



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**KONSTRUKČNÍ SKUPINY MALÉHO PÍSTOVÉHO
PARNÍHO MOTORU S PŘIHLÉDNUTÍM K POŘIZOVACÍM A
PROVOZNÍM NÁKLADŮM**

PARTS OF STEAM PISTON ENGINE IN RELATION TO THEIR PRICE AND OPERATING COSTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Uryč

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Jan Uryč**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

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:

Konstrukční skupiny malého pístového parního motoru s přihlédnutím k pořizovacím a provozním nákladům

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pístové parní motory byly vždy účinnější při nižších výkonech než parní turbíny. Jejich rozšíření ovšem brání relativně vysoké pořizovací a provozní náklady. Úkolem této bakalářské práce by mělo být přibližné vyčíslení těchto nákladů.

Cíle bakalářské práce:

- (1) Popis činnosti pístového parního motoru.
- (2) Popis základních konstrukčních skupin pístového parního motoru.
- (3) Predikce výrobních a provozních nákladů malého pístového parního motoru se šoupátkovým rozvodem jednoválcovým a dvouválcovým s dělenou expanzí páry.
- (4) Porovnání výrobních nákladů a parametrů dvou výše zmíněných motorů. V závěru by také měl být zmíněn vliv nákladů na pořízení technologie pro výrobu a kondenzaci páry, tak malých jednotek.

Seznam literatury:

ŠKORPÍK, Jiří. Pístový parní motor (Parní stroj), Transformační technologie, 2010-06. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/pistovy-parni-motor-parni-stroj.html>. English version: Steam piston engine. Web: http://www.transformacni-technologie.cz/en_pistovy-parni-motor-parni-stroj.html.

KLÁG, Josef. Parní stroje a turbíny-Obsluha a provoz, 1952. 1. vydání. Praha: ROH-prac-vydavatelství knih.

RODA, Antonín. Parní motory, 1948. 1. vydání. Praha: Státní nakladatelství v Praze.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

V této práci je popsána stavba a princip pístového parního motoru. Obsaženy jsou základní konstrukční skupiny rozdělené podle jejich funkce. Dále obsahuje predikci výrobních nákladů malého pístového parního motoru se šoupátkovým rozvodem jednoválcovým a dvouválcovým s dělenou expanzí páry. Následuje porovnání parametrů, pořizovacích a provozních cen obou motorů. V závěru je zmíněn vliv nákladů na pořízení technologie pro výrobu a kondenzaci páry, tak malých jednotek.

ABSTRACT

This thesis describes structure and working principle of steam piston engine. The basic construction parts are included and divided according their function. Next it contains prediction of production costs of small steam piston engines with piston valve: simple expansion engine and compound engine. Then the comparison of parameters, production and operating costs of both engines follows. Finally there is mentioned a influence of buying the technology for the steam production and condensation, such small units.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pístový parní motor, parní stroj, dělená expanze páry, konstrukční skupina, výrobní náklady, provozní náklady

KEYWORDS

Steam piston engine, compound engine, splitted expansion of the steam, construction parts, production costs, operating costs

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

URYČ, J. *Konstrukční skupiny malého pístového parního motoru s přihlédnutím k pořizovacím a provozním nákladům*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 50 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Škorpík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Konstrukční skupiny malého pístového parního motoru s přihlédnutím k pořizovacím a provozním nákladům vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

20. května 2016

.....
Jan Uryč

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Jiřímu Škorpíkovi, Ph.D. za cenné podklady, připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 POPIS PÍSTOVÉHO PARNÍHO MOTORU (PPM).....	12
1.1 SPECIFIKACE PPM JAKO TEPELNÉHO MOTORU.....	12
1.2 USPOŘÁDÁNÍ PPM.....	13
1.3 POPIS ČINNOSTI PPM.....	15
1.4 TERMODYNAMICKÝ POPIS.....	16
2 KONSTRUKCE PPM.....	18
2.1 HLEDISKA ROZDĚLENÍ PPM.....	18
2.2 DĚLENÁ EXPANZE PÁRY (DEP).....	22
2.3 ZÁKLADNÍ KONSTRUKČNÍ SKUPINY PPM.....	24
2.3.1 <i>Hnací ústrojí</i>	24
2.3.2 <i>Rozvod</i>	27
2.3.3 <i>Parní válec a rám stroje</i>	29
3 PREDIKCE VÝROBNÍCH A PROVOZNÍCH NÁKLADŮ PPM.....	31
3.1 NÁVRH ROZMĚRŮ MOTORU.....	31
3.2 VÝROBNÍ NÁKLADY DÍLŮ MOTORU.....	32
3.2.1 <i>Způsob naceňování</i>	32
3.2.2 <i>Výrobní náklady zakázkových dílů</i>	34
3.2.3 <i>Ostatní součásti</i>	38
3.3 PROVOZNÍ NÁKLADY.....	38
4 POROVNÁNÍ.....	40
4.1 NÁKLADY A PARAMETRY PPM.....	40
4.2 ZAŘÍZENÍ PRO PROVOZ PPM.....	44
ZÁVĚR.....	46
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	47
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	50

ÚVOD

Pístový parní motor (dále PPM), též známý jako parní stroj, byl převratným vynálezem, jenž se zasloužil o rozvoj průmyslu a dopravy na celém světě. Jeho vznik umožnily objevy v 17. století ohledně tlaku a jeho účinků. První úspěšný pístový stroj pracoval díky podtlaku v pístu vzniklém kondenzací syté vodní páry. Vytvořil jej Angličan Thomas Newcomen. Tyto motory dosahovaly velmi malých účinností a jejich uplatnění bylo značně omezené. Využity byly tam, kde se nevyplatil pohon vodním kolem nebo byl úplně nedostupný. V první polovině 18. století tedy našly využití pro čerpání vody ze zatopených dolů, kde se doposud využívalo již nedostačujících sil člověka nebo tažného zvířete.

Výrazné vylepšení přišlo v druhé polovině 18. století, kdy anglický vynálezce James Watt přišel s novou koncepcí pístového motoru. Pára se stala pracovním médiem a působila na píst svým přetlakem střídavě z obou stran. Díky klikovému mechanismu a setrvačníku, dokázal tento motor vyvinout plynulý rotační pohyb a stát se pohonem pro různá zařízení na celé další století. Začal konkurovat anebo nahrazovat dosud využívané zdroje energie. Průmyslová výroba se přesouvala z manufaktur poháněných vodním kolem do továren poháněných PPM, lodě již nebyly závislé na síle větru, parní lokomotivy dokázaly přepravit mnohem více nákladu než koňský potah.

Přelom 19. a 20. století se stává vrcholným obdobím PPM. V následujících letech začíná ustupovat novým druhům pohonu, jako jsou parní turbíny, spalovací a elektrické motory. V 50. letech mizí z výrobních programů strojírenských podniků.

Laikovi by se mohlo zdát, že parní stroj je dávno překonaný a patří do minulosti. V současnosti se s ním setká pouze v muzeu nebo při mimořádné jízdě vlaku taženého parní lokomotivou, která však jako technický klenot nepřestává fascinovat a přitahovat pozornost. PPM si přesto na některých místech udržel své postavení - zvláště tam, kde se již využívá páry pro průmyslové účely nebo vytápění.

Cílem této práce je popsat činnost PPM, jeho konstrukční skupiny a odhadnutí nákladů na pořízení a provoz dvou druhů malých PPM a jejich porovnání. Tyto náklady patří mezi rozhodující faktory výběru vhodného druhu pohonu pro dané potřeby. Tím tudíž částečně odpovídají na otázku, za jakých podmínek se pohon pístovým parním motorem vyplatí.

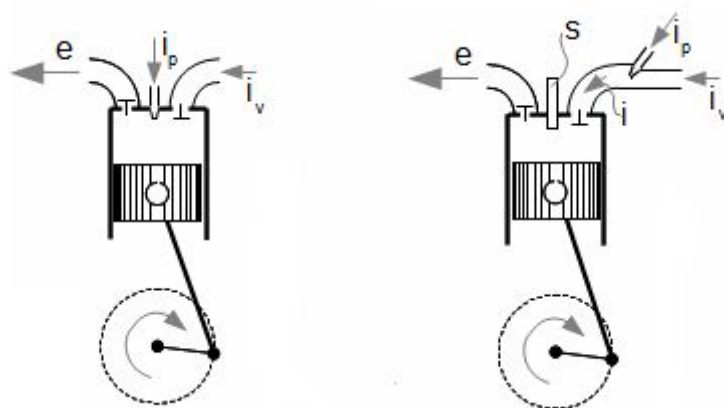
1 POPIS PPM

1.1 Specifikace PPM jako tepelného motoru

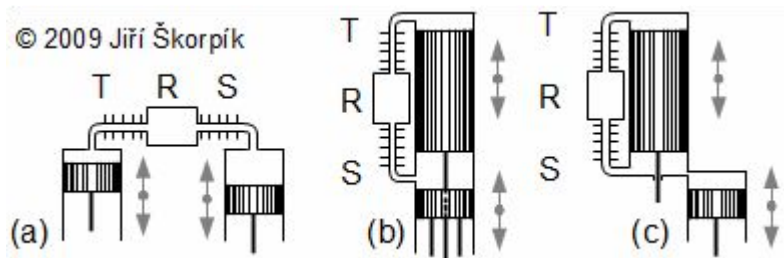
Tepelné motory jsou zařízení, která přeměňují část vnitřní energie pracovní látky na mechanickou práci. Lze je rozdělit na dvě skupiny:

- Motory s vnitřním zdrojem tepla nebo též spalovací motory využívají energie získané z exotermické reakce hoření paliva v pracovním prostoru. Z toho vyplývají specifické nároky na palivo, které omezují jeho výběr.
- Druhou skupinou jsou motory s vnějším přívodem tepla. V tomto případě je teplo získáváno spalováním paliva nebo jiným způsobem mimo pracovní prostor motoru. Výhodou je možnost použití libovolných paliv s ohledem na jejich dostupnost a cenu. Nevýhodou zpravidla bývají ztráty při předávání tepla ze zdroje do pracovního prostoru motoru.

Mezi tepelnými motory se rozlišuje několik druhů pístových motorů. Motory zážehové a vznětové řadíme do spalovacích motorů. Pracovní látkou jsou plyny vzniklé hořením obvykle benzínu nebo nafty v pracovním prostoru. Ze skupiny motorů s vnějším přívodem tepla lze jmenovat parní a Stirlingův.



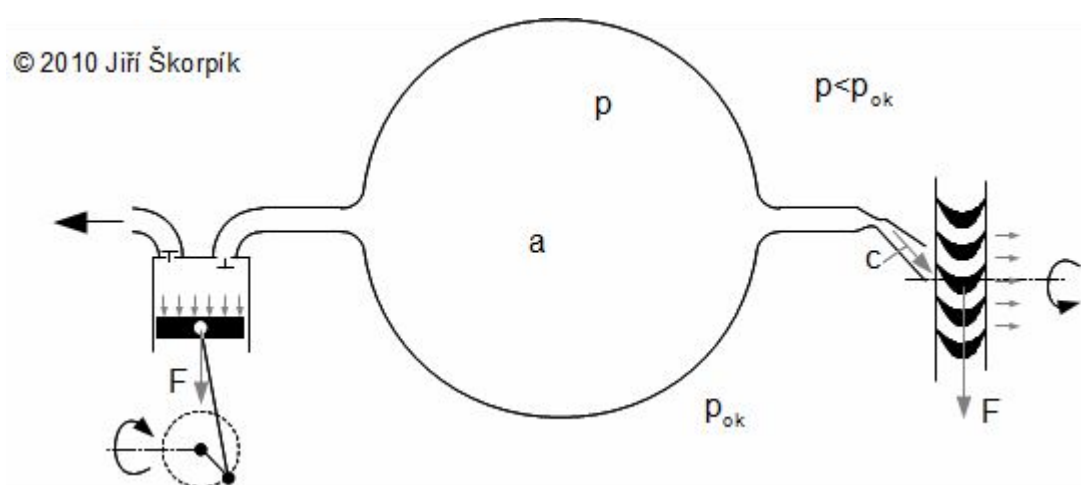
obr. 1.1: Schéma vznětového (vlevo) a zážehového (vpravo) spalovacího motoru [5]
(i_p - vstup paliva, i_v - vstup vzduchu, e - emise spalin, s - zapalovací svíčka)



obr. 1.2: Schéma tří různých uspořádání Stirlingova motoru [6]
(T - teplá strana motoru, S - studená strana motoru, R - regenerátor)

Stirlingův se vyznačuje tím, že má zcela uzavřený pracovní prostor, bez ventilů. Pracovní látkou pak mohou být různé plyny, často však jí je vzduch. Teplo je do pracovního prostoru přiváděno vedením přes teplosměnné plochy.

Parní motory přivádějí teplo do pracovního prostoru ve vodní páře. Co se týká parních motorů, je nutno rozlišit motory lopatkové a pístové. Lopatkové motory nazýváme turbíny. Generují technickou práci – pára prochází, ideálně za konstantního objemového průtoku, přes rotor osazený lopatkami, přičemž se její tlak snižuje. Rotor se otáčí a generuje práci na hřídeli. Naproti tomu u pístového motoru koná pára objemovou práci – v uzavřeném prostoru pracovního válce zvyšuje svůj objem, přičemž píst koná translační pohyb, který se obvykle převádí na rotační pomocí klikového mechanismu. Otáčky se pak u pístových motorů pohybují v řádu stovek za minutu, zatímco u turbín v řádu tisíců za minutu. [3,7]



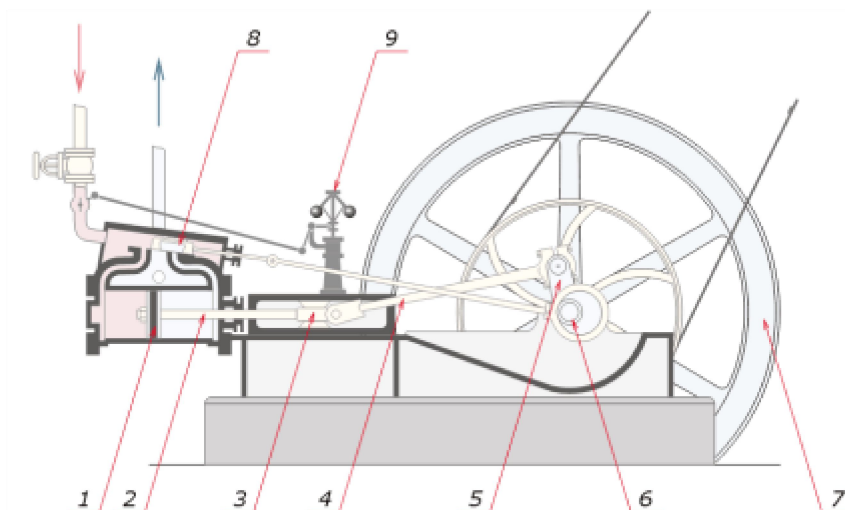
obr. 1.3: Schématický rozdíl pístového a lopatkového motoru [7]

(a - zásobník páry o tlaku p [MPa], F [N] - síla, c [ms^{-1}] - rychlost, p_{ok} [kPa] - tlak okolní)

1.2 Uspořádání PPM

Základním prvkem PPM je válec, ve kterém je pohyblivě uložený píst nasazený na pístní tyč. Pracovní prostor válce je uzavřený a propojený parním kanálem k rozvodu páry - ten zajišťuje střídavé vpouštění a vypouštění páry z válce. Síla způsobená tlakem páry na píst koná při posuvu pístu mechanickou práci, která je odváděna pístní tyčí mimo válec a převádí se na pracovní stroj. Výše zmíněné prvky jsou z principiálního hlediska nezbytnou součástí každého pístového parního motoru. Avšak mimo to obsahují motory další části, podle jejich druhu a účelu.

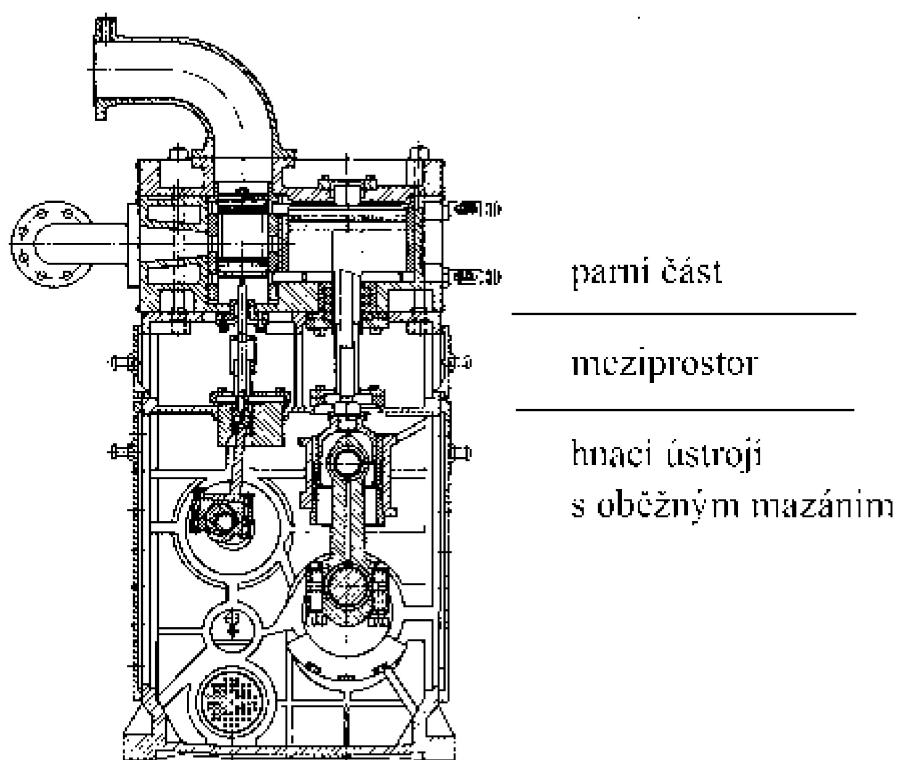
Následuje popis motoru dvojčinného s klikovým mechanismem, jakožto nejběžnějšího zástupce pístového parního motoru, viz obr. 1.4



obr. 1.4: Části PPM [10]

Na válci jsou vřata, která uzavírají pracovní prostor. Pára působí na píst (1) střídavě z obou stran. Pístní tyč (pístnice) (2) je vedena utěsněným otvorem v předním víku ke křížáku s vedením (3). Odtud se vratný translační pohyb přenáší ojnicí (4) na kliku (5), čímž se mění v pohyb rotační. Kliku pohání hřídel a s ní i setrvačnick (7) a výstředník neboli excentr (6), pomocí kterého je řízen rozvod páry, v tomto případě pomocí šoupátka (8). Součástí motoru je i regulátor (9), který reguluje přívod páry tak, aby udržoval stabilní otáčky. Celý motor je připevněn k rámu, jenž je základnou motoru.

Moderní rychloběžné motory jsou kompaktně uloženy v skříňových blocích, které umožňují jednoduché mazání rozstřikem, viz obr. 1.5. [3,4]



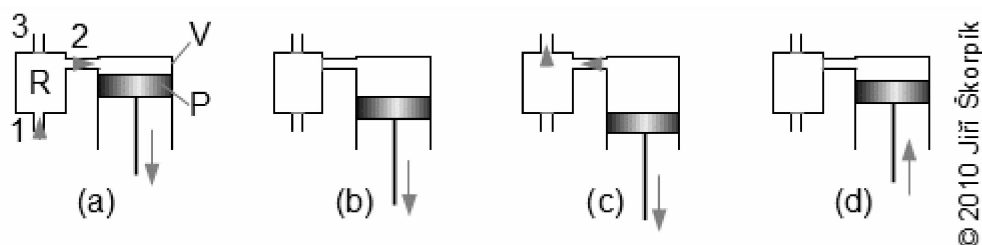
obr. 1.5: Průřez moderním rychloběžným PPM [8]

1.3 Popis činnosti PPM

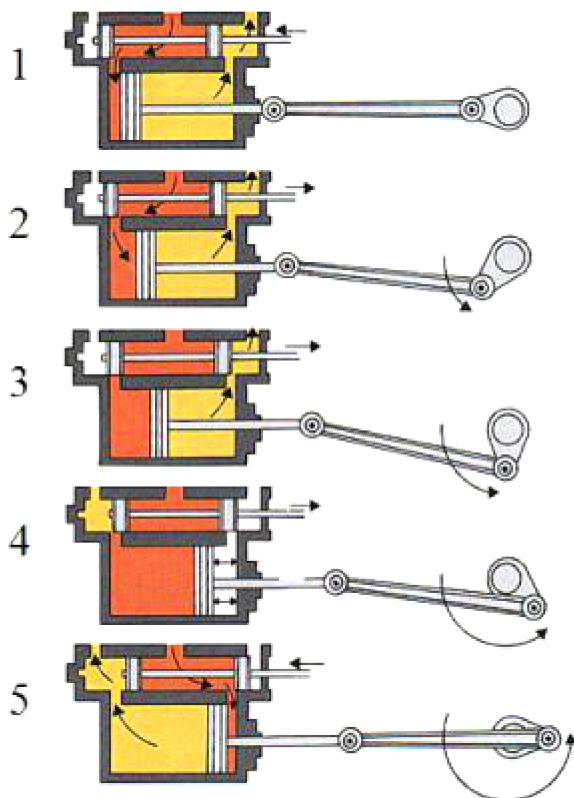
Při chodu motoru se píst ve válci pohybuje vratným pohybem mezi dvěma krajními polohami: horní a dolní úvratí. Rovněž se nazývají mrtvými body, neboť stroj nejde z této polohy rozběhnout. Síla od tlaku páry působí kolmo na směr pohybu kliky, tudíž práce je nulová. Při běhu motoru pomáhá tyto body překonat setrvačnick.

Jeden pracovní cyklus PPM lze rozdělit na čtyři části:

- Plnění (admise) - přes rozvod proudí pára o vysokém tlaku do válce
- Expanze - pára expanduje ve válci (snižuje se tlak páry a zvyšuje její objem)
- Výfuk (emise) - pára o nízkém tlaku vystupuje z válce
- Komprese – zbylá pára ve válci je stlačována



obr. 1.6: Části pracovního cyklu PPM v jedné komoře
(1-přívod páry, 2-parní kanál, 3-výfuk, V-válec, P-píst) [8]



obr. 1.7:

Průběh cyklu dvojčinného PPM

(jedná se o lokomotivní motor s rozvodem pístovými šoupátky, červené části představují admisi a expanzi, žluté části výfuk, bílá oblast v okamžiku 4 značí kompresi). [9]

Přelomy jednotlivých fází, kdy se otevírají nebo uzavírají přístupové kanály do válce, se nazývají rozvodové okamžiky.

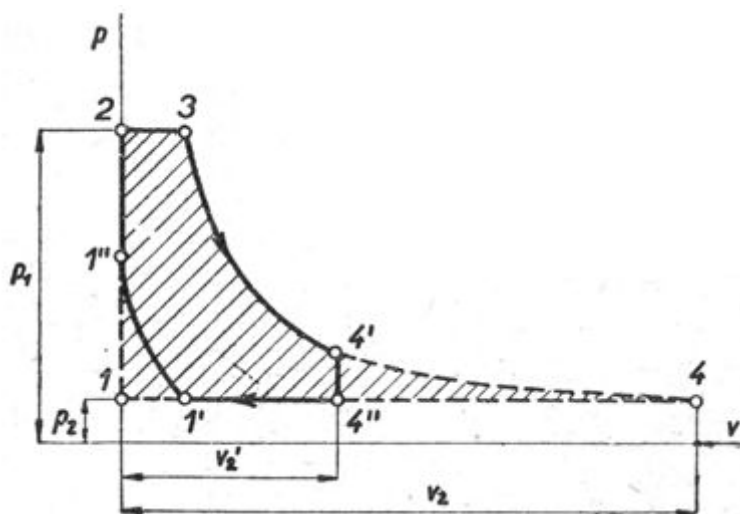
U dvojčinných motorů probíhá pracovní cyklus na obou stranách pístu. Je však vůči sobě posunut o půl periody. Tento fakt demonstruje obr. 1.7. V okamžiku 1 probíhá nalevo od pístu fáze plnění, napravo fáze výfuku. Po půlotáče probíhají tyto fáze na opačných stranách pístu.

1.4 Termodynamický popis

Pro termodynamický popis cyklu PPM se využívá p - V diagram. Jedná se o grafické zobrazení tlaků páry ve válci jako funkci objemu, který souvisí se zdvihem pístu. Cyklus je v diagramu znázorněn jako uzavřená křivka. Plocha uvnitř křivky je prací vykonanou během jednoho oběhu.

Ideální pracovní cyklus (viz obr. 1.8) je složen z několika termodynamických dějů: vstup páry probíhá izobaricky (2-3), následuje adiabatická expanze na výfukový tlak (3-4) a dále se opět izobaricky pára vyfukuje (4-1). Cyklus uzavírá izochora stoupající na admisní tlak (1-2).

Expanze je u PPM ukončena předčasně (4'-4''), neboť tlak poblíž hodnoty výfuku je již příliš nízký na to, aby překonal odpory mechanismů. Dále se zavádí adiabatická komprese (1'-1''), aby se snížil rozdíl tlaků mezi admisí a emisí a tím i náraz páry na píst.



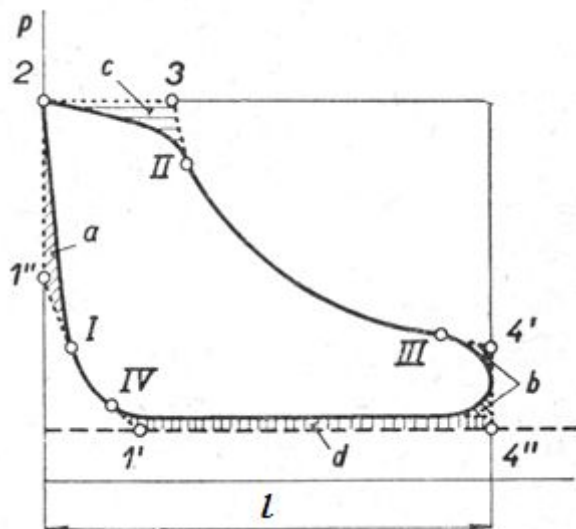
obr. 1.8: Ideální pracovní cyklus PPM

(p - tlak [Pa], p_1 - admisní tlak, p_2 - emisní tlak, v - měrný objem [m^3kg^{-1}], v_2 - objem válce při úplné expanzi, v_2' - objem válce při předčasně ukončené expanzi) [1]

Ideální oběh předpokládá co nejefektivnější přeměnu tepla na mechanickou práci, je složen z vratných dějů (beze ztrát). Jeho diagram se nazývá porovnávací. Slouží k poměření se skutečným oběhem. Podílem obsahů cyklu skutečného ku ideálnímu se dostane vnitřní termodynamická účinnost.

Skutečný oběh (viz obr. 1.9) je složen z nevratných dějů, které v sobě zahrnují ztráty. Vpouštění a vypouštění páry jakož i otvírání a zavírání parních kanálů jsou děje, které potřebují určitý čas. Za tu dobu však píst změní svoji polohu. To je jedním

z důsledků ztrát v skutečném oběhu. Reálný (indikovaný) oběh je možné zjistit za chodu na hotovém PPM pomocí indikátoru.



obr. 1.9: Reálný oběh PPM

(p - tlak [Pa], l - rozmezí zdvihu pístu, a, b, c, d - ztráty, I - začátek admise, II - konec admise, III - začátek emise, IV - konec emise, začátek komprese) [1]

2 KONSTRUKCE PPM

Snaha zefektivnit a aplikovat PPM pro různé podmínky a účely dala vzniknout velkému množství jeho modifikací. Existuje mnoho kritérií, jak je rozdělovat. Od konstrukce motoru se odvíjí i podoba jeho konstrukčních skupin.

2.1 Hlediska rozdělení PPM

- Podle stavu admisní páry mohou být motory na páru sytou nebo přehřátou. S ohledem na její spotřebu (a spotřebu oleje u mazaných válců) je jednoznačně výhodné použití přehřáté. PPM je také schopen pracovat s parou mokrou a to lépe než turbína.
- Podle tlaku admisní páry se ujal rozlišení na stroje nízkotlaké (do 1 MPa), stroje na střední tlaky (do 2 MPa), vysokotlaké (nad 2 MPa) a stroje na nejvyšší tlaky (nad 5 MPa)
- Podle velikosti plnění se PPM rozlišuje na expanzní a plnotlaké, kdy působí po celý zdvih pístu plný tlak páry - stoprocentní plnění. To se využívá vyjíměčně, například u parních bucharů (viz obr. 2.1). Motor může být konstruován na plnění fixní nebo proměnlivé, je-li potřeba měnit výkon stroje, případně smysl pohybu.



obr. 2.1: Parní buchar v činnosti [11]

- Použitá pára z motoru je odváděna do kondenzátoru, kde zkapalní nebo může být vyfukována do okolí. Toho se využívá v případě parních lokomotiv, kdy se pro jednoduchost stroje použítá pára vyfukuje komínem do ovzduší, také se tím podpo-ruje tah v kotli (viz obr. 2.2).
- Tlak výfukové páry (protitlak) se liší podle konstrukce motoru; kondenzační stroje vytváří zkapalněním páry podtlak, takže pára nabývá (absolutních) hodnot až

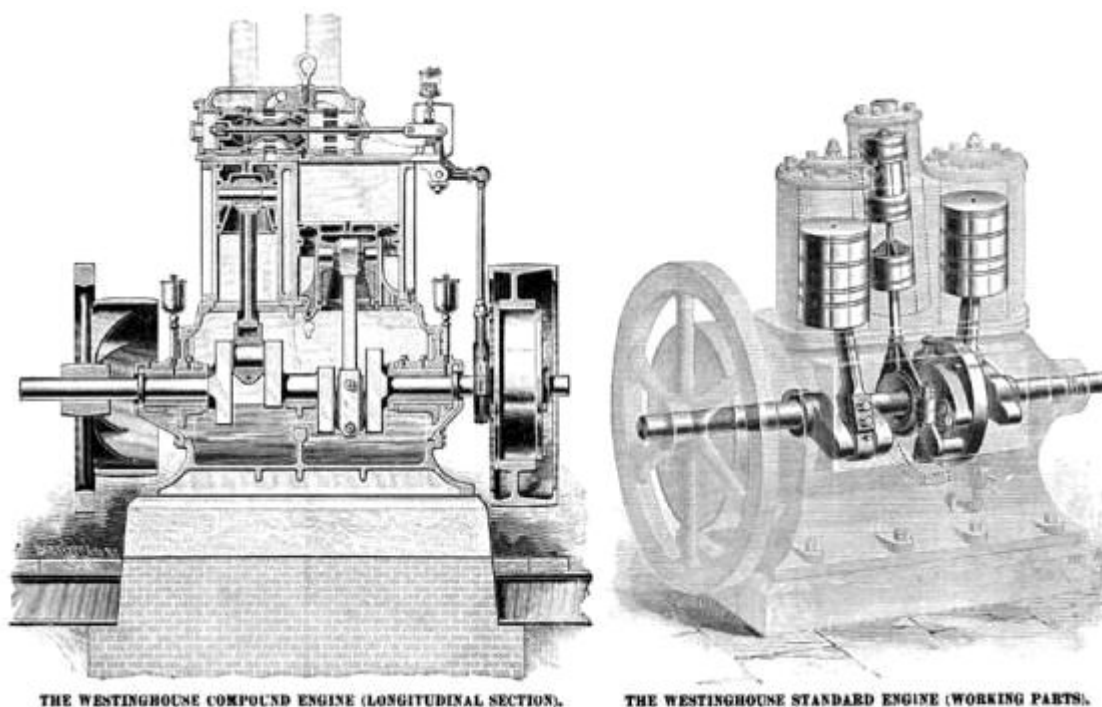
10 kPa, protitlak výfukových motorů se pohybuje kolem 10 kPa nad tlakem okolního vzduchu. Přetlak odchozí páry u protitlakových strojů je ještě vyšší a dále se jí využívá (např. na vytápění).



obr. 2.2: Parní lokomotivy

(kouř vycházející z komínů je z větší části tvořen emisní párou) [12]

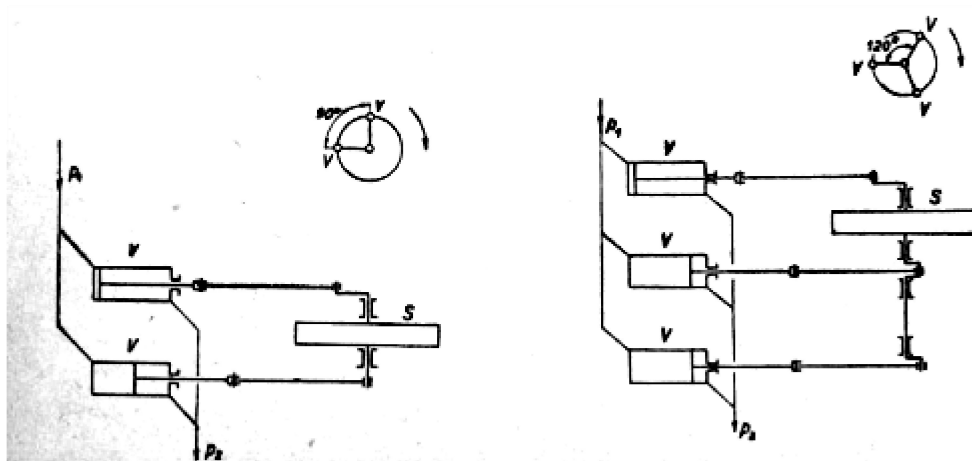
- Z hlediska působení páry na píst se rozlišují motory jednočinné, kde pára působí vždy pouze na jednu stranu pístu, a dvojčinné, kde pára střídavě tlačí na píst z obou stran. Jednočinné PPM bývají ojedinělou záležitostí. Viz obr. 2.3.



obr. 2.3: Jednočinné PPM vyrobené firmou Westinghouse Machine Co.

(vlevo řez dvouexpanzním motorem, vpravo pohyblivé části dvojčitého motoru) [13]

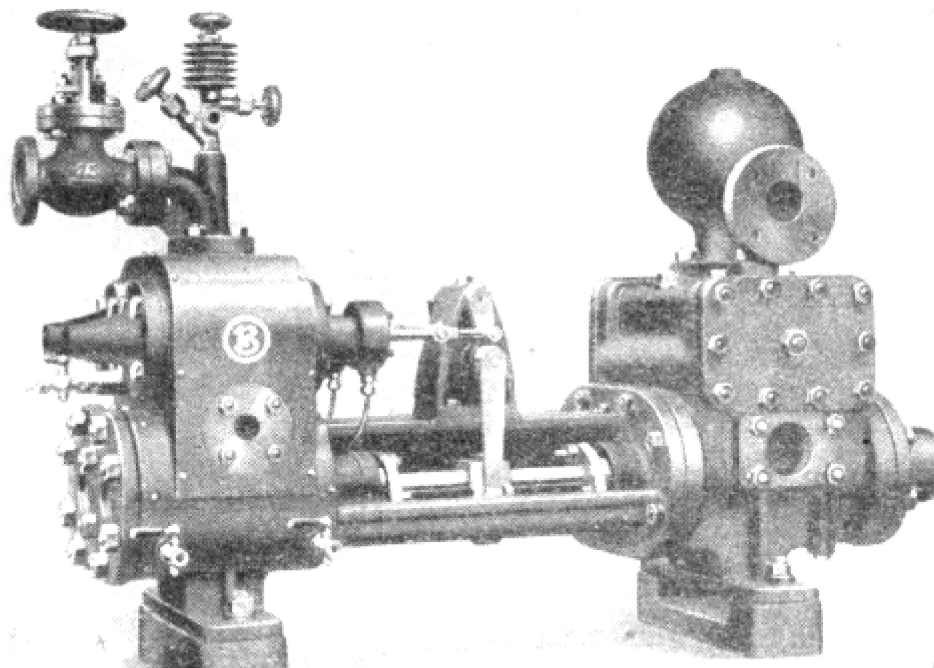
- Podle polohy válců mohou být motory ležaté, stojaté případně šikmé.
- Podle počtu válců existují PPM jednoválcové a víceválcové - ty mohou být podle přívodu páry řazeny paralelně (stroje dvojčité, trojčité atd.) nebo v sérii (viz oddíl 2.2 Dělení expanze páry). Paralelně uspořádané válce mají každý vlastní přívod páry z jednoho, společného zdroje (viz obr. 2.4).



obr. 2.4: Schéma dvojčitého a trojčitého PPM

(*V* - válec, *S* - setrvačnik, *p₁* - přívod páry ze zdroje, *p₂* - odvod použité páry) [1]

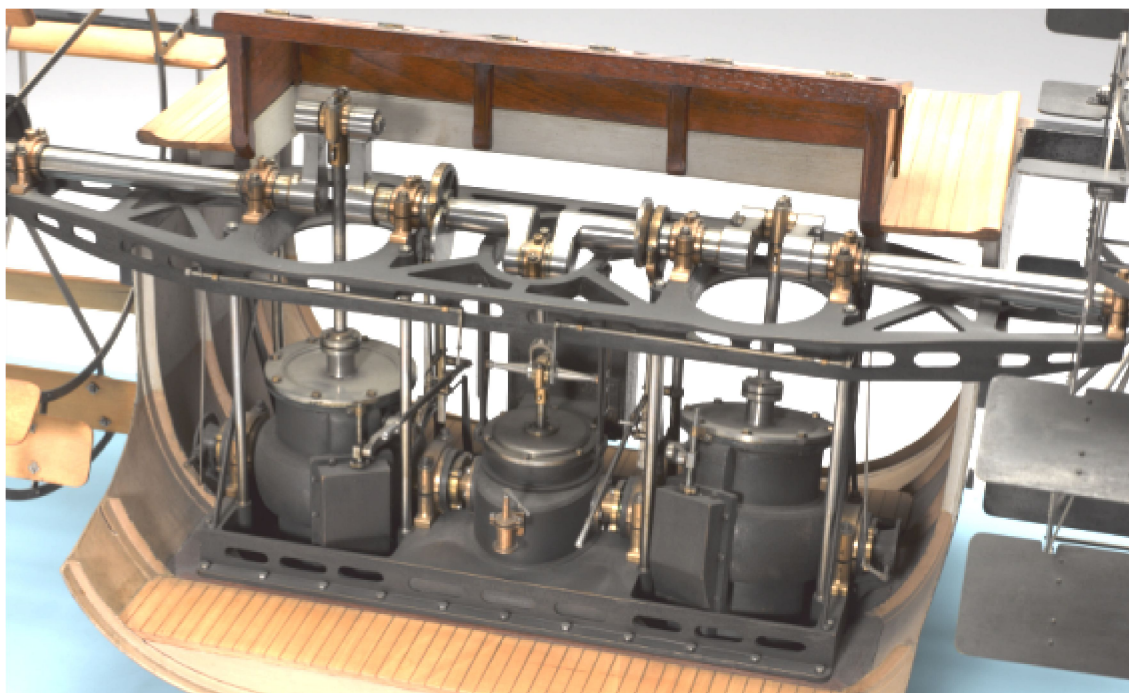
- Práce konaná pístem se nejčastěji převádí na rotační pohyb na hřídeli pomocí klikového mechanismu. Některá zařízení však toto nepotřebují, pohon je napojen přímo na pístní tyč (viz obr. 2.5).



obr. 2.5: Parní čerpadlo Duplex

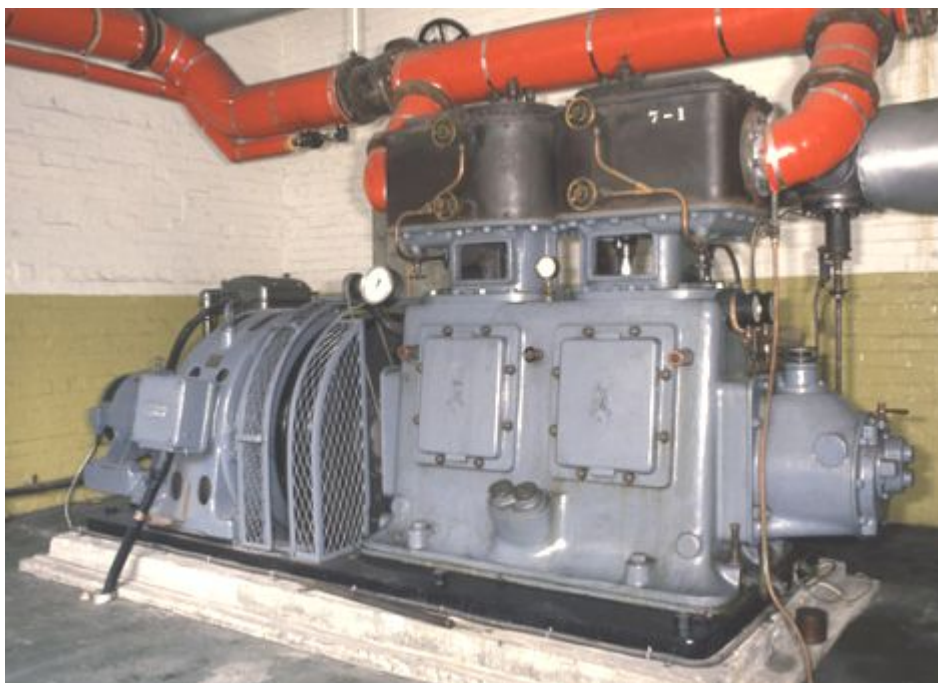
(bez klikového mechanismu převodu práce) [1]

Zvláštním případem jsou stroje kývavé, kde odpadá křížák a funkci ojnice plní pístní tyč, přičemž se válec natáčí (viz obr. 2.6).



obr. 2.6: Model pohonu kolesového parníku (PPM s kývavými válci) [14]

- Podle rychlosti běhu motoru se PPM dělí na volnoběžné (do 200 otáček za minutu) a rychloběžné (až 3500 otáček za min). Viz obr. 2.7.



obr. 2.7: Stojatý rychloběžný PPM, pohánějící elektrický generátor [15]

- Podle mobility lze rozdělit motory na stabilní (nepohyblivé) a mobilní, které je možné převážet na místo použití (bez demontáže), viz obr. 2.8. Obvykle je součástí mobilních PPM i kotel na výrobu páry. Do této kategorie spadají i parní stroje pohybující se vlastní silou jako parní traktory, silniční válce, lokomotivy atd.



obr. 2.8: Lokomobila

(mobilní PPM využívány např. pro pohon pluhu při orbě na polích) [16]

2.2 Dělená expanze páry (DEP)

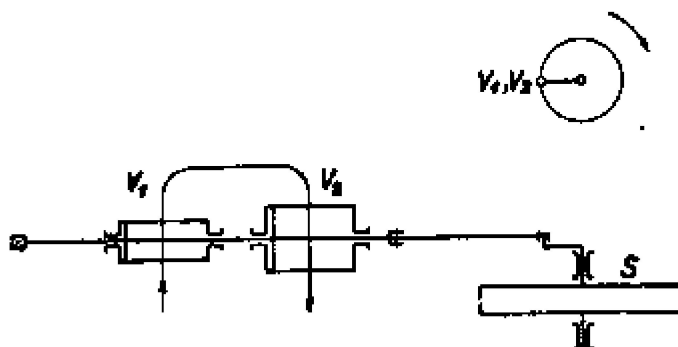
Expanzi páry je možné rozdělit do několika válců, kterými prochází pára postupně a v každé vyexpanduje jen částečně. V každém válci probíhá úplný pracovní cyklus s plněním, expanzí, výfukem a kompresí.

Výhodou DEP je snížení spotřeby páry, neboť má možnost vyexpandovat na nižší tlak a plnění bývá menší. Dělením tlakového a tepelného spádu na menší oddíly se sníží ztráty tepla stěnami válců a pára, která profoukne kolem pístu v prvním válci, může pracovat ještě ve druhém. Celkově se tedy zlepší termodynamická účinnost. Expanze se dělí na dva až čtyři stupně podle velikosti rozdílu tlaků páry admisní a emisní. Čtyřstupňová expanze má význam pro nejvyšší tlaky páry (např. 6 MPa), nástupem turbín však troj- a čtyřstupňové stroje prakticky vymizely. Vícestupňové motory mají oproti jedno- a dvou- a tří- a čtyřstupňovým strojům prakticky vymizely. Vícestupňové motory mají oproti jedno- a dvou- a tří- a čtyřstupňovým strojům prakticky vymizely. Vícestupňové motory mají oproti jedno- a dvou- a tří- a čtyřstupňovým strojům prakticky vymizely. Vícestupňové motory mají oproti jedno- a dvou- a tří- a čtyřstupňovým strojům prakticky vymizely.

První stupeň se nazývá vysokotlaký válec, poslední stupeň je nízkotlaký válec. U troj- a čtyřstupňové expanze se mezi ně vřazují střední válce. Všechny válce mají stejný zdvih, jejich průměry se však liší. Jejich rozměry se volí tak, aby indikovaná práce jednotlivých válců byla srovnatelná. Jak pára postupně expanduje, zvětšuje svůj objem. Proto mají vysokotlaké válce malý průměr, zatímco nízkotlaké velký. Parní potrubí spojující výstup páry z prvního válce se vstupem do druhého bývají často rozšířena, čímž vznikne meziválcový parojem zvaný přestupník (receiver). Ten slouží

k vyrovnávání tlaků při přepouštění páry z jednoho válce do druhého, případně může být ohříván, aby se odstranila vlhkost vzniklá v páře.

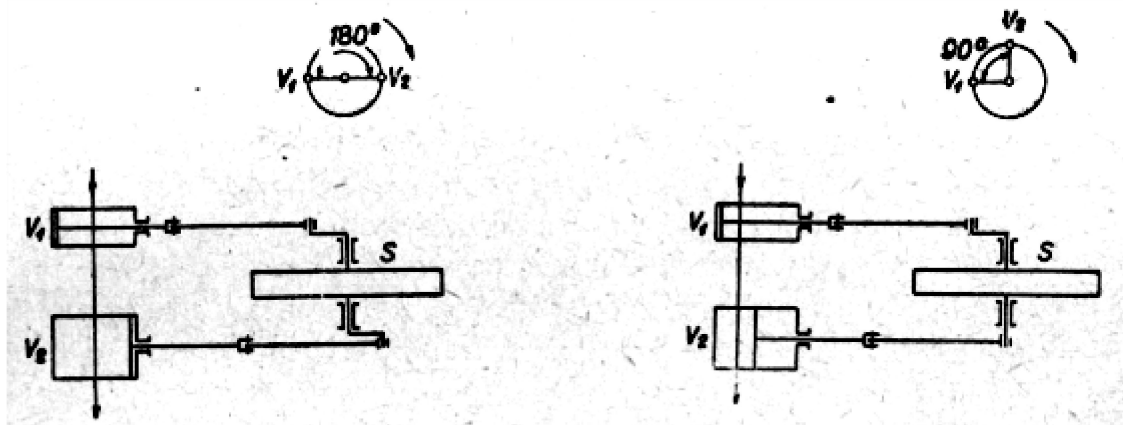
Válce mohou být uspořádány za sebou tak, že mají společnou pístní tyč a jsou napojeny na jednu kliku. Takto se obvykle spojují jen dva válce kvůli tepelné dilataci. Tyto motory se nazývají tandemové.



obr. 2.9: Schéma tandemového PPM

(V_1 - vysokotlaký válec, V_2 - nízkotlaký válec, S - setrvačnik) [1]

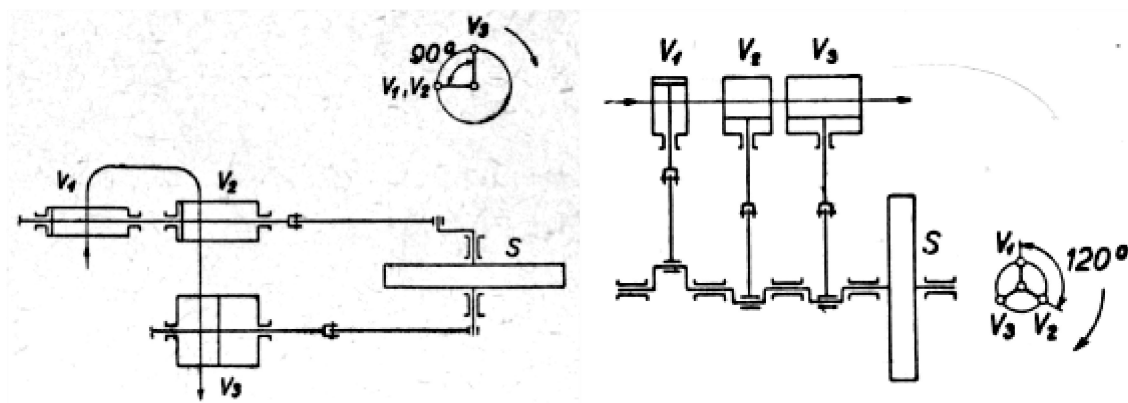
Jiný způsob řazení předpokládá, že každý válec má vlastní klikové ústrojí. Kliky mohou vůči sobě svírat úhel 90° nebo 180° . V prvním případě je chod stroje plynulejší, jeden z válců je vždy v záběru. Toto řešení však vyžaduje větší kapacitu přestupníku, neboť je zde pára zadržena po dobu půl zdvihu pístu, než nastane fáze plnění v nízkotlakém válci. Takto uspořádané motory se nazývají sdružené (compound). V druhém případě je přestup páry plynulý, ale motor vyžaduje větší setvačnik.



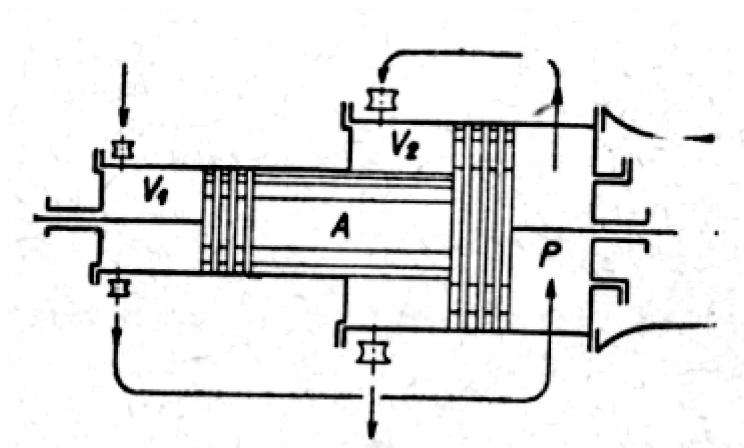
obr. 2.10: Schéma dvouexpanzních PPM se dvěma klikami

(Woolfický s klikami na 180° vlevo a sdružený (compoundní) vpravo) [1]

DEP nelze provádět v rámci jednoho válce (s dvojčinným pístem). Pokud by pára expandovala na jedné straně pístu a poté by přešla pracovat na druhou, pak by vznikaly výrazné ztráty vedením tepla stěnou válce. Zvláštní konstrukcí je Schmidtův motor, který má jeden diferenciální píst ve dvou válcích. Výhodou jsou malé ztráty tepla sáláním a jednoduchý rozvod za cenu menší mechanické účinnosti a vyšších pořizovacích nákladů. Viz obr. 2.12.



obr. 2.11: Schéma uspořádání trojválcových PPM s třemi stupni expanze
(ležatý vlevo a stojatý vpravo) [1]



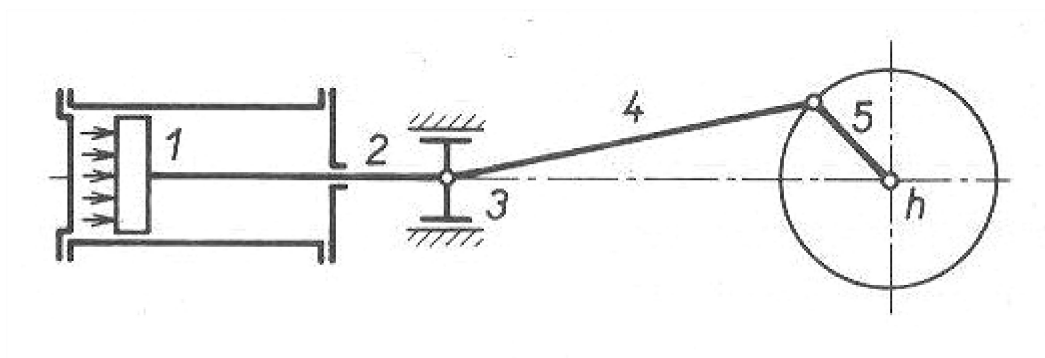
obr. 2.12: Schéma Schmidtova PPM
(*A*-diferenciální píst, *P*-přestupník o proměnném obsahu) [1]

2.3 Základní konstrukční skupiny PPM

2.3.1 Hnací ústrojí

Hnacím ústrojím je práce konaná parou ve válci přenášena na hřídel, vratný translační pohyb se mění na rotační. Děje se tak pomocí úplného klikového mechanismu, skládajícího se z několika částí, které jsou rozepsány níže. Viz obr. 2.13.

Píst je kotouč s nábojem připojeným na pístní tyč. Na jeho plochu působí tlak páry, který je přenášen na pístnici. Píst by měl být dostatečně pevný, aby odolal vysokým tlakům páry, zároveň však ne moc těžký kvůli setrvačným silám. Proto bývá často dutý. Jeho průměr je o několik milimetrů menší než průměr válce kvůli tepelné dilataci, přičemž je zde požadavek na dobrou těsnost. Tu obstarávají pístní kroužky usazené v drážkách po obvodu pístu a přitlačované na stěnu válce. Jsou buď litinové anebo z materiálů s nízkým třením z materiálů s nízkým třením (např. teflon, grafit), aby byly nároky na mazání co nejmenší. Viz obr. 2.14.



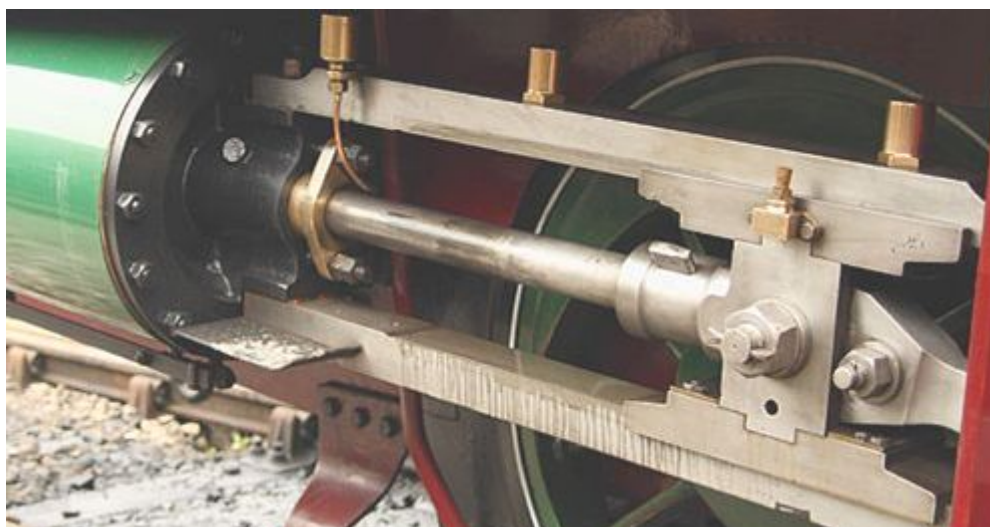
obr. 2.13: Klikové ústrojí PPM [20]

(1 - píst, 2 - pístní tyč, 3 - křížák s vodícími smykadly, 4 - ojnice, 5 - klika, h - hřídel)



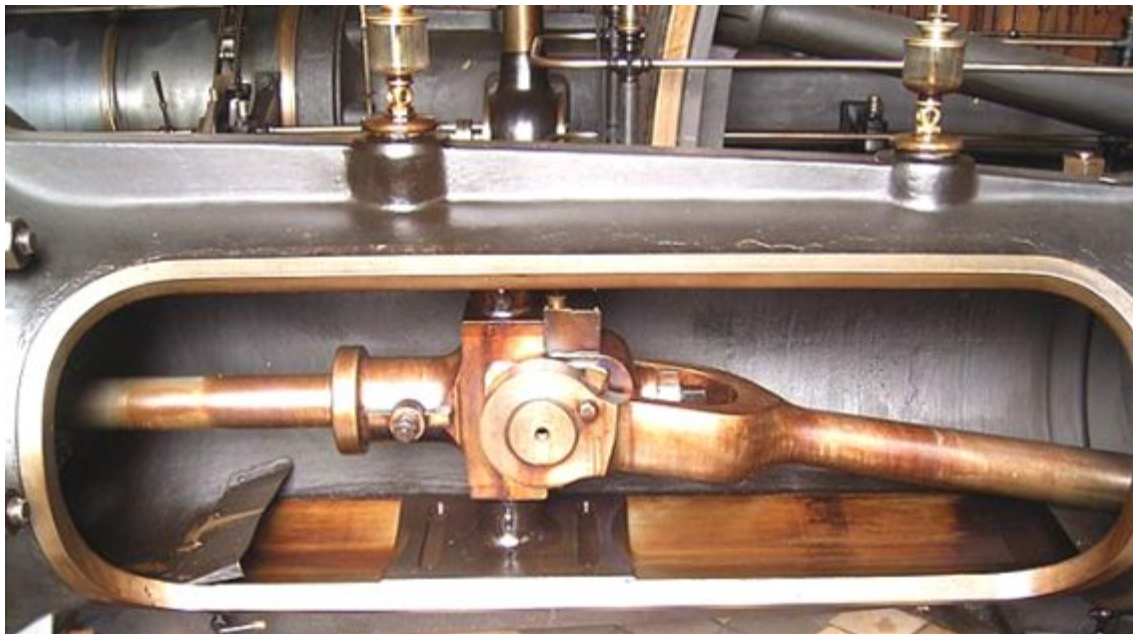
obr. 2.14: Píst (vpravo) a pístové škoupátko (vlevo) malého PPM [27]

Pístnice přenáší pohyb pístu ven z válce na křížák. Propojení s pístem může být rozebíratelné nebo pevné, především však těsné. Spojení s křížákem je obvykle pomocí klínu. Povrch pístní tyče je často cementován nebo nitridován, kvůli tvrdosti, aby odolával opotřebení. Přitom je do hladka opracován, kvůli minimálnímu tření a odírání ucpávky válce.



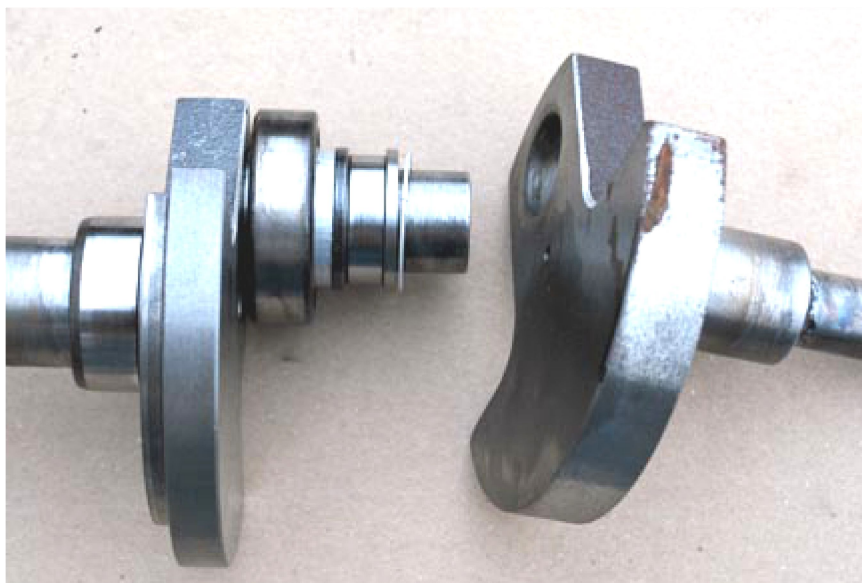
obr. 2.15: Lokomotivní křížák s rovnými pravítky, hlava ojnice prochází vnitřní částí, je zde patrný i klín spojující pístnici. [26]

Křížák vede pístnici a přenáší sílu čepem na ojnici. Jeho pohyb je veden smykadly po vodících plochách (pravítkách) ve směru pohybu pístu. Smykadla zároveň zachytávají složku síly kolmou na směr pohybu, vznikající v klikovém mechanismu. Plocha kontaktu smykadla s vodítkem je třecí a musí být intenzivně mazána, aby nedocházelo k velkým ztrátám a opotřebení.



obr. 2.16: Křížák s válcovou vodící plochou, spojený spojený s rozvidlenou ojnicí, nahoře jsou vidět maznice - skleněné nádoby na olej zajišťující mazání křížáku [26]

Ojnice je tyč, nejčastěji kruhového průřezu, převádějící posuvný pohyb křížáku v otáčivý pohyb na klice. Na koncích jsou ojnicí hlavy s oky, ve kterých jsou uloženy ložiskové pávne a čepy. Hlavy mohou být nedělené nebo dělené (kvůli montáži), spojené šrouby. Křížáková hlava prochází středem křížáku nebo je rozvidlena a obklopuje křížák z obou bočních stran.



obr. 2.17: Zalomená hřídel z několika rozebíratelných částí [27]

Kliková hřídel může mít dvě podoby: je buď přímá a na koncích má nasazené čelní kliky s klikovým čepem, které mají otevřený konec, nebo je ve střední části zalomená a klikový čep je na obou stranách spojen rameny s hřídelí. Ramena pak mají na protějším konci protizávaží, aby se při otáčení vyrovnaly setrvačné síly. Má-li být zalomená hřídel z jednoho kusu materiálu, je její výroba složitá a nákladná. Proto, pokud je to možné, se hřídel vyrábí více kusů, aby se zlevnila výroba. Kliková hřídel musí snášet výrazné dynamické zatížení. Z ojnice se přenáší síla, která je převedena na krouticí moment. Úhel mezi touto silou a okamžitým směrem obvodové rychlosti se neustále mění, z čehož vyplývá nerovnoměrnost otáčení. Plynulý chod zařizuje setrvačnick spojený s hřídelí, který v sobě akumuluje kinetickou energii a svou setrvačností přenáší kliky přes mrtvé body.

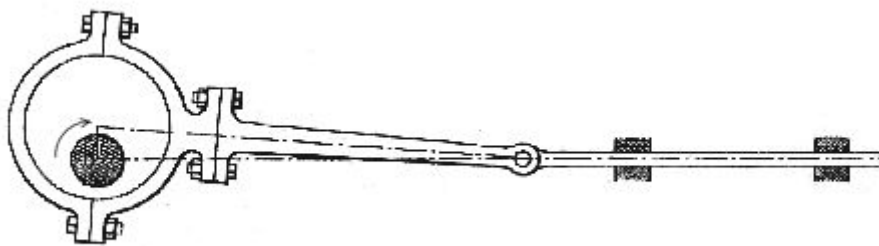
2.3.2 Rozvod

Pro dosažení pracovního cyklu ve válci motoru je nutné, aby v určeném rozmezí pístu byla do válce vpuštěna pára admisní nebo vypouštěna pára použitá. Tuto činnost řídí rozvod; je složen z vnitřních rozvodových orgánů, které otvírají a uzavírají parní kanály, a vnějších mechanismů, které odvozují pohyb rozvodu od hnacího ústrojí motoru.

Určení jednotlivých rozvodových okamžiků má zásadní vliv na výkon a spotřebu páry a závisí výhradně na rozvodu. Hlavní cíle při jeho konstrukci jsou správné řízení rozvodových okamžiků, jednoduchost a co nejmenší spotřeba energie (část výkonu stroje připadá na pohon rozvodu). Podle použití se na rozvod kladou další specifické požadavky. Proto také vznikla řada různých konstrukcí.

Šoupátkové rozvody

Tyto rozvody jsou složeny podobně jako hnací ústrojí z klikového mechanismu. Zde se však pohyb přenáší opačným směrem - z hřídele na šoupátko. Jelikož je zdvih šoupátka malý, užívá se často místo kliky výstředník. Šoupátko je součástí rozvodu, která posouváním po určité ploše v parní komoře zakrývá nebo odkrývá vývody parních kanálů. Jedno šoupátko je schopné řídit všechny rozvodové okamžiky, ovšem změnou jednoho se změní i všechny ostatní, což je nežádoucí. Pro lepší regulaci se používají dvě šoupátka nebo případně čtyři - pak každé řídí právě jeden rozvodový okamžik a lze jej měnit nezávisle na ostatních.



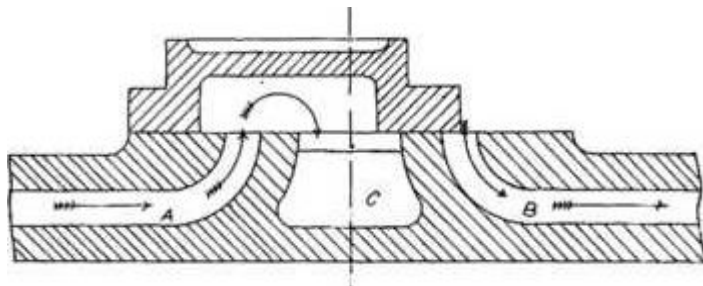
obr. 2.18: Výstředníkový mechanismus

(na hřídeli je nasazen kotouč, který je vystředěn mimo osu rotace, objímkou přenáší pohyb obdobně jako klikový čep) [30]

Plochá šoupátka (viz obr. 2.19) mají tvar obrácené hranaté misky, pohybují se po rovinném sedle v šoupátkové komoře. Vnitřní zahlbubení slouží k vývodu emisní páry,

zatímco admisní pára je přivedena z vnější strany. Svým přetlakem přitlačuje šoupátko k sedlu a zaručuje jeho těsnost.

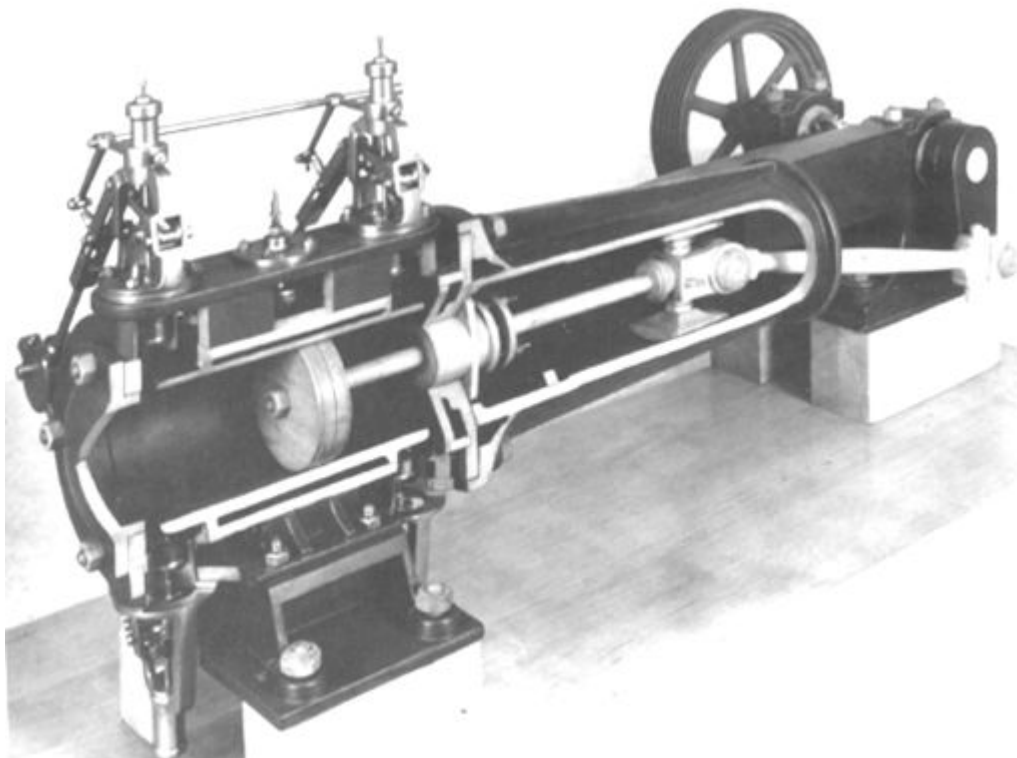
Nevýhodou je velké tření vlivem přitlačných sil a tím relativně velká síla pro pohon rozvodu. Proto byla plochá šoupátka vytlačena pístovými (viz obr. 2.14). Ty zařizují lepší rozložení sil a tudíž nižší tření. Pára o vysokém tlaku je držena mezi dvěma písty a na vnějších stranách je odváděna použitá pára o nízkém tlaku. Díky tomu jsou i nižší nároky na ucpávky šoupátkového válce.



obr. 2.19: Ploché šoupátko, parním kanálem A proudí emisní pára do výfukového potrubí C, kanálem B proudí admisní pára do válce [28]

Ventilové rozvody

Na jeden válec připadá vpouštěcí a vypouštěcí ventil pro obě strany, celkem tedy čtyři ventily. Jejich otvírání a zavírání je ovládáno vačkou, jejíž pohyb je řízen od rozvodové hřídele. Jeho osa je kolmá na hnací hřídel, spojení je realizováno kuželovým ozubeným soukolím. Ventily řídí rozvod páry mnohem lépe než šoupátka, kladou menší odpor, takže účinnost mechanismů je vyšší. Nevýhodou jsou vyšší složitost, pořizovací náklady a rázy doprovázející dosednutí ventilu na sedlo.



obr. 2.20: Řez ležatým PPM s ventilovým rozvodem a bajonetovým rámem [32]

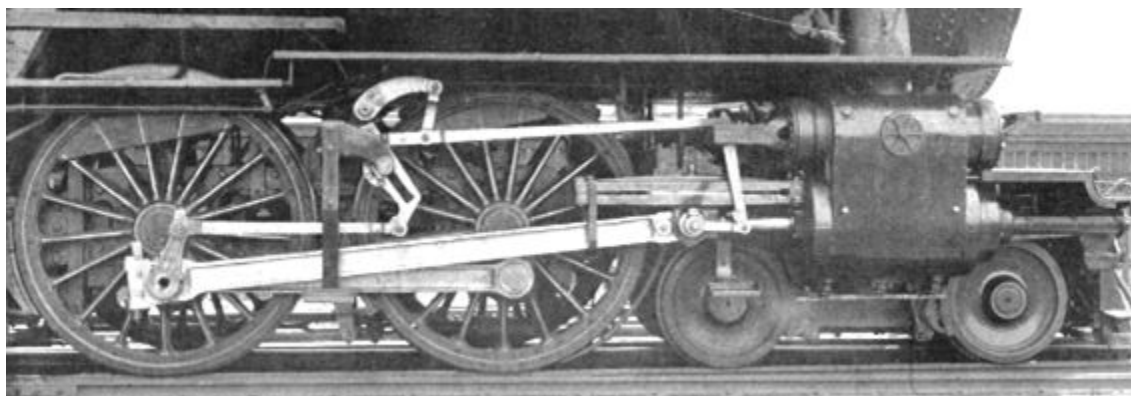
Reverzní rozvody, regulace

S rozvodem je rovněž spojena regulace výkonu a otáček. Pokud má stroj držet stále otáčky, je třeba korigovat jejich výkon při určitých odchylkách. Může se tak činit škrcením přiváděné páry, což je však ekonomicky nevýhodné, nebo změnou plnění. To lze udělat například změnou natočení výstředníku (viz obr. 2.21). Řízení stabilních otáček zastává regulátor, který funguje na principu závislosti odstředivých sil na otáčkách (Wattův odstředivý regulátor: viz obr. 1.4).



obr. 2.21: plochý, osový regulátor pro regulaci změnou plnění, spojený s natáčivým výstředníkem [29]

Pro případy řízení výkonu stroje, zvláště když PPM pohání dopravní prostředek, vznikly rozvody vratné (reverzní). Pomocí nich může obsluha řídit velikost plnění, ale i smysl otáčení. Tyto rozvody vyžadují složitější pákový systém, ale změnu směru pohybu je možné provést rychle přestavením páky.



obr. 2.22: Lokomotivní rozvod [31]

2.3.3 Parní válec a rám stroje

Válec

Těleso válce je z tvrdého materiálu, aby nepodléhal opotřebení a zároveň houževnatého, aby odolával nárazovým tlakům páry. Vyrábělo se odléváním z válcové litiny (viz obr. 2.23), v dnešní době se však konstruktéři uchylují k použití válcových vložek. Vložka samotná je z odolného materiálu, zatímco těleso, do něhož je vložena může být z materiálu

levnějšího. V případě opotřebení stačí vyměnit pouze vložku, čímž se dále snižují náklady. Těleso může formou bloku obsahovat několik válců podobně jako spalovací motory. V tělese jsou odlity nebo vyvrtány parní kanály vedoucí k rozvodu páry. Stěny válců jsou honovány, aby se tření snížilo na minimum. Válec je z obou stran uzavřen utěsněnými víky, které po obvodu drží soustava pevnostních šroubů. Mezi víkem a krajní polohou pístu je ponechán určitý prostor, aby vlivem tepelné dilatace píst nenarazil na stěnu víka. Tyto prostory se nazývají škodné neboť negativně ovlivňují práci cyklu.

Ucpávky

Víkem válce je vedena pístní tyč. Aby se pístnice mohla volně pohybovat a zároveň neunikala pára ven z válce, je zde ucpávka. Materiál ucpávky by měl mít dobré kluzné vlastnosti. Požívají se těsnicí kroužky z olověných bronzů nebo ucpávkové šňůry hranatého průřezu z bavlněných či grafitových vláken impregnované tukem, teflonem a grafitem pro své mazné schopnosti.



obr. 2.23: Otevřený válec a šoupátková komora lokomotivního motoru

(v šoupátkové komoře jsou patrné otvory parních kanálů) [25]

Rám / skříň

Rám je nosná konstrukce spojující jednotlivé části PPM, zachycuje jejich síly, aby se nepřenášely dále na základ, na kterém je stroj umístěn. Pro ležaté stroje (viz obr. 1.4) je obvyklé bajonetové uspořádání (nazvané podle tvaru půdorysu) (viz obr. 2.20), stojaté motory pak mají rám tvaru vidlicového. Tyto otevřené rámy jsou doménou starých strojů, pro mazání mechanismů je nutné pravidelně doplňovat olej do jednotlivých maznic (viz obr. 2.16) rozmístěných na různých místech. Nynější motory své části uschovávají v kompaktních skříních (viz obr. 1.5), aby bylo možné použít centrální mazání a zjednodušila se tak údržba. Díky čerpadlu olej neustále cirkuluje a rozstřikuje se na všechny třecí plochy, poté stéká a shromažďuje se ve sběrné vaně, odkud je opět nasáván do čerpadla.

3 PREDIKCE VÝROBNÍCH A PROVOZNÍCH NÁKLADŮ PPM

Odhady jsou provedeny pro dva motory:

- **jednoválcový**, efektivní výkon: $P_{e1} = 22,08 \text{ kW}$ (= 30 K)
- **dvouválcový s DEP**, efektivní výkon $P_{e2} = 36,8 \text{ kW}$ (= 50 K)

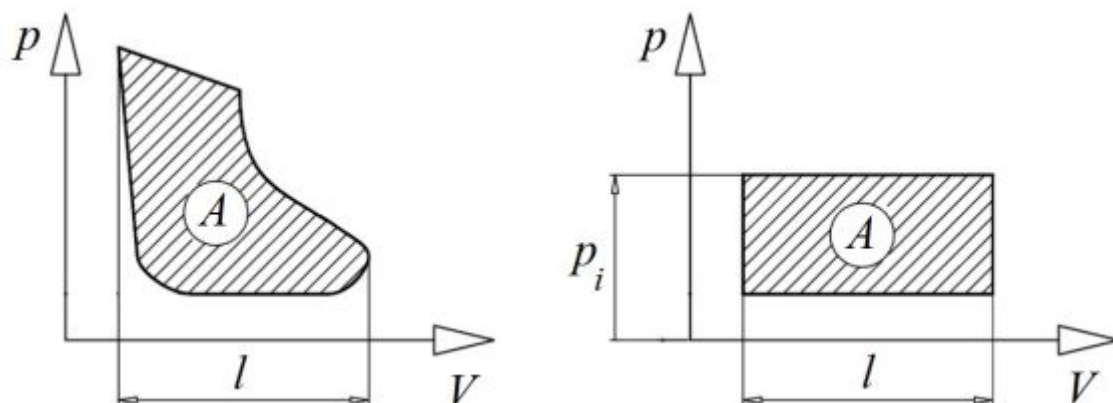
Následující parametry jsou pro oba stroje stejné:

Vstupní pára: tlak $p_1 = 1 \text{ MPa}$, teplota $T_1 = 180^\circ \text{ C}$ (sytá pára)

Otáčky: $n = 1500 \text{ min}^{-1}$

3.1 Návrh rozměrů motoru

Aby bylo možné odhadovat výrobní náklady, je nutné znát alespoň přibližné rozměry PPM. Pro termodynamický návrh motoru se kreslí předpokládaný indikátorový diagram. Na základě něj se provádějí výpočty rozměrů válců podle očekávaného výkonu. Plocha diagramu udává práci jednoho pracovního cyklu. Tlak mění se během zdvihu se pro usnadnění výpočtu nahrazuje myšleným stálým tlakem, jehož hodnota je právě taková, aby velikost práce cyklu zůstala zachována. Nazývá se střední indikovaný tlak.



obr. 3.1: Převedení plochy indikátorového diagramu na obdélník

(A - práce cyklu odpovídající šrafované ploše [J], V - objem [m^3], p - tlak [MPa], p_i - střední indikovaný tlak, l - rozmezí zdvihu pístu) [19]

Pro potřeby predikce výrobních a provozních nákladů postačí přibližný odhad středního indikovaného tlaku p_i pomocí vzorce podle Grassmanna, který vychází ze [3, s. 25]

$$p_i = 0,12 + 0,2 \cdot p_1 = 0,12 + 0,2 \cdot 1 = 0,32 \text{ MPa}$$

Pro použití bezmazných těsnicích pístních kroužků je nutné omezit pístovou rychlost.

$$c_s = 2l \cdot \frac{n}{60} = \frac{l \cdot n}{30} = 3 \text{ ms}^{-1}$$

Vymezením střední pístové rychlosti c_s a otáček n lze zjistit zdvih pístu l . [1]

$$l = 30 \cdot \frac{c_s}{n} = 30 \cdot \frac{3}{1500} = 0,06 \text{ m}$$

Výkon P_i je dán prací cyklu A a počtem otáček n . Podle 2. termodynamického zákona je objemová práce dána součinem tlaku a změnou objemu. V tomto případě jde o střední indikovaný tlak p_i a zdvihový objem V_z . Odtud lze odvodit rozměry válce.

$$P_i [\text{kW}] = 2 \cdot V_z \cdot p_i \cdot 10^3 \cdot \frac{n}{60} = 2 \cdot \psi \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot l \cdot p_i \cdot 10^3 \cdot \frac{n}{60} = \psi \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot p_i \cdot 10^3 \cdot c_s$$

Vnitřní indikovaný výkon N_i se váže k práci uvnitř válce. Efektivní, užitečný výkon N_e se dostane zahrnutím třecích ztrát, vyjádřených účinnostmi mechanismů η_m . [1]

$$P_i [\text{kW}] = \frac{P_e}{\eta_m}$$

Po odhadu účinnosti mechanismů $\eta_m = 0,9$ a součinitele zmenšení činné plochy pístu $\psi = 0,98$ lze vyjádřit průměr válce d . [1]

$$d [\text{m}] = \sqrt{\frac{4 \cdot P_{e1}}{\eta_m \cdot \psi \cdot \pi \cdot p_i \cdot 10^3 \cdot c_s}}$$

Průměr válce jednoválcového motoru D_1 je:

$$D_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot 22,08}{0,9 \cdot 0,98 \cdot \pi \cdot 0,32 \cdot 10^3 \cdot 3}} = 0,17450 \text{ m} \doteq 175 \text{ mm}$$

O výkonu dvouexpanzního stroje rozhoduje velký válec, který musí pojmout veškerou páru expandovanou na konečný tlak. Výpočet rozměrů se provede jako by byl stroj jednoválcový. Střední indikovaný tlak obou válců se redukuje na velký válec (v tomto případě přibližně shodný jako u prvního motoru, vzat podle stejného vzorce). [1, 3]

$$D_{2v} = \sqrt{\frac{4 \cdot 36,8}{0,9 \cdot 0,98 \cdot \pi \cdot 0,32 \cdot 10^3 \cdot 3}} = 0,22528 \text{ m} \doteq 225 \text{ mm}$$

Podle poměru činných obsahů obou válců $\xi = 3$ se získá průměr malého, vysokotlakového válce. [1]

$$\xi [-] = \frac{V_{Z2v}}{V_{Z2m}} = \frac{D_{2v}^2}{D_{2m}^2}$$

$$D_{2m} = \frac{D_{2v}}{\sqrt{\xi}} = \frac{0,22528}{\sqrt{3}} = 0,13006 \text{ m} \doteq 130 \text{ mm}$$

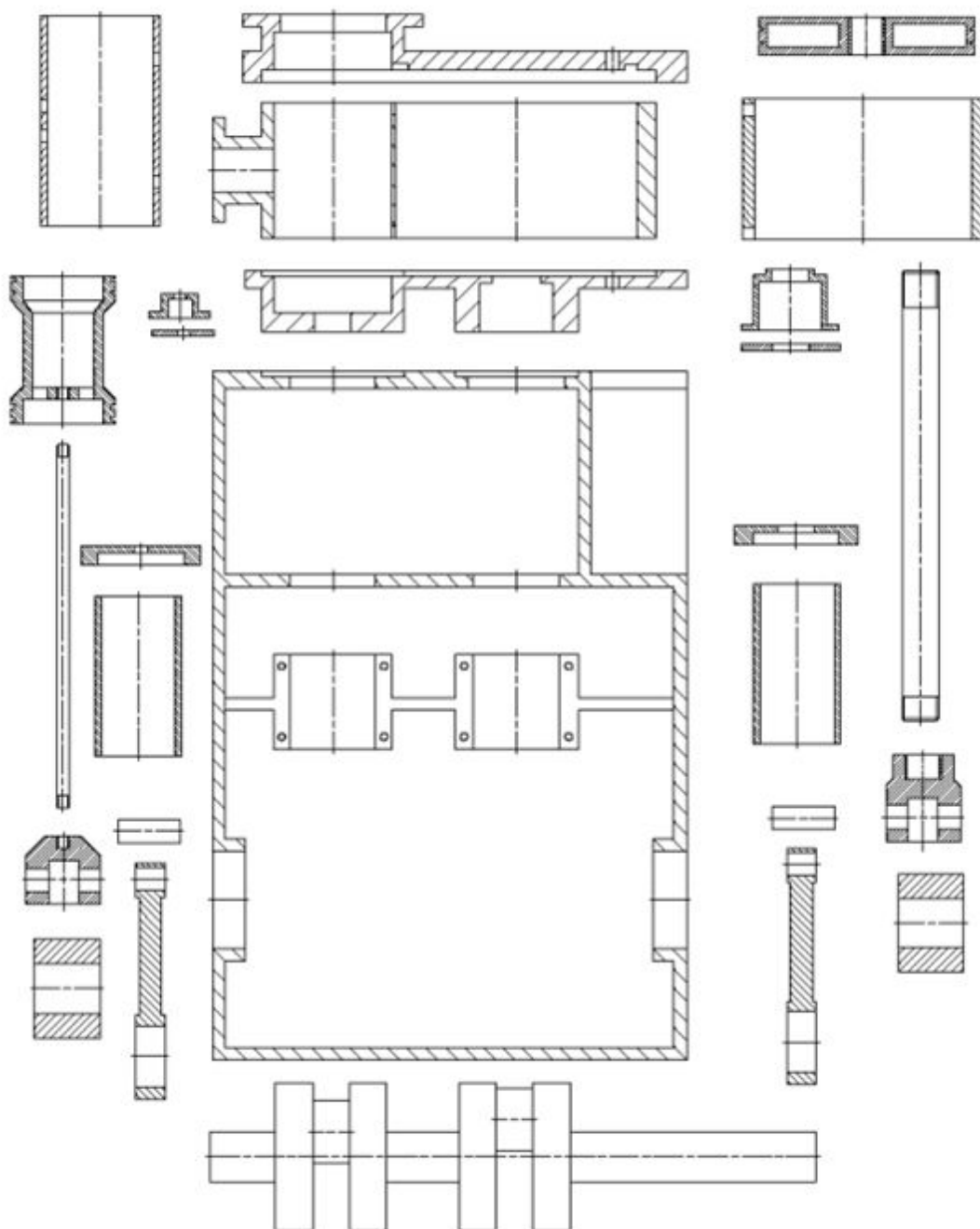
3.2 Výrobní náklady dílů motoru

3.2.1 Způsob naceňování

Některé komponenty, především normalizované součásti, jsou k dostání jako hotové s danou cenou. Ostatní díly je nutno zadat jako kusová zakázka do kovovýroby. Do ceny těchto dílů se promítá mnoho parametrů: polotovary, příprava výroby, složitost a počet výrobních operací, doba výroby atd.

Odhad ceny je možné provést několika způsoby podle požadované přesnosti a rychlosti provedení odhadu. Nejpřesnější možností je výpočet strojních časů při obrábění - ty jsou závislé na dráze nástroje ve směru posuvu a posuvové rychlosti. Je nutné stanovit počet přejezdů a optimální řezné rychlosti. Dále se projevují náklady na nástroj a vedlejší práce. [17] Tento způsob však je časově velmi náročný. Jiný způsob je odhadovat cenu podle podobných, již vyrobených dílů. Další možnost je stanovit náklady podle měrných cen na obrobenou plochu, hmotnost nebo jiný parametr obrobku.

Odhad výrobních nákladů jednotlivých dílů je problematika komplexní, přesahující rámec bakalářské práce. Nacenění bylo provedeno díky vedoucímu práce s ohledem na jeho letité zkušenosti v této problematice.



obr. 3.2: Díly PPM vyráběné na zakázku (vyjma ojnic)

3.2.2 Výrobní náklady zakázkových dílů

Predikce výrobních nákladů dílů PPM (vyobrazených dále) byl proveden pomocí měrných nákladů na kilogram obrobku. Byly odhadnuty hmotnosti součástí ($\pm 10\%$). Při třískovém obrábění vzniká velký podíl odpadu, ten však nebyl vyčíslován. Měrné náklady se stanovili na základě charakteru a přesnosti výroby. Rozměry součástí byly odhadnuty, výpočty pevnosti nebyly prováděny. Materiály a polotovary byly vybrány podle katalogu firem Ferona a.s. a ALMS spol. s r.o.

tab. 3.1: Přesnost výroby a výrobní operace obráběných dílů PPM

Výrobní operace:		SOUSTRUŽENÍ	FRÉZOVÁNÍ	VRTÁNÍ	SVAŘOVÁNÍ	BROUŠENÍ / SUPERFINIŠ	HONOVÁNÍ / LAPOVÁNÍ	DOKONČOVACÍ RUČNÍ PRÁCE	CEMENTACE, KALENÍ / NITRIDACE	Měrné náklady [Kč/kg]		
										800 - 1000	1500	2000 - 4500
Součástka:												
1	píst	✓		✓	✓						#	
2	vložka válce	✓	✓				✓					#
3	šoupátko	✓	✓	✓		✓					#	
4	šoupátková vložka	✓	✓				✓					#
5	blok parní části	✓	✓	✓	✓			✓			#	
6	podstavec bloku		✓	✓	✓			✓			#	
7	víko bloku		✓	✓	✓			✓			#	
8	pístní tyč	✓				✓			✓			#
9	šoupátková tyč	✓				✓			✓			#
10	pozdro ucpávky	✓				✓					#	
11	víko ucpávky		✓	✓				✓		#		
12	křížák	✓	✓	✓			✓					#
13	vedení křížáku	✓					✓					#
14	křížákový čep	✓		✓				✓	✓			#
15	kliková hřídel	✓	✓	✓					✓			#
16	skříň		✓	✓	✓			✓		#		
17	kryty skříně		✓	✓				✓		#		

Následuje výpis obráběných součástí. U některých je uvedeno více údajů oddělených lomítkem, což značí, že daný díl bude vyráběn ve více variantách: pro rozvod / hnací ústrojí nebo pro jednoválcový motor / vysokotlakou část / nízkotlakou část dvojválcového motoru s DEP.

1) Píst

Materiál: ocel S355J2 (1.0577), ekvivalent 11 503
Polotovar: kruhová tyč válcovaná Ø180 mm / Ø135 mm / Ø230 mm
Hmotnost: 2,56 kg / 1,85 kg / 4,32 kg
Měrná cena: 1400 Kč/kg
Celková cena: 3584 Kč / 2590 Kč / 6048 Kč

2) Vložka válce

Materiál: tvárná litina EN-GJS-600-3 (EN-JS1060 5.3201), ekvivalent 42 2306
Polotovar: odlitek vyrobený odstředivým litím
Hmotnost: 3,86 kg / 3,12 kg / 5,24 kg
Měrná cena: 2000 Kč/kg
Celková cena: 7720 Kč / 6240 Kč / 10480 Kč

3) Šoupátko

Materiál: ocel S355J2 (1.0577), ekvivalent 11 503
Polotovar: kruhová tyč válcovaná Ø90mm
Hmotnost: 1,78 kg
Měrná cena: 1500 Kč/kg
Celková cena: 2670 Kč

4) Šoupátková vložka

Materiál: tvárná litina EN-GJS-600-3 (EN-JS1060 5.3201), ekvivalent 42 2306
Polotovar: odlitek vyrobený odstředivým litím
Hmotnost: 1,52 kg
Měrná cena: 3000 Kč/kg
Celková cena: 4560 Kč

5) Blok parní části

Materiál: ocel S235JR (1.0038), ekvivalent 11 375
Polotovar: kruhová tyč válcovaná za tepla Ø100mm
Materiál: 11 353.1
Polotovar: trubka bezešvá hladká kruhová 133x16, 219x20 / 194x25 / 273x20
Hmotnost: 9,7 kg / 8,5 kg / 11 kg
Měrná cena: 1200 Kč

Celková cena: 11640 Kč / 10200 Kč / 13200 Kč

6) Podstavec bloku

Materiál: ocel S235JR (1.0038), ekvivalent 11 375

Polotovár: kruhová tyč válcovaná za tepla Ø100mm, Ø120mm

Polotovár: široká ocel válcovaná za tepla 250x20 / 200x20 / 300x20

Hmotnost: 10,6 kg / 8,1 kg / 14,5 kg

Měrná cena: 1200 Kč/kg

Celková cena: 12720 Kč / 9720 Kč / 17400 Kč

7) Víko bloku

Materiál: ocel S235JR (1.0038), ekvivalent 11 375

Polotovár: kruhová tyč válcovaná za tepla Ø120mm

Polotovár: široká ocel válcovaná za tepla 250x20 / 200x20 / 300x20

Hmotnost: 15,1 kg / 12,1 kg / 18,1 kg

Měrná cena: 1200 Kč/kg

Celková cena: 18120 Kč / 14520 Kč / 21720 Kč

8) Pístní tyč

Materiál: ocel C45+C (1.0503) nebo C45E+C (1.1191), ekvivalent 12 050

Polotovár: kruhová tyč tažená za studena Ø28mm

Hmotnost: 1,4 kg

Měrná cena: 2500 Kč/kg

Celková cena: 3500 Kč

9) Šoupátková tyč

Materiál: ocel C45+C (1.0503) nebo C45E+C (1.1191), ekvivalent 12 050

Polotovár: kruhová tyč tažená za studena Ø12mm

Hmotnost: 0,197 kg

Měrná cena: 4500 Kč/kg

Celková cena: 887 Kč

10) Pouzdro ucpávky

Materiál: bronzová slitina GC-CuSn7ZnPb (2.1090.04)

Polotovár: kruhová tyč Ø51mm / Ø76mm

Hmotnost: 0,137 kg / 0,493 kg

Měrná cena: 1500 Kč/kg

Celková cena: 205 Kč / 740 Kč

11) Víko ucpávky

Materiál: ocel S235JR (1.0038), ekvivalent 11 375
Polotovár: plochá tyč válcovaná za tepla 80x5 mm
Hmotnost: 0,065 kg / 0,151 kg
Měrná cena: 1000 Kč/kg
Celková cena: 65 Kč / 151 Kč

12) Křížák

Materiál: hliníková slitina EN AW-7075 AlZn5,5MgCu (3.4365), ekv. 42 4222
(hotový obrobek bude následně eloxován)
Polotovár: kruhová tyč válcovaná Ø65mm
Hmotnost: 0,297 kg / 0,281 kg (Výpočetní hmotnost: 0,827 kg / 0,782 kg)
Měrná cena: 4000 Kč/kg
Celková cena: 3308 Kč / 3128 Kč

13) Vedení křížáku

Materiál: tvárná litina EN-GJS-600-3 (EN-JS1060 5.3201), ekvivalent 42 2306
Polotovár: odlitek vyrobený odstředivým litím
Hmotnost: 0,94 kg
Měrná cena: 4000 Kč/kg
Celková cena: 3760 Kč

14) Křížákový čep

Materiál: ocel 16MnCr5+A (1.7131), ekvivalent 14 220.3
Polotovár: kruhová tyč tažená za tepla Ø22mm
Hmotnost: 0,1 kg
Měrná cena: 4500 Kč/kg
Celková cena: 450 Kč

15) Kliková hřídel

Materiál: ocel 16MnCr5+A (1.7131), ekvivalent 14 220.3
Polotovár: kruhová tyč tažená za tepla Ø125mm
Hmotnost: 13,6 kg
Měrná cena: 2000 Kč/kg
Celková cena: 27200 Kč

16) Skříň

Materiál: ocel S235JR (1.0038), ekvivalent 11 375
Polotovár: široká ocel válcovaná za tepla 250x20

Materiál: ocel S235JRC+N (1.0122)
Polotovar: plech válcovaný za tepla 1000x2000x10 mm
Materiál: ocel 11 353.1
Polotovar: trubka bezešvá hladká kruhová 102x12,5 mm
Hmotnost: 63 kg
Měrná cena: 500 Kč/kg
Celková cena: 31500 Kč

17) Kryt skříně

Materiál: ocel S235JR (1.0038), ekvivalent 11 375
Polotovar: plochá tyč válcovaná za tepla 120x20 mm
Hmotnost: 0,6 kg
Měrná cena: 800 Kč/kg
Celková cena: 480 Kč

3.2.3 Ostatní součásti

Ojnice včetně ložiskových pánví byla převzata z náhradních dílů motoru automobilů Škoda Octavia II / Yeti 1.4 TSI. Cena: sada po čtyřech - 14180 Kč, za kus - 3545 Kč.

Odvodňovací ventil: ventil mosazný 961 od firmy A.P.O. – ELMOS v.o.s. Maximální tlak a teplota: 42 MPa, 300 °C. Cena: 665 Kč.

Ložiska: - radiální: kluzné, masivní bronz SKF PBM 405040 M1G1,
cena za kus: 480 Kč

- axiální: kluzný kroužek, ocel-POM SKF PCMW 426601.5 M,
cena za kus: 195 Kč

Šrouby: 6 kg, různé druhy, cena cca. 500 Kč

Ložiska a šrouby nalezeny v katalogu proprumysl.cz provozovaný firmou Prumex s.r.o.

Pístní kroužky - grafitové. Cena: pro píst - 2000 Kč, pro šoupátko - 2000 Kč

Stírací kroužky, cena za kus: 50 Kč

Prachovka, cena za kus: 100 Kč

Ucpávka - ucpávková šňůra, cena cca. 200 Kč

Hřídelové kroužky - Gufero, cena za kus: 100 Kč

Olejový filtr, cena za kus: 100 Kč

Těsnící prvky byly vybrány podle katalogů firmy Hennlich s.r.o.

(Do nákladů nebyl uvažován regulátor a setrvačnick.)

3.3 Provozní náklady

Pro provoz PPM je nutné zajistit promazávání všech částí pohybujících se po třecích plochách. Mazání parní části bylo dříve řešeno vždy olejem. Mokrý pára však olej strhává s sebou a je jím tak znečištěna. To má za následek velkou spotřebu maziva

a znemožňuje opětovné použití kondenzátu pro napájení parního kotle. V takových případech je na místě použít odlučovač oleje od vody, tím se však navyšují pořizovací náklady. V současné době je alternativou použití samomazných pístních kroužků z grafitu, které jsou schopné zajistit bezmazný chod parní části. Tento způsob je uvažován pro oba navrhované motory. Grafitové pístní kroužky však více podléhají opotřebení, jejich provozní doba je 2000 hodin chodu motoru, poté by měly být vyměněny. Při každé manipulaci se motorem je třeba obnovit i ucpávky.

Mazání částí klikového mechanismu je provedeno jako centrální. Olej je v uzavřené skříni rozstřikován nebo tlakově rozváděn maznými kanálky k třecím plochám pomocí čerpadla. Příkon čerpadla pro oběh maziva byl odhadnut na 100 až 200 W. U oleje se udržuje optimální provozní teplota. Zvyšování jeho teploty, vlivem tření mazaných součástí si vyžaduje do oběhu mazací kapaliny zapojit chladicí zařízení. Chladič je pro zvýšení chladicího výkonu opatřen ventilátorem. Příkon tohoto ventilátoru byl odhadnut na 15 až 40 W.

Výměna oleje by měla proběhnout přibližně po 2000 hodinách provozu stroje. Zároveň je třeba vyměnit i filtr oleje.



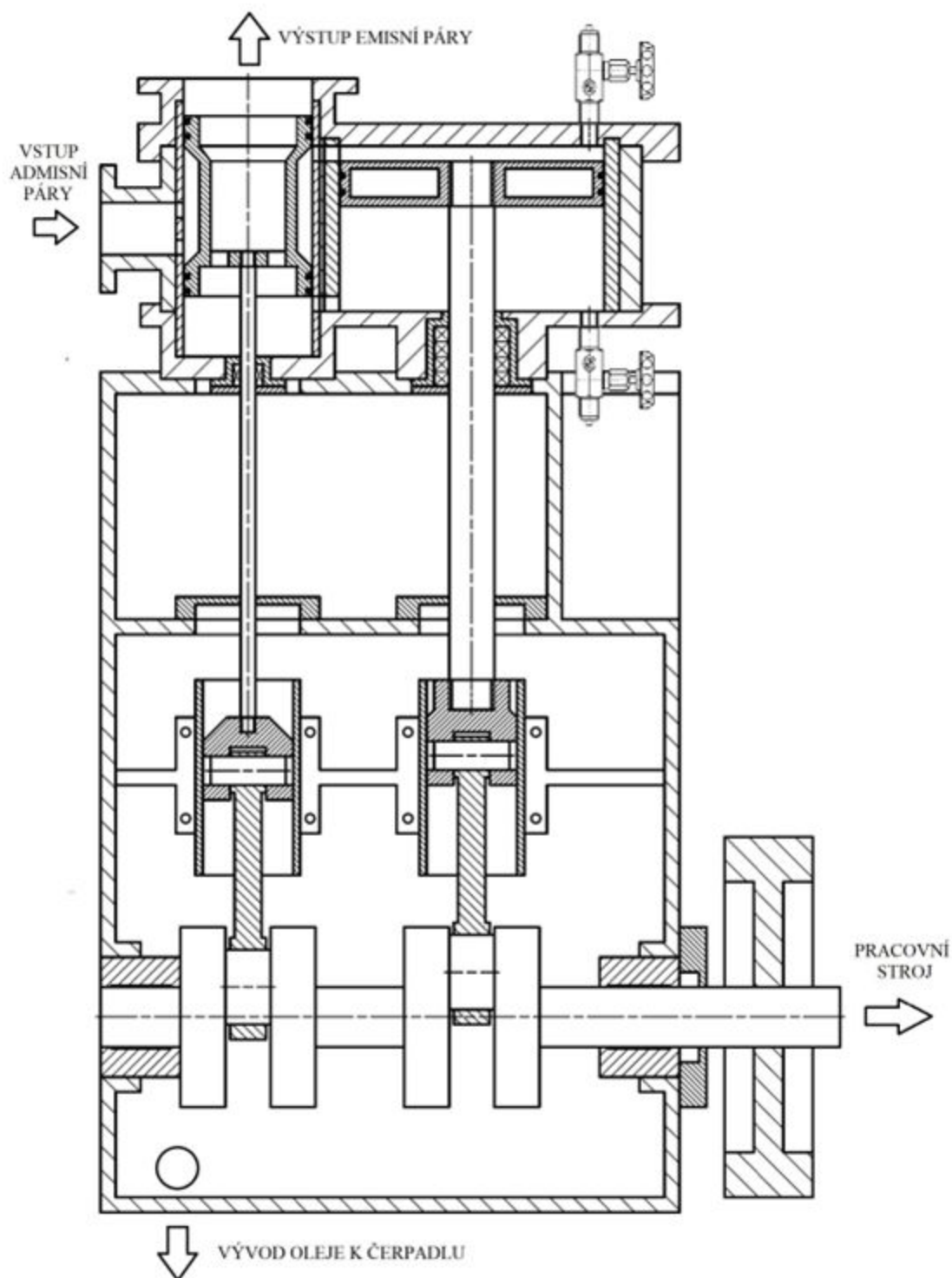
obr. 3.3: Čerpadlo a chladič oleje [21, 22]

4 POROVNÁNÍ

4.1 Náklady a parametry PPM

tab. 4.1: Celkové výrobní náklady jednoválcového motoru

součástky	počet	cena za kus [Kč]	celková cena [Kč]
píst	1	3584	3584
vložka válce	1	7720	7720
šoupátko	1	2670	2670
šoupátková vložka	1	4560	4560
blok parní části	1	11640	11640
podstavec bloku	1	12720	12720
víko bloku	1	18120	18120
pístní tyč	1	3500	3500
šoupátková tyč	1	887	887
pozdvo ucpávky	2	205 / 740	945
víko ucpávky	2	65 / 151	216
křížák	2	3308 / 3128	6436
vedení křížáku	2	3760	7520
křížákový čep	2	450	900
kliková hřídel	1	27200	27200
skříň	1	31500	31500
kryty skříně	2	480	960
ojnice	2	3545	7090
ložisko radiální	2	480	960
ložisko axiální	2	195	390
odvodňovací ventil	2	665	1330
pístní kroužky	pro 1 píst/šoupátko: 2000		4000
ucpávková šňůra	cca. 200		200
prachovka	2	100	200
stírací kroužky	2	50	100
hřídelový kroužek	1	100	100
olejový filtr	1	100	100
šrouby	cca. 500		500
Celkový součet			156 048

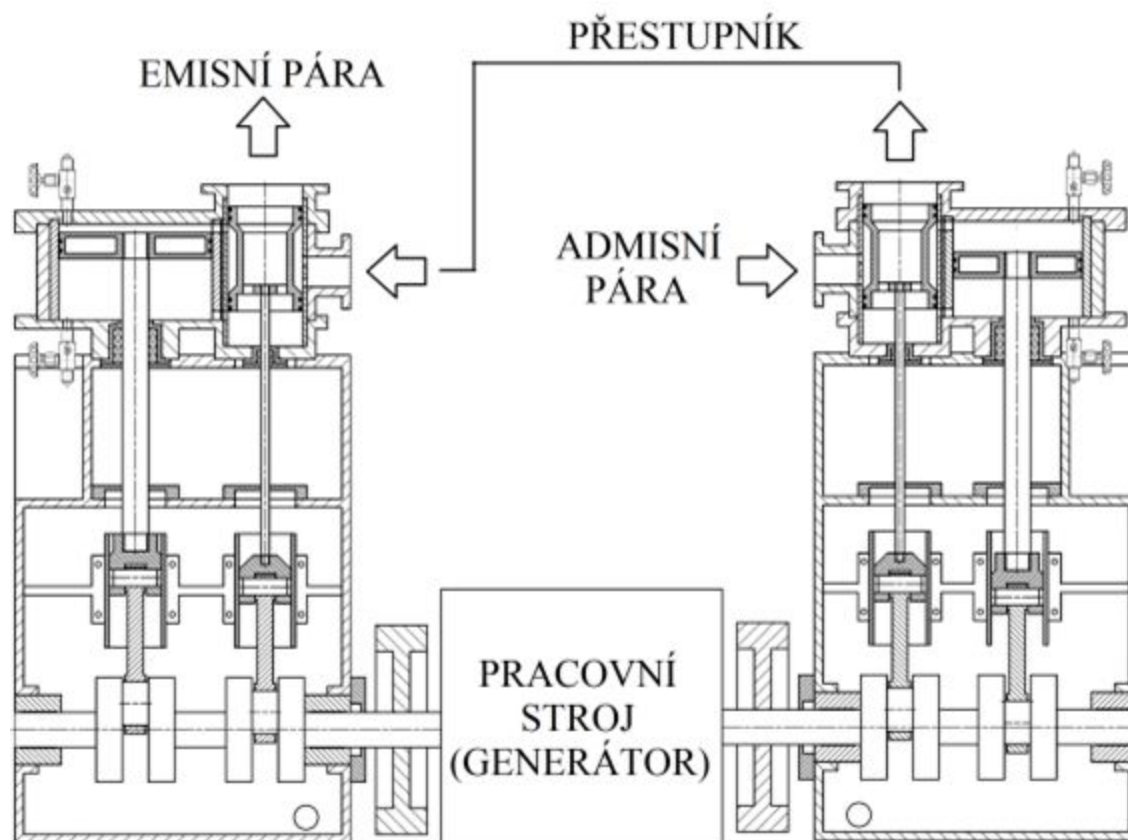


obr 4.1: Řez jednoválcovým PPM

Jednoválcový PPM je přibližně třičtvrtě metru vysoký hmotnost se pohybuje kolem 140 kg, samotná skříň zaujímá plochu zhruba jedné desetiny čtverečního metru. Dvojexpanzní motor bude mít každý válec zvlášť v samostatné skříni se stejnými díly jako jednoválcový PPM. Výškově je stejný. Plocha zaujímaná skříněmi je dvojnásobná, celková hmotnost se pohybuje kolem 285 kg.

tab. 4.2: Celkové výrobní náklady dvojválcového motoru s DEP.

součástky	počet	cena za kus [Kč]	celková cena [Kč]
píst	2	2590 / 6048	8638
vložka válce	2	6240 / 10480	16720
šoupátko	2	2670	5320
šoupátková vložka	2	4560	9120
blok parní části	2	10200 / 13200	23400
podstavec bloku	2	9720 / 17400	27120
víko bloku	2	14520 / 21720	36240
pístní tyč	2	3500	7000
šoupátková tyč	2	887	1774
pozdro ucpávky	4	205 / 740	1890
víko ucpávky	4	65 / 151	432
křížák	4	3308 / 3128	12872
vedení křížáku	4	3760	15040
křížákový čep	4	450	1800
kliková hřídel	2	27200	54400
skříň	2	31500	63000
kryty skříně	4	480	1920
ojnice	4	3545	14180
ložisko radiální	4	480	1920
ložisko axiální	4	195	780
odvodňovací ventil	4	665	2660
pístní kroužky	pro 1 píst/šoupátko cca. 2000		8000
ucpávková šňůra	pro 1 píst+šoupátko cca. 200		400
prachovka	4	100	400
stírací kroužky	4	50	200
hřídelový kroužek	2	100	200
olejový filtr	1	100	100
šrouby	na 1 skříň cca. 500		1000
Celkový součet			316526



obr. 4.2: Dvojexpanzní motor

Po dvou tisících hodinách provozu motorů bude nutné provést údržbu. Pokud by motory běžely nepřetržitě, byla by údržba prováděna alespoň čtyřikrát za rok.

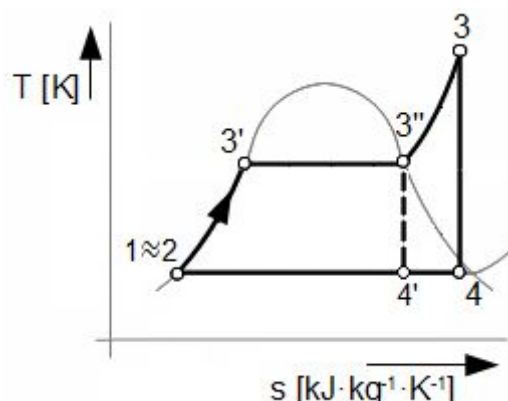
tab 4.3: Celkové provozní náklady při jedné údržbě

Položky údržby motoru [Kč]	Jednoválcový PPM	Dvojexpanzní PPM
Výměna pístních kroužků	4000	8000
Výměna ucpávky	200	400
Výměna oleje a filtru	200	200
Taxa údržbáře: 250 Kč/hod	6×250	12×250
Celkem	5900	11600

Literatura [2, s. 37] pro motory daných výkonů a parametrů páry uvádí měrnou indikovanou spotřebu páry vztaženou na jednoho indikovaného koně za hodinu. Pro jednoválcový PPM tato spotřeba páry odpovídá 10,7 kg/kWh, celkem tedy 263 kg/h. Dvojexpanzní PPM má spotřebu 9,5 kg/kWh, což celkově dělá 389 kg/h. Zdroj zde však nezohledňuje velikost plnění, takže lze předpokládat, že spotřeba páry bude u obou strojů ještě větší. Podle těchto údajů má motor s DEP celkovou spotřebu páry o 48 % větší než PPM s jednoduchou expanzí, zatímco výkon je větší o 67 %.

4.2 Zařízení pro provoz PPM

PPM potřebuje pro svoji činnost několik dalších zařízení, s kterými dohromady realizuje parní oběh neboli Rankine-Clausiiův cyklus.



obr. 4.3: Rankine-Clausiiův oběh

(T - teplota, s - entropie) [5]

Z bodu 1 je voda pumpována do parního kotle pomocí **čerpadla** nebo též kotlové napáječky. Ve srovnání s motorem je příkon čerpadla malý. V **parním kotli** se voda ohřívá z bodu 2 na hranici sytosti 3' a odpařuje se do stavu syté páry 3'', případně se pak dále přehřívá na bod 3. Z kotle je pára vpouštěna do motoru, kde expanduje a vykoná práci. Její tlak a teplota klesne. Poté v bodu 4 (nebo 4') přechází do **kondenzátoru**, kde zkapalní na vodu. Dostává se na výchozí bod 1, odkud může být znovu použita. V případě mazání parní části motoru olejem, je nutnou součástí i **odolejovač**, viz oddíl 3.3.

Nejnákladnějším prvkem parního oběhu je parní kotel. Ve spalovací komoře se hořením uvolňuje energie paliva. Horké spaliny proudí soustavou trubek, kterými předávají teplo vodě na vnější straně. Voda se mění v páru a před vypuštěním do potrubí k motoru může procházet ještě sušičem páry nebo přehřívákem. Celý tento systém je co nejlépe izolován od okolí, aby se ztráty tepla minimalizovaly.



obr. 4.1: Parní kotel Vitomax 200-HS M73A [18]

Z pořizovacích nákladů pro zařízení realizující parní oběh připadá na PPM pouze 10-15 %. Pro dané motory by se tedy cena zařízení na výrobu a kondenzaci páry

pohybovala v rozmezí 884 272 - 1 404 432 Kč (vypočítáno z ceny jednoválcového motoru). Na provoz dvojexpanzního PPM postačí stejné zařízení jako pro jednoválcový PPM. Díky tomu pro něj vychází celkové náklady vztažené na kilowatt výkonu motoru nižší než pro jednoválcový motor.

tab. 4.4: Pořizovací náklady celého parního zařízení

	Celkové náklady na zařízení parního oběhu [Kč]	Celkové náklady na zařízení parního oběhu vztažené na kilowatt výkonu [Kč/kW]
Jednoválcový PPM	1 040 320 - 1 560 480	47 116 - 70 674
Dvojexpanzní PPM	1 200 798 - 1 720 958	32 630 - 46 765

ZÁVĚR

Práce popisuje pístový parní motor. Začíná jeho vymezením v rámci tepelných motorů a odlišení od jiných pístových motorů, pokračuje popisem jeho struktury a principiálních základů. Jsou zde rozebrány děje při provozu a nastíněno terodynamické schéma činnosti. V druhé kapitole jsou popsány základní konstrukční skupiny PPM, tomu předchází rozčlenění konstrukční druhy motorů s ukázkami, neboť od účelu motoru se též odvíjí podoba jeho částí. Zvláštní pozornost je věnována dělené expanzi páry. Následuje návrh dvou malých PPM - jednoválcového a dvouválcového s dělenou expanzí páry. Podle zjednodušeného výpočtu byly odhadnuty rozměry válců a na základě toho se navrhly jejich konstrukce. Dále se práce zaměřuje na odhad výrobních a provozních nákladů těchto motorů. Do provozních nákladů spadá údržba a výměna opotřebovaných komponentů. Závěrem jsou oba motory porovnány. Vyčíslena je rovněž přibližná cena zařízení potřebného na provoz těchto motorů. Ukazuje se, že nejvyšší podíl na celkových nákladech mají právě tato zařízení, především kotel.

Nejvýznamější částí je odhadování ceny dílů motoru objednaných na zakázku. Stanovení ceny těchto dílů závisí na mnoha faktorech: materiál, polotovary, množství a složitost výrobních operací, počet a druh použitých strojů, doba výroby, příprava výroby, velikost výrobku, opotřebení nástrojů, manipulace aj. Pro firmy zabývající se takovou výrobou je zásadní obratem poskytnout takovou cenovou nabídku, aby uspěla v konkurzu a zároveň si zajistila dostatečný zisk. Přesné stanovení ceny je složité, proto je nutné umět ji spolehlivě a rychle odhadnout. Odhadování nákladů je založeno na zkušenosti z výroby a s cenami podobných výrobků. Je možné vysledovat určité korelace mezi parametrem výrobku a jeho cenou. V tomto případě byl použit odhad pomocí měrných cen na hmotnost výrobku rozdělených do skupin podle složitosti a přesnosti výroby.

Výrobní náklady na prototyp PPM se v průměru pohybuje kolem 1000 Kč/kg. V této ceně je zahrnuta i diskuze mezi zadavatelem a výrobcem ohledně uskutečnitelnosti výroby a jejím laděním. V případě zavedení sériové výroby měrné náklady ještě klesnou.

Již během vypracovávání odhadů nákladů navržených motorů byly objeveny některé nedostatky nebo možnosti vylepšení konstrukce. Odhady byly nicméně dokončeny pro původní návrh.

“Zdokonalením” konstrukce lze výrobní náklady významně snížit. V dnešní době se tak konstruktéři PPM snaží maximálně aplikovat cenově dostupnější sériově vyráběné strojní součásti a sestavit motor ideálně jako stavebnici. Komponenty parních motorů sice strojírenské podniky dávno vyřadily ze svých výrobních programů, nicméně pro potřebu výroby PPM je možné čerpat v oblasti spalovacích motorů a kompresorů, jejichž díly jsou tvarově i užitkově velmi podobné.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KLÁG, Josef. *Parní stroje: Výpočet, konstrukce, montáž a obsluha*. 1. vyd. Praha: Práce, 1951, 214 s.
- [2] KLÁG, Josef. *Parní stroje a turbíny - obsluha a provoz: pomůcka k základnímu školení a příručka ke studiu*. Praha: Práce, 1952. Technické příručky Práce. Dostupné také z: <http://kramerus.mzk.cz/search/handle/uuid:1e462a40-df1c-11e3-b110-005056827e51>
- [3] KROUZA, Václav. *Parní motory*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1958, 124 s., příl.
- [4] ŠKORPÍK, Jiří. Pístový parní motor (Parní stroj), *Transformační technologie*, 2010-06, [last updated 2012-04]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/pistovy-parni-motor-parni-stroj.html>.
- [5] ŠKORPÍK, Jiří. Tepelné oběhy a jejich realizace, *Transformační technologie*, 2006-11, [last updated 2015-10]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/tepelne-obehy-a-jejich-realizace.html>.
- [6] ŠKORPÍK, Jiří. Stirlingův motor, *Transformační technologie*, 2009-06, [last updated 2013-03]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/stirlinguv-motor.html>.
- [7] ŠKORPÍK, Jiří. Lopatkový stroj, *Transformační technologie*, 2009-08, [last updated 2014-02]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/lopatkovy-stroj.html>.
- [8] ŠKORPÍK, Jiří. Historie transformačních technologií, *Transformační technologie*, 2006-08, [last updated 2014-05]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <http://www.transformacni-technologie.cz/historie-transformacnich-technologii.html>.
- [9] Valve and piston layout and movement. *Kiwi on Rails*. [online]. 27.4.2014 [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: http://www.kiwionrails.net/Trains/Valve_and_piston_layout_and_movement.html
- [10] PANTHER, (user). File:Steam engine nomenclature.png. *Wikipedia: the free encyclopedia*. [online]. 2001-2016 [cit. 2016-03-13]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Steam_engine_nomenclature.png
- [11] MÁCHA, V. Dirostahl, work at the steamhammer. *INDUSTRIAL: dokumentace těžkého průmyslu*. [online]. [2016] [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.viktormacha.com/klicova-slova/dirostahl-work-at-the-steamhammer-1409.html>
- [12] KOTINA, M. Mašinky. *Fotografie letadel, mašinek a přírody*. [online]. 11.3.2016 [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <http://photo-martin.wbs.cz/Masinky.html>
- [13] Manufacturers Index – Westinghouse Machine Co.. *Vintage Machinery*. [online]. © 2001-2016 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://vintagemachinery.org/MfgIndex/Images/3295-C.jpg>

- [14] Model of oscillating paddle engines for Thames steamboat. *Science Museum*. [online]. [2016] [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: http://www.sciencemuseum.org.uk/HoMImages/Components/721/72102_3.png
- [15] ALLEN, C. George Street Mills – the third engine. *geograph: photograph every grid square*. [online]. 14.3.2008 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.geograph.org.uk/photo/729965>
- [16] Ciekawostki. *Generalna dyrekcja dróg krajowych i autostrad*. [online]. © 2009-2016 [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <https://www.gddkia.gov.pl/pl/a/13916/Skansen-Maszyn-i-Sprzetu-Drogowego>
- [17] KOCMAN, K. a PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 1.vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. 2001. 270 s. ISBN 80-214-1996-2.
- [18] Vitomax 200-SH. *VEISSMANN: climate of innovation*. [online]. [2016] [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.viessmann.cz/cs/prumysl/parni-kotel/vysokotlake-parni-kotle/vitomax-200hs-m73a.html>
- [19] POTMĚŠIL, T. *Pístový parní motor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009, s. 39. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Novotný.
- [20] Kinematické mechanismy. *Učíme v prostoru*. [online]. [2015] [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://uwp3d.cz/drtic/wp-content/uploads/2014/07/UvP_STROJ_ST41_001_003.jpg 101-106
- [21] Série MDG. *Katko s.r.o.* [online]. © 2014- [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <http://www.katko-cerpadla.cz/cs/cerpadla-iwaki/produkty/zubova-cerpadla/serie-mdg/>
- [22] News. *Hyspecs: Hydraulic Engineering*. [online]. [2015] [cit. 2016-05-21]. Dostupné z: <http://www.hyspecs.com.au/news/hydrafile/>
- [23] KAPLAN, Z. *Technologie výroby spalovacích motorů a motorových vozidel*. Praha: Československá redakce VN MON, 1989. Učební texty vysokých škol.
- [24] KROUPA, J. *Parní stroje a regulace*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1957. Učební texty vysokých škol.
- [25] Sekce Cargovozy – Trutnov – Články. *Rssing.com*. [online]. 30.6.2010 [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://blabbed2.rssing.com/chan-2766945/all_p1.html
- [26] VINCENTZ, F, SANGWELL, P. Crosshead. *Wikipedia: the free encyclopedia*. [online]. 2001- [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Crosshead>
- [27] KIMMEL, T. Strath steam. *Kimmel Steam Power*. [online]. © 2012- [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://kimmelsteam.com/strathsteam.html>
- [28] AMBROSE, J. Course of Steam from Dome to Atmosphere. *Victoria University of Wellington Library*. [online]. © 2016- [cit. 2016-05-23]. Dostupné z: http://nzetc.victoria.ac.nz/tm/scholarly/tei-Gov02_02Rail-t1-body-d15.html
- [29] Steam Engines. *The Project Gutenberg eBook*. [online]. 19.12.2010 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://www.mirrormservice.org/sites/gutenberg.org/3/4/7/0/34701/34701-h/34701-h.htm>
- [30] Eccentric (mechanism). *Wikipedia: the free encyclopedia*. [online]. 2001- [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Eccentric_\(mechanism\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Eccentric_(mechanism))

- [31] Lokomotivní rozvody. *Wikiwand*. [online]. [2013] [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: http://www.wikiwand.com/cs/Lokomotivn%C3%AD_rozvody
- [32] KYNČL, Radko. *Mechanické energetické stroje: katalog sbírky Národního technického muzea v Praze*. Praha: Národní technické muzeum, 1997. ISBN 80-7037-054-8.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

pístový parní motor	PPM
dělená expanze páry	DEP

Veličina	Symbol	Jednotka
Práce cyklu	A	J
Střední pístová rychlost	c_s	m.s^{-1}
Průměr válce	d	m
Průměr válce jednoválcového PPM	D_l	m
Průměr vysokotlakého válce PPM s DEP	D_{2m}	m
Průměr nízkotlakého válce PPM s DEP	D_{2v}	m
Délka zdvihu pístu	l	m
Hmotnost	m	kg
Cena	N	Kč
Měrná cena	N_m	Kč/kg
Otáčky motoru	n	min^{-1}
Indikovaný výkon	P_i	kW
Efektivní výkon	P_e	kW
Efektivní výkon jednoválcového PPM	P_{e1}	kW
Efektivní výkon PPM s DEP	P_{e2}	kW
Tlak	p	Pa
Tlak admisní páry	p_1	MPa
Tlak emisní páry	p_2	MPa
Střední indikovaný tlak	p_i	MPa
Teplota vstupní páry	T_l	° C
Objem	V	m^3
Zdvihový objem	V_Z	m^3
Zdvihový objem vysokotlakého válce	V_{Z2m}	m^3
Zdvihový objem nízkotlakého válce	V_{Z2v}	m^3
Účinnost mechanismů	η_m	-
Poměr zmenšení činné plochy pístu	ψ	-