licenčně vyráběn pod označením M-25. Švecovova kancelář měla bohaté zkušenosti s úpravou motorů značky Wright na ruské podmínky. I když se konstrukčně jednalo téměř o identické motory, stejné nebyly. AŠ-82 byl upraven, co se týká výkonu, tak i rozměrů. Při zmenšení rozměrů se dosáhlo vyššího výkonu. Menší rozměry (motor měl o 100 až 200 mm menší čelní průměr oproti konkurenčním motorům) znamenaly konstrukční úpravu jednotlivých součástí motoru. Díky svým „kompaktním“ rozměrům mohl být motor osazen nejen do bombardovacích letounů, ale i do letounů stíhacích. AŠ-82 byl jeden z nejvýkonnějších čtrnáctiválcovvých motorů své doby.

Po skončení 2. Světové války se motor dále využíval. Stíhací letouny s tímto motorem byly i po válce dostatečně výkonné. Mimo jiné byl motor upraven a verze AŠ-82V a používala v ruském vrtulníku Mil Mi-4. [1] [3] [16]

Technické parametry motoru AŠ- 82

Typ:	čtrnáctiválcový, hvězdicový, vzduchem chlazený motor
Vrtání:	155,5 mm
Zdvih:	155 mm
Objem:	41,2 litru
Hmotnost:	868 kg (bez provozních kapalin)
Rozvody:	OHV rozvod, 2 ventily na válec
Výkon:	1268 kW (1700 koní) při 2600 min^{-1}
Kompresní poměr:	6,9:1

Varianty motoru:

AŠ- 82 -111

AŠ- 82- 112

AŠ -82 F

AŠ- 82 FN

AŠ- 82 T

AŠ- 82 V

Motor byl namontován v letounech:

Iljušin Il-12	Iljušin Il-14	Lavočkin La-5
Lavočkin La-7	Lavočkin La-9	Lavočkin La-11
MiG-5	Mil Mi-4	Peltjakov Pe-8

5 POROVNÁNÍ HVĚZDICOVÉHO MOTORU S MOTOREM S JINÝM USPOŘÁDÁNÍM VÁLCŮ

Není úplně opodstatněné srovnávat motory, z nichž jeden byl použit v letounech bombardovacích a druhý v letounech stíhacích. Aby bylo možné jednotlivé motory porovnávat, je podstatné, aby letouny s porovnávanými motory byly proti sobě nasazeny přímo ve vzduchu. K tomuto nejlépe slouží dva stíhací letouny 2. Světové války. Letoun s hvězdicovým motorem je Německý Focke-Wulf Fw 190, jeho přímým konkurentem nejen v boji, ale i v konstrukci motoru, byl Britský Supermarine Spitfire.

5.1 FOCKE-WULF FW 190

Konstruktérem, jenž stvořil jeden z nejlepších stíhacích letounů 2. Světové války, byl Kurt Tank. První prototyp jeho letounu odstartoval 1. června 1939 a byl osazen hvězdicovým motorem BMW 139. Letové výsledky byly výborné, letoun měl dobrou ovladatelnost a byl rychlý, ovšem volba motoru BMW 139 nebyl správnou volbou, motor se přehříval a teplota v kokpitu dosahovala až 45 ºC. U druhého prototypu bylo použito stejného motoru, ale změnilo se chlazení motoru, výsledek byl ovšem stejný.

Až v roce 1940 se letoun se svým třetím prototypem dostal do sériové výroby. Byl osazen hvězdicovým motorem BMW 801. Luftwaffe nutně potřebovala další stíhací letoun, a tak podnikla srovnávací testy se stíhačkou Messerschmitt Bf 109. Výsledky byly ohromující. Fw-190 měla lepší ovladatelnost, v nízkých výškách byla rychlejší a celkově měla robustnější konstrukci než Bf 109. Na druhou stranu měla horší stoupavost a ve výškách nad 6000 metrů byla pomalejší než Bf 109. Jelikož většina soubojů probíhala v nízkých výškách a Luftwaffe nutně potřebovala druhý typ stíhacího letounu, byla výroba schválena.

Obr. 43 Německý stíhací letoun Focke-Wulf Fw 190 [44]

Fw 190 byla poprvé nasazena v roce 1941 a rychle se vryla do paměti spojeneckého letectva. Nový typ letouny byl o třídu lepší než Spitfire páté generace a způsoboval spojencům těžké ztráty. Brzo si vysloužil přezdívku „Létající řezník“ pro jeho velkou palebnou sílu.

Focke-Wulf Fw 190 byl vyroben v počtu téměř 20 000 kusů. Sloužil jako stíhací letoun, stíhací bombardér, torpédový letoun, noční stíhač a průzkumný letoun. Využití letounu bylo všestranné. [8] [10] [20]

5.1.1 BMW 801

Jednalo se o 14-ti válcový, vzduchem chlazený, hvězdicový motor. Válce byly uspořádány do dvou hvězdic po sedmi válcích.

Firma BMW vyrobila motor v roce 1939. Motor se montoval do několika modelů letounů, ale největšího ohlasu získal jako motor pohánějící stíhací letoun Focke-Wulf Fw 190.

Jako většina tehdejších motorů byl i BMW 801 přeplňovaný. K přeplnění motoru bylo použito mechanicky hnaného dvourychlostního odstředivého kompresoru. Motor měl OHV rozvody se dvěma ventily na válec. Motor měl mazání se suchou skříní. Pro pohon vrtule byl použit reduktor s převodem 0,54:1. BMW 801 se vyráběl v několika verzích s výkonovým rozpětím od 1150 do 1470 kW. [10] [14] [20]

Obr. 44 Hvězdicový motor BMW 801[45]

Technické parametry motoru BMW 801

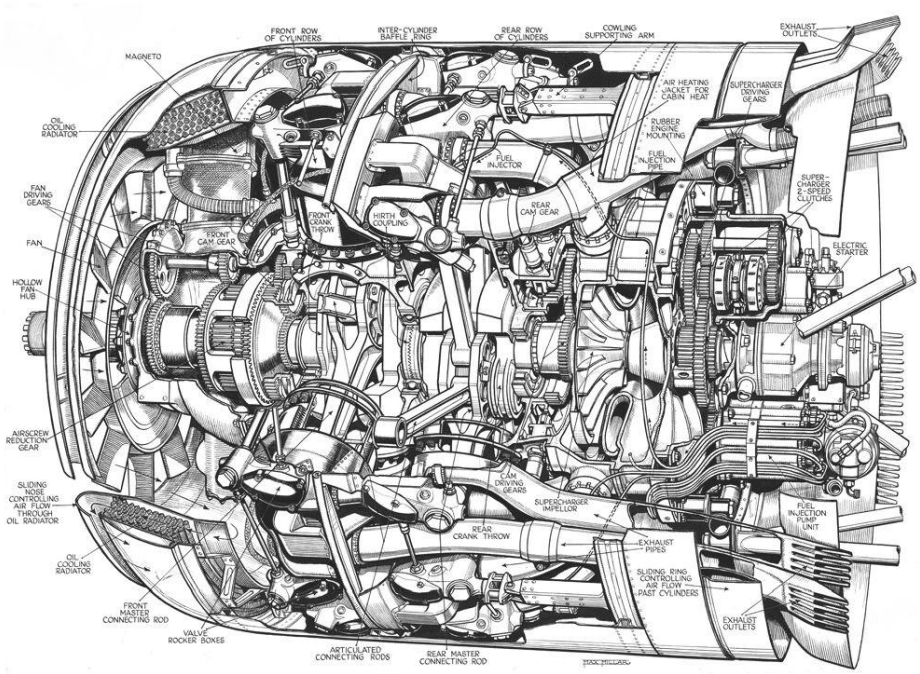
Typ:	čtrnáctiválcový, hvězdicový, vzduchem chlazený motor
Vrtání:	156 mm
Zdvih:	156 mm
Objem:	41,7 litru
Hmotnost:	1055 kg (bez provozních kapalin)
Rozvody:	OHV rozvod, 2 ventily na válec
Výkon:	1147 kW (1560 koní) při 2700 min^{-1}
Kompresní poměr:	6,5:1

Varianty motoru:

BMW 801 A, B, C	1147 kW
BMW 801 D, G, H	1250 kW
BMW 801 E, S	1471 kW
BMW 801 F	1765 kW

Motor byl namontován v letounech:

Focke-Wulf Fw 190	Junkers Ju 88	Junkers Ju 188
Junkers Ju 290	Junkers Ju 388	Junkers Ju 390
Dornier Do 217		



Obr. 45 Řez motorem BMW 801 [46]

5.2 SUPERMARINE SPITFIRE

Šéfkonstruktér firmy Supermarine Reginald Mitchell byl člověk, který stál za zrozením legendy jménem Spitfire. Firma Supermarine úzce spolupracovala s firmou Rolls-Royce, která vyráběla letecké motory. Rolls-Royce PV 12 byl dvanáctiválcový motor s válci do V. Jednalo se o motor, který byl odvozen ze závodních motorů a později dostal označení Merlin. A právě tomuto motoru byl uzpůsoben tvar letounu Spitfire. První prototyp s označením K 5054 vzlétl 5. března 1936.

První sériově vyráběný letoun vzlétl 14. května 1938. Díky své konstrukci a spolehlivosti se stal revolučním výtvorem. Tvar jeho křídel byl velice zvláštní, ale právě takový tvar křídel dovolil provádět ty neostřejší zatáčky bez rizika utržení křídla. Spitfire mohl v bojových podmínkách snášet přetížení až 9G.

Spitfire prvních čtyř generací se ukázal jako rovnocenný soupeř pro Messerschmitt Bf 109. Pátá generace Spitfiru předčila Bf 109 ve všech směrech. Spitfire byl rychlejší, lépe manévroval, rychleji stoupal a byl lépe vyzbrojen. Spitfire páté generace byl vyroben v nejvíce kusech, ale i přes to se nestal králem oblohy nad Evropou.

S příchodem Focke-Wulfu Fw 190 byl Spitfire 5 o třídu překonán. Nestačil na nový německý letoun v žádném ohledu. Britové se snažili o nové verze, ale žádná na Fw 190 nestačila. Bylo jasné, že pokud mají německý letoun porazit, musí přijít s novým letounem. Spitfire deváté generace byl zcela nový letoun. Dostal vylepšený motor Merlin 61 a měl zesílenou konstrukci. Tyto úpravy pomohly k tomu, byl Spitfire opět lepší. A byl to právě devátá generace, která se stala králem nebes nad Evropským kontinentem.

Obr. 46 Britský stíhací letoun Supermarine Spitfire[47]

Supermatine Spitfire bylo univerzální letadlo, sloužilo jako stíhač, stíhací bombardér, průzkumný a cvičný letoun. Vyrobilo se více jak 23 000 kusů letounu a celkem 24 verzí. Byl to jediný spojenecký stíhací letoun, který se vyráběl po celou dobu války. Reginald Mitchell vytvořil letoun, který se stal legendou, ovšem sám se nedožil toho, aby to spatřil. Zemřel v 1937 ve věku 42 let. [8] [9] [17]

5.2.1 ROLLS-ROYCE MERLIN 61

Jednalo se o dvanáctiválcový, kapalinou chlazený pístový motor, jehož válce byly uspořádány do V a svíraly spolu úhel 60º. Firma Rolls-Royce jej vyrobila v roce 1933. Motor byl licenčně vyráběn ve Spojených státech Amerických firmou Packard pod označením V-1650. Prototyp motoru byl odvozen ze závodního motoru.

Obr. 47 Motor V12 Rolls-Royce Merlin [48]

Válce byly vyrobeny z oceli s vysokým obsahem uhlíku. Hlavy válců byly zhotoveny z hliníkové slitiny. Kovaná hřídel byla jednodílná. Motor využíval přeplňování pomocí dvoustupňového mechanicky hnaného kompresoru. Dále bylo použito ventilového rozvodu s vačkovými hřídeli umístěnými nad ventily. Bylo použito čtyř ventilů na válec, dva sací a dva výfukové. Výfukové ventily byly chlazeny sodíkem. Motor Merlin byl vyroben v mnoha variantách. Motory se od sebe lišily výkony a konstrukčními prvky. [9] [17] [24]

Technické parametry motoru Rolls-Royce Merlin 61

Typ:	12-ti válcový, kapalinou chlazený, kompresorem přeplňovaný letecký motor, s válci do V svírající úhel 60º

Vrtání:	137 mm
Zdvih:	152 mm
Objem:	27 litru
Hmotnost:	744 kg (bez provozních kapalin)
Rozvody:	OHV rozvod, 4 ventily na válec, 2 sací a 2 výfukové
Výkon:	1178 kW (1580 koní) při 3000 min^{-1}
Kompresní poměr:	6:1

Vyrobené verze:

Merlin I, II, III, IV, V,…

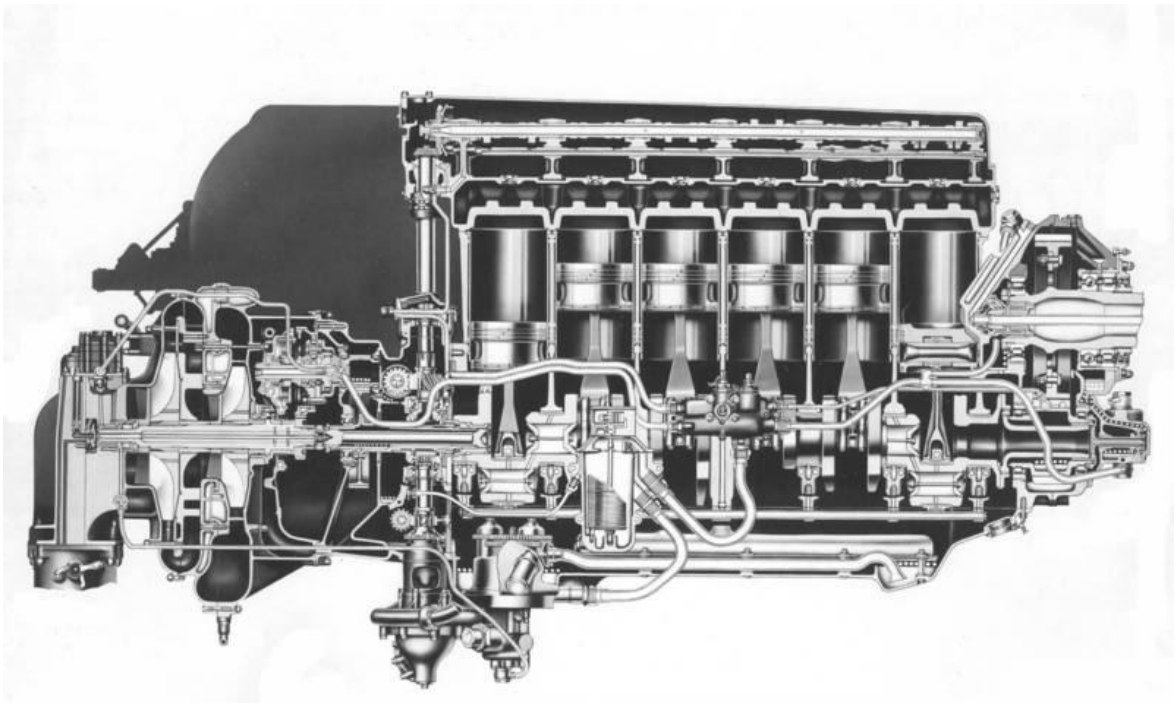
Merlin 21 – 85

Merlin 224, 225

Motor byl namontován v letounech:

Avro Athena	Avro Lancester	Hawker Hart
Hawker Henley	Renard R.38	Supermarine Spitfire
Supermarine Seafire	Tsunami Racer	Vickers Windsor,

a v mnoha dalších.



Obr. 48 Řez motorem Rolls-Royce Merlin [49]

5.3 POROVNÁNÍ

Oba motory využívaly ventilových rozvodů, u BMW byl použit klasický OHV rozvod a Merlin měl rozvody s vačkovými hřídeli umístěnými v hlavě nad ventily. U Merlinu je použito čtyř ventilů na válec, zatímco u BMW jen dva. To je dáno konstrukcí hlavy hvězdicového motoru, u kterého je použití dvou ventilů nejvýhodnější. Oba typy motorů využívají přeplňování pomocí kompresoru. Zásadní rozdíl je vidět ve váze motoru BMW, který je o 300 kilo těžší než Merlin.

Výhodou hvězdicového motoru bylo chlazení vzduchem. Odpadla potřeba kapalinové chladící soustavy a tím se zjednodušila konstrukce. Mezi nevýhody patřil velký čelní odpor motoru.

U motoru řadového nebo do V, které používaly chlazení kapalinou, byly výhody a nevýhody opačné. Díky úzkému a podlouhlému tvaru byl letoun aerodynamický a výhled dopředu byl lepší. Nevýhodou byl sám chladicí systém, který byl velice zranitelný. Po zásahu do chladicího systému se začal motor přehřívat a letoun nemohl dále pokračovat v letu.

5.4 ZHODNOCENÍ

Z historických podkladů lze vyčíst spoustu informací určujících, která konstrukce měla vyšší výkon, vyšší spolehlivost, nebo nižší váhu. Ale pokud dojde k porovnání jednotlivých verzí motorů, tak zjistíme, že pokud došlo k vylepšení jedné konstrukce, tak došlo i vylepšení konstrukce druhé. Soupeření v tom, která konstrukce bude mít vyšší výkon, dovedly jednotlivé konstrukce téměř k dokonalosti. Dalo by se říct, že co do výkonových charakteristik si byly hvězdicové a řadové motory rovny.

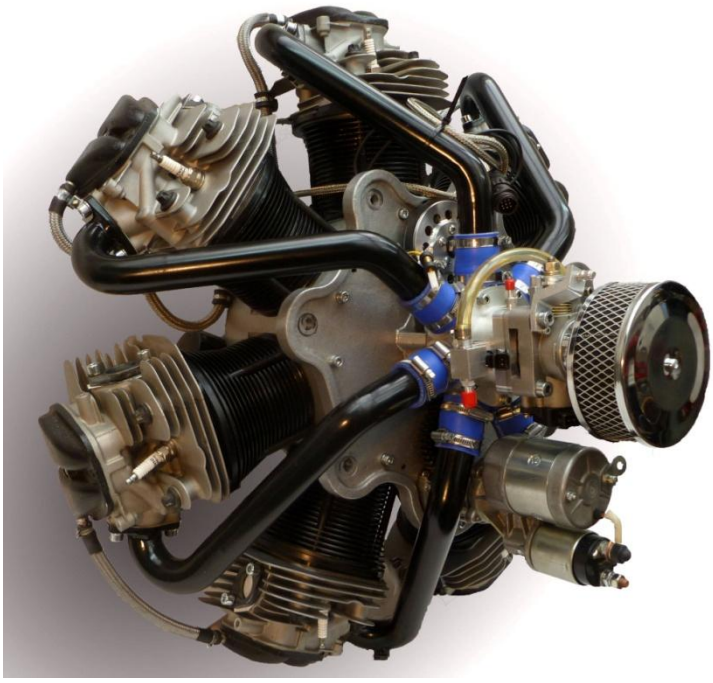
6 VYUŽITÍ LETADLOVÉHO HVĚZDICOVÉHO MOTORU V 21. STOLETÍ

V 21. století se jen těžko hledá využití motorů, které si svou největší slávu prožily ve 40. letech století minulého. Ale i přes tuto skutečnost se v dnešní době najde využití pro tento zajímavý typ motoru.

Řada hvězdicových motorů našla uplatnění jako exponáty v technických muzeích po celém světě. Vystavují se buď to v celkové podobě, nebo jsou částečně rozřezány, aby byl vidět každý detail jejich konstrukce.

Dalším odvětvím, kde se dnes používá hvězdicových motorů, je svět modelářství. Řada modelů je poháněna zmenšenými replikami hvězdicových motorů. Někteří modeláři jsou velice zruční a dokážou hvězdicový motor vyrobit doma. Motory do modelů mohou být naprosto přesnými replikami motorů originálních, nebo jsou z důvodů rozměrů a jednoduchosti částečně pozměněny.

Hvězdicový motor se používá do ultralehkých letounů a do replik stíhačů z první světové války a právě k tomuto účelu vyrábí firma Verner Motor hvězdicový motor své vlastní konstrukce. Firma pochází z obce Vikýřovice u Šumperka.



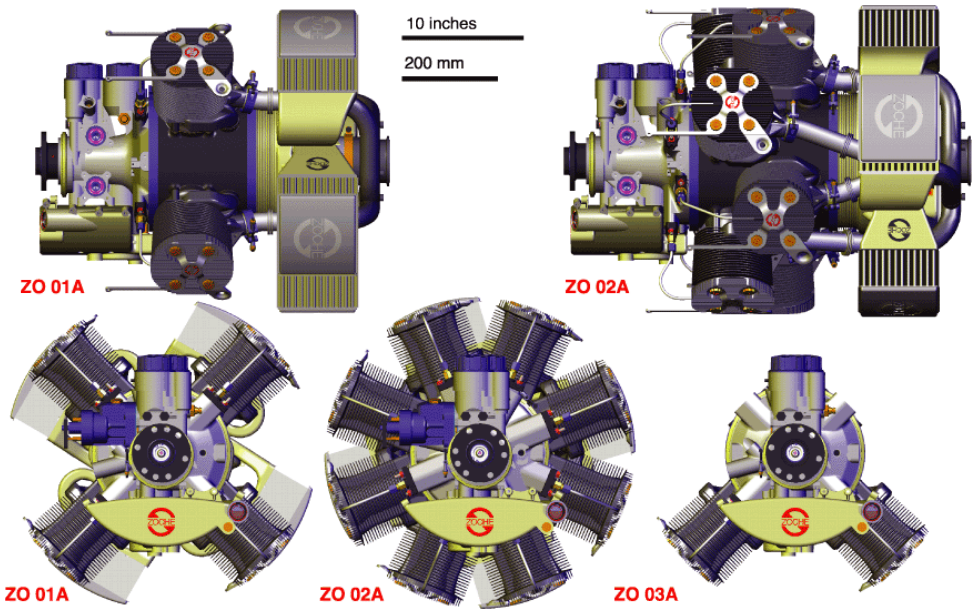
Obr. 49 Hvězdicový motor Scarlett 7H [50]

Tato firma vyrábí motor Scarlett 7H. Jedná se o sedmiválcový čtyřdobý vzduchem chlazený motor o obsahu 4,1 litru. Nejvyšší výkon je 110 koní při 2300 otáčkách za minut, maximální točivý moment 342 Nm při stejných otáčkách. Sání je provedeno pomocí karburátoru a

ventily jsou ovládány klasickým OHV rozvodem. Scarlett 7H je velice kompaktní motor s hmotností 78 kg. [18]

Obr. 50 Replika letounu Fokker Dr. I s motorem Scarlett 7H [51]

Další firmou, která se v dnešní době zajímá výrobou hvězdicového motoru, je Německá firma Zoche. Firma vyvíjí několik typů pístových naftových motorů a jedním typem je osmiválcový naftový hvězdicový motor. Při konstrukci bylo využito moderních materiálů a motor využívá přeplňování kompresorem. Motor je ve fázi vývoje a testování. [19]



Obr. 51 Jednotlivé typy pístových motorů firmy Zoche [52]

ZÁVĚR

Letadlové hvězdicové motory sehrály významnou roli ve vývoji letadlový motorů. Pro svoji netypickou konstrukci se odlišovaly od motorů ostatních konstrukcí. Jednalo se o konstrukčně zajímavý počin, který sklízel úspěchy hlavně v době 2. Světové války. Pro svou robustní konstrukci a výhodu vzduchového chlazení měly tyto motory obrovskou odolnost, jak po stránce tepelného, tak mechanického namáhání.

Mohlo by se zdát, že motory této konstrukce nebyly vhodnou alternativou pro pohon letounů právě z důvodů své robustní konstrukce, která měla za následek vyšší váhu a velký čelní odpor. Ovšem opak je pravdou. V historii by bylo možné jen stěží najít bombardovací letouny s řadovými motory. Pro svou malou délku byly vhodné pro umístění na křídlech těžkých bombardérů, jako například Boeing B-17 a Boenig B-29.

S postupem let se začaly objevovat stále nové a lepší konstrukce motorů. V dnešní době se využití hvězdicového a obecně pístového letadlového motoru omezilo na minimum. Většinou jsou vystaveny v muzeích, kde připomínají roky minulé. I přesto se naleznou firmy, které tento motor vyrábějí.

Vyslovit přímý závěr a rozhodnout tak, jestli byl hvězdicový motor lepší nebo horší, než motory ostatních konstrukcí, je nemožné. Tento závěr je závislý na pohledu jednotlivce. Lze říci, že hvězdicový motor je zajímavou a stejně dobrou konstrukcí letadlového motoru, jako konstrukce řadové a s válci do V.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

[1] KOCÁB, J., ADAMEC, J. *Letadlové motory*. KANT, První vydání, Praha, 2000, 175 s., ISBN 8090291406

[2] MASLENNIKOV, M. M., RAPIPORT, M. S. *Letadlové pístové motory Díl 1*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955, 354 s.

[3] MASLENNIKOV, M. M., RAPIPORT, M. S. *Letadlové pístové motory Díl 2*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955, 419 s.

[4] KOŠŤÁL, J., SUK, B. *Pístové spalovací motory*. Nakladatelství Československé akademie věd, První vydání, Praha, 1963, 830 s.,

[5] MACKERLE, J. *Automobily a letadla: rozvod motoru : Učeb. text pro vyš. strojnic. šk., strojnic. šk. a pro automobilní a letecká odd. těchto šk.* 2. pozměn. vyd. Praha: Státní nakladatelství učebnic, 1951, 218, [1] s.

[6] *Naftové motory čtyřdobé: určeno pro vývojové a projekční pracovníky, konstruktéry naftových motorů i technický dorost vysokých i vyšších technických škol*. 2. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1962-1964, 2 sv., obr. příl.

[7] *Letecký motor Walter K14-I a II: Popis a návod k obsluze a udržování*. Praha-Jinovnice: Akciová společnost Walter, Továrny na automobily a letecké motory.

[8] *Nové universum A-Ž: všeobecná encyklopedie*. 1. vyd. V Praze: Knižní klub, 2003, 1303 s. ISBN 802421069x.

[9] *Supermarine Spitfire* [dokumentární film]. Scénář a režie Dave Flitton. Velká Británie, Classic Picture Entertaiment, 2001.

[10] *Focke-Wulf Fw 190* [dokumentární film]. Scénář a režie Robert Garofalo. Velká Británie, Classic Picture Entertaiment, 1999.

[11] Pístové letecké motory. In: *Palba.cz* [online]. 2008 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: http://www.palba.cz/viewtopic.php?t=3027

[12] Le Rhône Rotary Engine. In: *The Aviation History On-Line Museum.* [online]. 2001 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: http://www.aviation-history.com/engines/rotary.htm

[13] Inside the radial engine. In: *The Aviation History On-Line Museum.* [online]. 2001 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: http://www.aviation-history.com/engines/radial.htm

[14] *Enginehistory.org* [online]. [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: http://www.enginehistory.org/German/BMW/BMW801.pdf

[15] *Flightglobal.com* [online]. 2010 [cit. 2014-05-14]. 2010 Dostupné z: http://www.flightglobal.com/pdfarchive/view/1933/1933%20-%201057.html

[16] Švecov AŠ-82-111. In: *Valka.cz* [online]. 2007 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: http://forum.valka.cz/viewtopic.php/t/54643

[17] Supermarine Spitfire. In: *Valka.cz* [online]. [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: http://airwar.valka.cz/britanie/spitfire/index.php

[18] *Vernermotor.cz* [online]. [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: http://www.vernermotor.com/CZ/index.html

[19] *Zoche aero-diesels* [online]. [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: http://www.zoche.de/

[20] Focke-Wulf Fw 190 A. In: *Palba.cz* [online]. 2007 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: http://palba.cz/viewtopic.php?f=112&t=1888&hilit=hv%C4%9Bzdicov%C3%A9+motory&sid=a5388fee5a87140a3d7358763a3e42ab

[21] Bristol Mercury. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Bristol_Mercury?oldid=118096379

[22] Bristol Perseus. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Bristol_Perseus

[23] Walter K-14. In: *Forum.valka.cz* [online]. 2007 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: http://forum.valka.cz/viewtopic.php/t/36364

[24] Rolls-royce merlin. In: *History leasing site* [online]. 2010 [cit. 2014-05-14]. Dostupné z: http://www.historylearningsite.co.uk/merlin_engine.htm

[25] Walterjinonice.cz. [online]. [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://www.walterjinonice.cz/

[26] Everything started from this. In: *Euroaviamilano.org* [online]. 2010 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://www.euroaviamilano.org/bovisa/modules/news/index.php?storytopic=4

[27] Le Rhone 9. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Le_Rh%C3%B4ne_9C.jpg

[28] Bristol Mercury XV. In: *Aircraft engine* [online]. [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://www.aircraftengine.cz/Alverca/

[29] BMW 132. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:BMW_132_3.jpg

[30] Historic B-17 flights coming to Atlanta. In: *Rockdalenews.com* [online]. 2013 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://www.rockdalenews.com/archives/14392/

[31] Fighters & Legends Chance Vought F4U-5N Corsair. In: *Warbirddepot.com* [online]. [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://www.warbirddepot.com/aircraft_fighters_f4u5-fal.asp

[32] ŠIMÍČEK, Petr. *Hlavní ojnice* [fotografie]. Vikýřovice: Verner Motor, 28-3-2014 [cit. 2014-5-16].

[33] ŠIMÍČEK, Petr. *Vedlejší ojnice* [fotografie]. Vikýřovice: Verner Motor, 28-3-2014 [cit. 2014-5-16].

[34] ŠIMÍČEK, Petr. *Klikový hřídel* [fotografie]. Vikýřovice: Verner Motor, 28-3-2014 [cit. 2014-5-16].

[35] Nieuport 11 - 3D model project. In: *Theaerodrome.com* [online]. 2012 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://www.theaerodrome.com/forum/art/56009-nieuport-11-3d-model-project.html

[36] Le Rhone 9C. In: *Aircraftengine.cz* [online]. [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://www.aircraftengine.cz/Alverca/

[37] Podnikatelská historie společnosti Walter. In: *Walterjinonice.cz* [online]. 1996 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://www.walterjinonice.cz/historie-spolecnosti-walter

[38] Packard DR-980 Diesel. In: *Enginehistory.org* [online]. [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://www.enginehistory.org/G&jJBrossett/USAF/Packard%20DR-980%20Diesel.JPG

[39] Aviation Engines Packard. In: *Oldengine.org* [online]. [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://www.oldengine.org/members/diesel/duxford/Packard.htm

[40] Aviation Pages Diesel Aviation engines Page 1. In: *Oldengine.org* [online]. [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://www.oldengine.org/members/diesel/duxford/aviat.htm

[41] Bristol Perseus. In: *Aircraftengine.cz* [online]. [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://www.aircraftengine.cz/Bodo/

[42] Bristol Perseus sleeve valve radial engine. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Bristol_Perseus_sleeve_valve_radial_engine.jpg

[43] Švecov AŠ-82. In: *Aircraftengine.cz* [online]. [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://www.aircraftengine.cz/Laatzen/#%C5%A0vecov%20A%C5%A1-82T%20%281%29.jpg

[44] Ultimate Soldier 1:18 Luftwaffe Planes. In: *Akfiles.com* [online]. 2013 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://www.akfiles.com/forums/showthread.php?t=134933

[45] Авиационные двигатели фирм Siemens/Bramo BMW по материалам Карла Престеля. In: *Alternathistory.org.ua* [online]. 2013 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://alternathistory.org.ua/aviatsionnye-dvigateli-firm-siemensbramo-bmw-po-materialam-karla-prestelya

[46] *Ww2aircraft.net* [online]. 2009 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://www.ww2aircraft.net/forum/engines/what-do-cooling-fans-do-18933.html

[47] 4: Supermarine Spitfire. In: *Http://richardgentles1.wordpress.com* [online]. 2012 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://richardgentles1.wordpress.com/2012/01/05/4-supermarine-spitfire/

[48] Rolls-Royce Merlin XX. In: *Aircraftengine.cz* [online]. [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://www.aircraftengine.cz/Alverca/#RollsRoyce%20Merlin%20XX%20%283%29.JPG

[49] Rolls Royce Merlin Engine - The Most Unmistakeable Sound Of WW2. In: *Learning-to-fly.com* [online]. [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://www.learning-to-fly.com/rolls-royce-merlin.html

[50] Scarlett 7. In: *Facebook: Verner Motor* [online]. 2014 [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: https://www.facebook.com/photo.php?fbid=717804684949570&set=pb.273456786051031.-2207520000.1400243370.&type=3&theater

[51] Fokker Dr.I. In: *Facebook: Verner Motor* [online]. [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: https://www.facebook.com/photo.php?fbid=715662491830456&set=pb.273456786051031.-2207520000.1400243370.&type=3&theater

[52] Zoche aero-diesels. In: *Zoche.de* [online]. [cit. 2014-05-16]. Dostupné z: http://www.zoche.de/specs.html

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	[ms^{-2}]	zrychlení pístu
a_d	[ms^{-2}]	obvodové zrychlení
F	[N]	Síla působící na píst
F_r	[N]	Setrvačná síla hmotností součástí konajících rotační pohyb
F_s	[N]	Setrvačná síla hmotností součástí pohybujících se přímočaře
F_Σ	[N]	Celková síla působící v ose válce
i	[-]	Počet válců
i_N	[-]	Převodový poměr nesouosého reduktoru
i_S	[-]	Převodový poměr souosého reduktoru
k	[$Wm^{-2}K^{-1}$]	Součinitel prostupu tepla
K	[N]	Složka celkové síly působící v ose ojnice
L	[m]	Délka ojnice
Mk	[Nm]	Krouticí moment
m_p	[kg]	Hmotnost součástí pohybujících se přímočaře
m_r	[kg]	Hmotnost součástí konajících rotační pohyb
n	[min^{-1}]	Otáčky motoru
N	[N]	Normálová složka celkové síly působící v ose válce
p	[Pa]	Tlak na píst
p_0	[Pa]	Tlak okolního prostředí
Q	[J]	Teplo procházející stěnou válce
R	[m]	Poloměr kliky
S	[m2]	Plocha pístu
s	[m]	Dráha pístu
t	[s]	čas
T	[N]	Tangenciální složka síly působící v ose ojnice
v	[ms^{-1}]	Rychlost pohybu pístu
v_0	[ms^{-1}]	Obvodová rychlost
X_p	[-]	Počet vaček při otáční vačkového kotouče proti směru otáčení klikového hřídele
Xs	[-]	Počet vaček při otáčení vačkového kotouče ve směru otáčení klikového hřídele
Y_p	[-]	Převod mezi vačkovým kotoučem a klikovým hřídele ve směru opačného otáčení
Ys	[-]	Převod mezi klikovou hřídelí a vačkovým kotoučem ve stejném směru otáčení
z_1	[-]	Počet zubů hnacího kola reduktoru
z_2	[-]	Počet zubů hnaného kola nesouosého reduktoru
z_3	[-]	Počet zubů pevného kola souosého reduktoru
α_1	[$Wm^{-2}K^{-1}$]	Součinitel přestupu tepla
α_2	[$Wm^{-2}K^{-1}$]	Součinitel přestupu tepla
β	[°]	Úhel vychýlení ojnice
Δt	[K]	Rozdíl teplo
λ	[-]	Klikový poměr
λ_0	[$Wm^{-1}K^{-1}$]	Součinitel tepelné vodivosti

Z	[N]	Normálová složka síly působící v ose ojnice
α	[°]	Úhel natočení klikového hřídele
γ	[°]	Úhel mezi zapalujícími válci
ω	[s^{-1}]	Úhlová rychlost

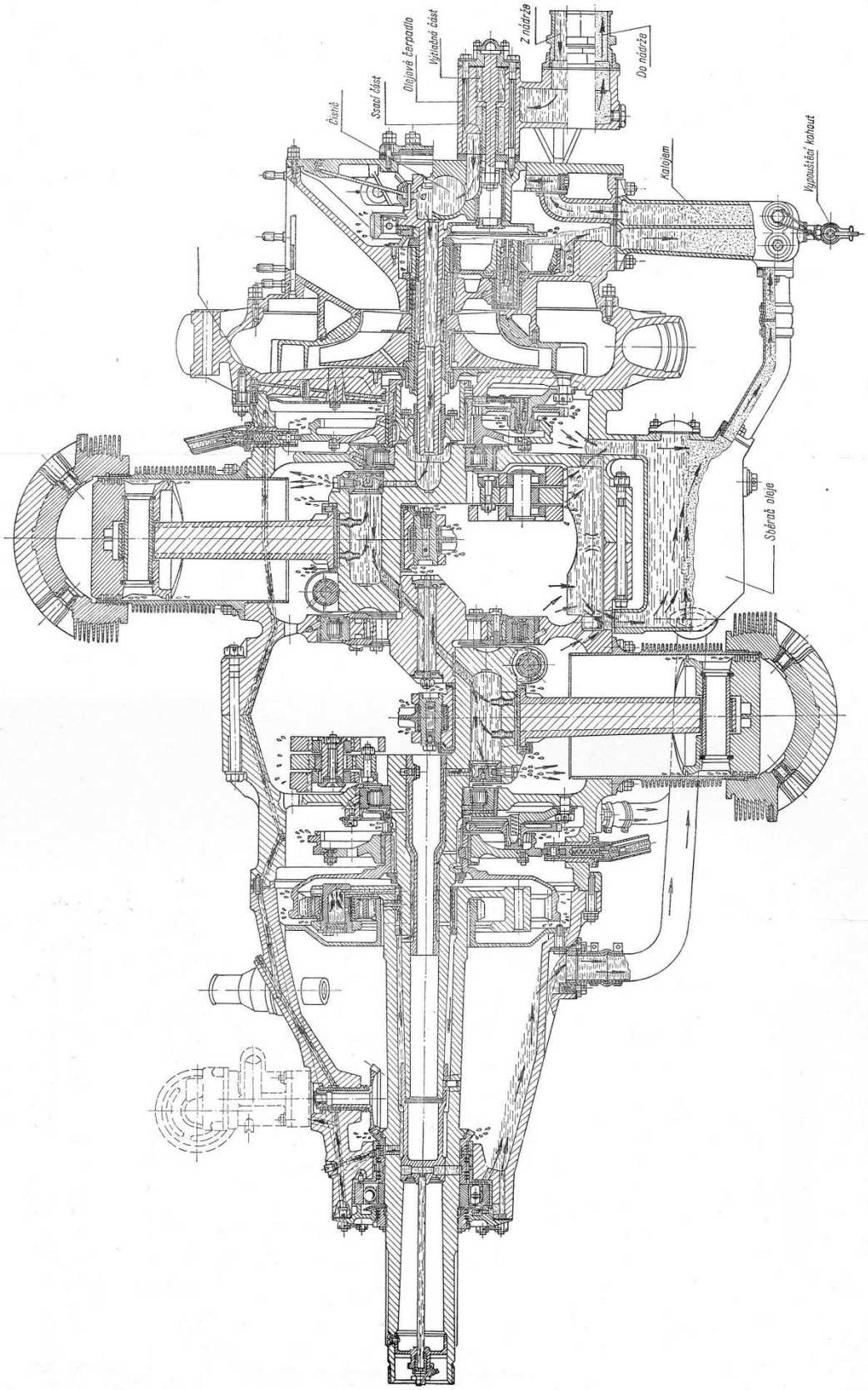
SEZNAM PŘÍLOH

P1 Schéma vnitřní mazací soustavy motoru AŠ-82

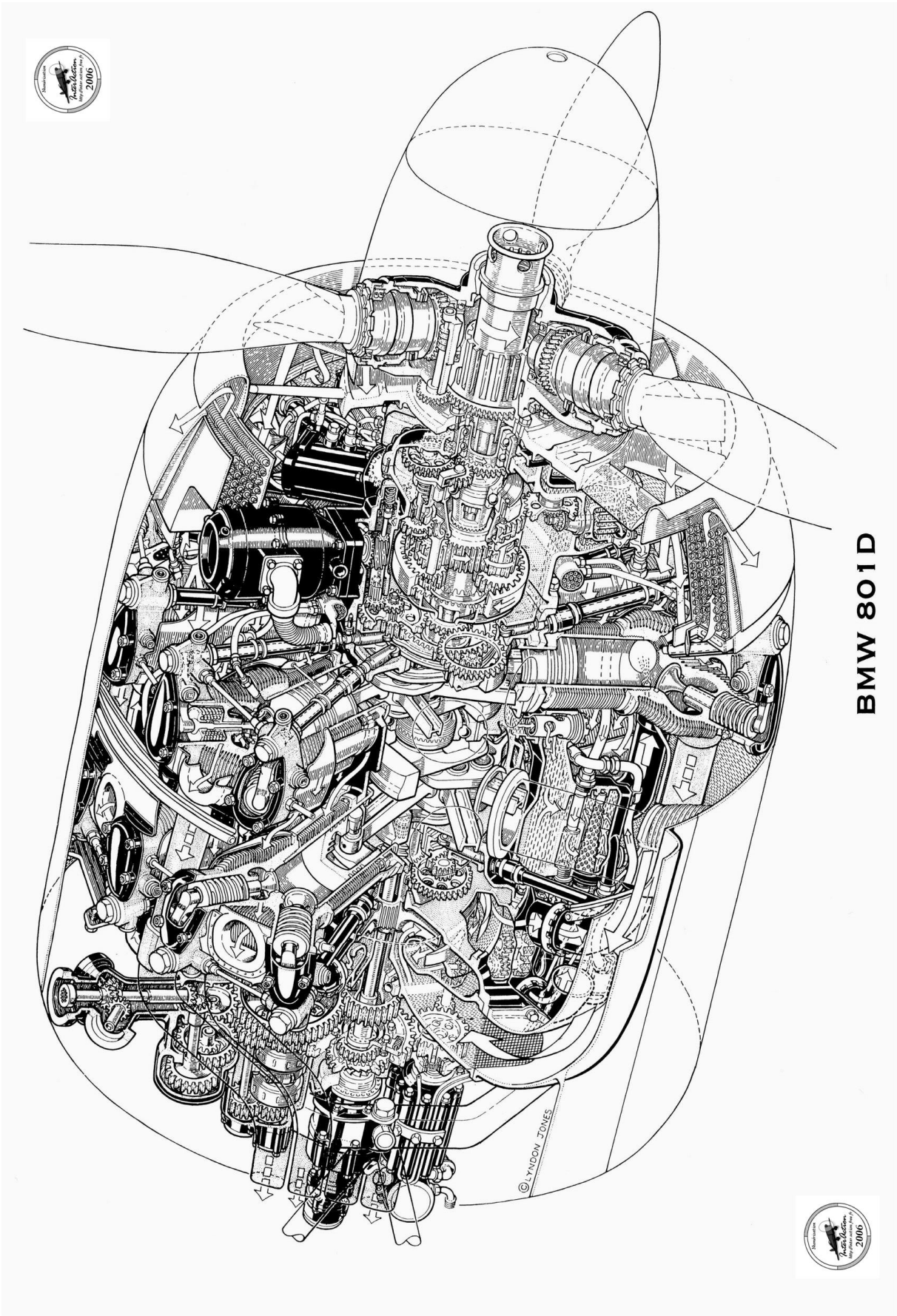
P2 Řez motoru BMW 801D

P3 Řez motoru Rolls-Royce Merlin

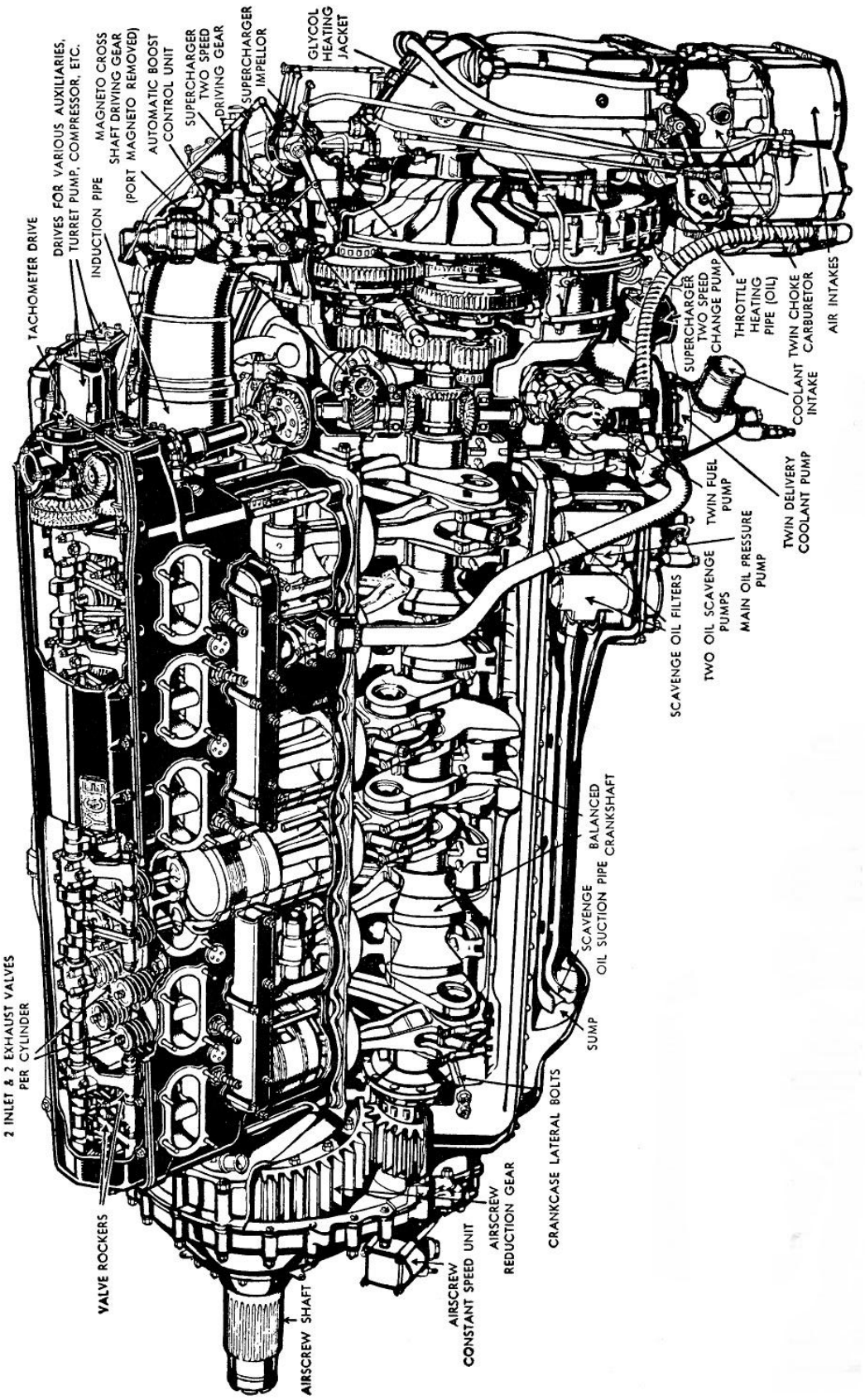
P4 Řez motoru Bristol Hercules



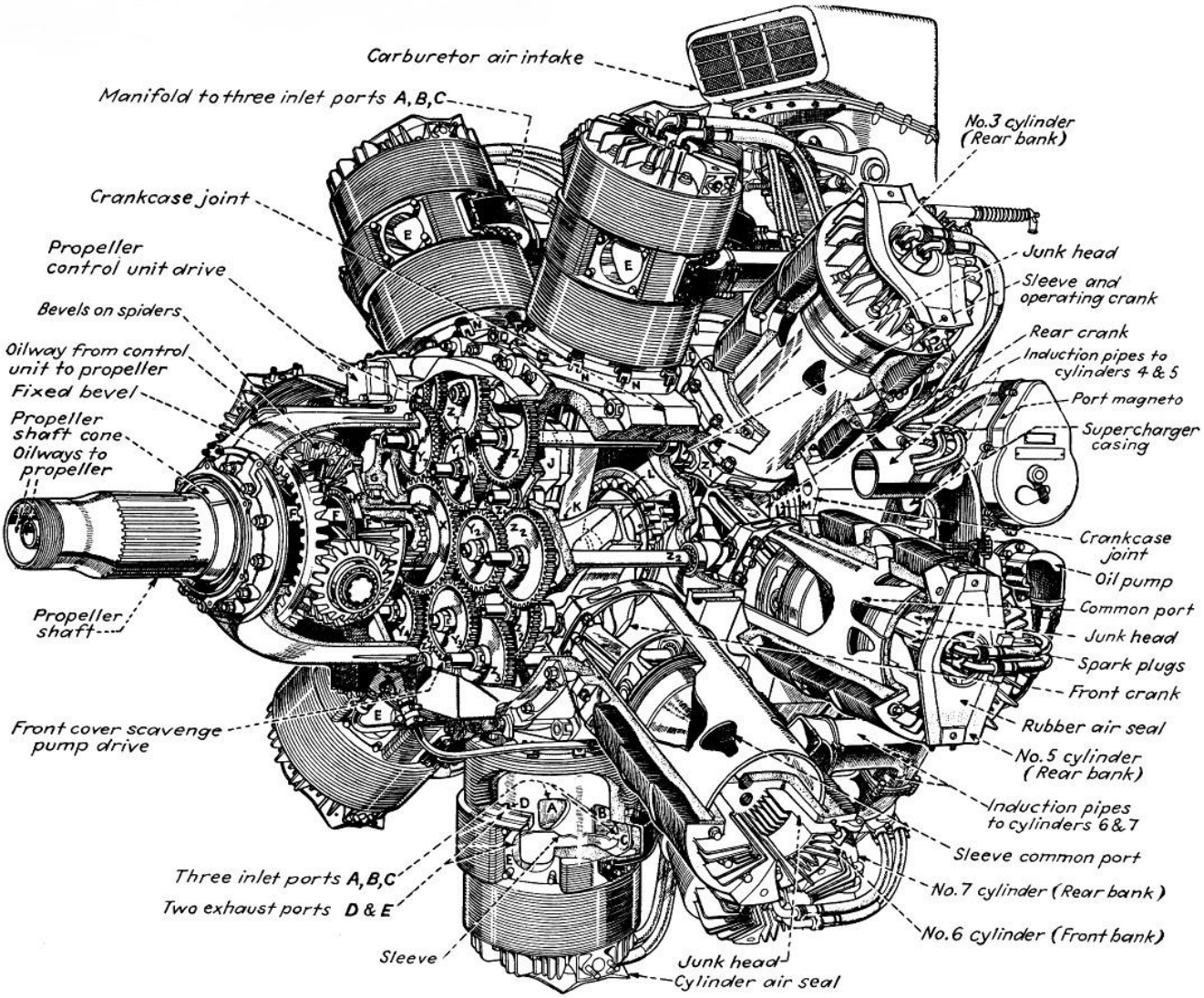
Příloha 1 Schéma vnitřní mazací soustavy motoru AŠ-82



Příloha 2 Rez motoru BMW 801



Příloha 3 Řez motoru Rolls-Royce Merlin



Příloha 4 Řez motoru Bristol Hercules