

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF

# PÍSTOVÝ PARNÍ MOTOR

PISTON STEAM ENGINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

MARTIN PAVLÍČEK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

doc. Ing. JAN FIEDLER, Dr.

BRNO 2010



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2009/2010

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Martin Pavlíček

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

obor: **Energetika, procesy a ekologie (3904R030)**

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:

### **Pístový parní motor**

v anglickém jazyce:

### **Piston steam engine**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Proveďte základní návrh pístového parního motoru pro redukci páry.

Cíle bakalářské práce:

- rešerše používaných parních motorů
- základní návrh rozměrů pro výkon parního motoru do 15kW
- popis konstrukce a regulace výkonu stroje

Seznam odborné literatury:

Klág,J.:Parní stroje a turbíny, SNTL 1952  
firemní literatura

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 12.11.2009

L.S.

---

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu

---

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Předmětem této bakalářské práce je seznámení s parním pístovým motorem. Vysvětlení jeho principu a pohled na vývoj v různých oblastech průmyslu. Provedení výpočtu základních parametrů. Seznámení s jeho konstrukcí a využití v dnešní době.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Tepelný motor, pístový parní stroj, redukce páry, tepelný oběh.

## **ABSTRACT**

The subject of this thesis is to introduce a steam piston engine. Explanation of its principles and mapping of developments in various industries. Another part of the thesis deals with calculations of basic parameters and also with construction of steam piston engine and its nowadays usage.

## **KEY WORDS**

Heat engine, piston steam machine, the reduction of steam, heat circulation.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE :**

PAVLÍČEK, Martin. *Pístový parní motor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 29 s.  
Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Parní pístový motor vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a zdrojů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum : 18. 5. 2010

.....

Martin Pavlíček

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat doc. Ing. Janu Fiedlerovi, Dr. za cenné rady a ochotu při konzultacích.

## OBSAH

1. Úvod.....	9
2. Oběhy Parního stroje .....	10
2.1 Porovnávací oběh.....	10
2.2 Oběh stroje ideálního .....	11
2.3 Oběh stroje skutečného .....	12
3. Popis práce parního stroje.....	14
4. Využití parního stroje .....	15
4.1 Parní lokomotiva.....	15
4.2 Parníky .....	16
4.3 Parní automobil.....	17
4.4 Lokomobila .....	18
4.5 Parní válec.....	18
4.6 Stabilní parní stroj.....	19
5. Využití parního stroje v 21.století.....	20
5.1 Energie z biomasy a parní stroj.....	20
5.2 Parní motory malých výkonů.....	21
6. Návrh parního pístového motoru pro redukci páry.....	22
6.1 Vstupní hodnoty.....	22
6.2 Volené hodnoty .....	22
6.3 Sestavení indikátorového diagramu .....	22
6.4 Určení zdvihového objemu .....	23
6.5 Výpočet hlavních rozměrů válce .....	24
6.6 Výpočet spotřeby páry .....	24
6.7 Výpočet účinnosti .....	25
7. Konstrukce parních strojů v 21. století .....	26
7.1 Konstrukční možnosti .....	26
7.2 Jednoválcový dvojčinný stroj s rozvodem přes dvě šoupátka .....	27
7.3 Jednoválcový dvojčinný stroj s rozvodem pomocí čtyř ventilů .....	27
7.4 Klikový mechanismus.....	28
Závěr .....	30
Seznam použitých zdrojů.....	31
Seznam použitých značení a symbolů .....	33



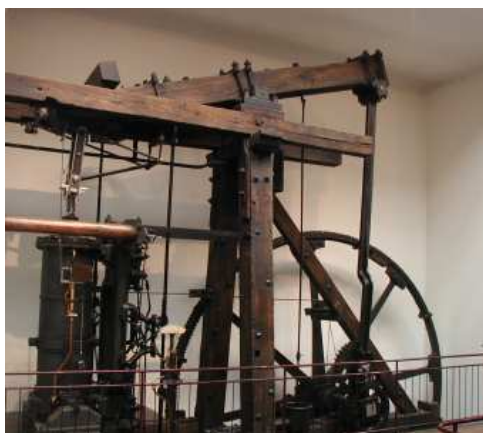
# 1. Úvod

Parní pístový motor byl jedním z nejvýznamnějších vynálezů 18. století. Parní stroj náleží do skupiny tepelných motorů, tj. motorů v nichž se teplo mění v mechanickou práci. Tato proměna se tu děje prostřednictvím tlakové energie páry. Pára působí svým tlakem na píst, pohybující se určitou rychlostí. Součin z tlaku páry v kg a pístové rychlosti v m/s dává výkon parního stroje v  $[kg \cdot m/s]$ , popřípadě v koních [K]. Teplo se přivádí pracovní látce (páře) jako teplo spalovací vzniklé spalováním paliva mimo válec. Parní stroj je tedy tepelný motor se spalováním vnějším, na rozdíl např. od motoru spalovacího, který má spalování vnitřní (uvnitř válce) [9].

Počátky parních strojů sahají až do roku 1698, kdy si anglický vynálezce Thomas Savery (1650-1715) nechal patentovat první parní stroj, který byl používán k čerpání vody z dolů [3].

Později tento stroj Savery ve spolupráci s anglickým kovářem Thomasem Newcomenem (1664-1729) zdokonalil a roku 1712 vynalezli první atmosférický parní stroj pro čerpání vody z dolů. Fungoval na kondenzující páře z přiváděné studené vody, která byla následně vstříkována pod píst. Díky vakuu vzniklému touto kondenzací byl píst následně atmosférickým tlakem opět stlačen a za pomoci táhla vykonával práci pohybem nahoru a dolů. [4].

Dalšího zdokonalení se parní stroj dočkal roku 1765 Skotským mechanikem a fyzikem Jamesem Watterem (1736-1819), který mu sestrojil oddělený kondenzátor páry. Roku 1785 vyrobil svůj vlastní parní stroj jako zdroj energie, který umožnil jeho průmyslové využití [5].



Obr.1 Saveryho a Newcomenův Parní stroj na čerpání vody z dolů [6]



Obr.2 Wattův parní stroj, Madrid [30]

Do konce 18. století pokračoval řetěz Wattových patentů na různé objevy a vynálezy, které umožnily další rozvoj této technologie. Mezi jeho vynálezy a objevy patří dvojčinný parní stroj, odstředivý regulátor, vývěvu nebo setrvačnický parního stroje. Parní stroj se stal nejvýznamnějším zdrojem energie jak v dopravě, tak i v průmyslu. Proto je také 19. století označováno jako století páry. Budovaly se silnice a jejich povrch upravovaly parní válce. V průmyslu se používaly stroje jako buchary a lis. Obrovský rozmach byl i v dopravě. Objevily se parní lokomotivy, lokomobily, na vodě to byly parníky a v zemědělství se objevily první parní mlátičky a oračky [1,2].



	děj	Popis
1 → 2	<b>isochora</b>	ohřev vody probíhající podél spodní mezní křivky H'
2 → 3	<b>isobara</b>	odpařování při stálém tlaku $p_1$ až na sytou (suchou) páru na horní mezní křivce (syté páry) H''
3 → 4	<b>isobara</b>	přehřívání páry při stálém tlaku $p_1$
4 → 5	<b>adiabata</b>	přehřátá pára expanduje adiabaticky (bez ztrát) na kondensátorový tlak $p_2$
5 → 1	<b>isobara</b>	zkapalnění na vodu při stálém tlaku $p_2$ do původního stavu

Porovnávací oběh by byl v dokonalém zařízení složeném z parního kotle, přehřívače, parního stroje, kondenzátoru a kotlové napáječky za předpokladu, že nikde nejsou žádné ztráty.

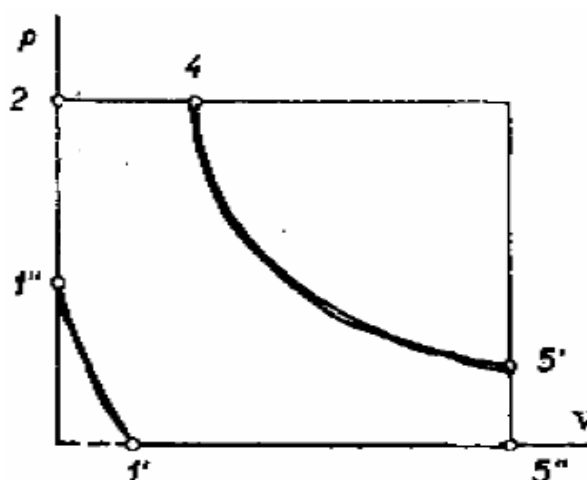
Tento oběh by vyžadoval parní válec velkého objemu  $v_2$ , a tím i velkého zdvihu stroje. Hnací tlaky páry poblíž špičky 5 jsou už nepatrné, dokonce menší než třetí odpor v klikovém ústrojí, takže píst by musel být v této části zdvihu vlečen setrvačnickem. Takový stroj by byl drahý a nevhodný. Proto se volí válec parního stroje menší, o objem  $v_2'$ . Aby se zmenšil rozdíl tlaků páry  $p_2$  a  $p_1$  v mrtvé poloze pístu, stejně jako i náraz páry na píst, a aby se běh stroje stal pružnějším, zavádí se u parního stroje adiabatická komprese  $1'$  a  $1''$ . Pak je teoretický diagram ideálního parního stroje beze ztrát dán v obr.2 a) a b) tučně vytaženým obrazcem  $1' \rightarrow 1'' \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5' \rightarrow 5''$ . Cyklus se tedy natáhne o několik přeměn [8, 9].

- $1' \rightarrow 1''$  adiabatická přeměna
- $1'' \rightarrow 2$  isochorická přeměna
- $4 \rightarrow 5'$  adiabatická přeměna
- $5' \rightarrow 5''$  isochorická přeměna
- $5'' \rightarrow 1'$  isobarická přeměna

## 2.2 Oběh stroje ideálního

Obr. 2-2 znázorňuje diagram ideálního parního stroje, který by pracoval beze ztrát. Na svislou osu se vynášejí měrné tlaky  $p$ . Měrný tlak je na  $1\text{cm}^2$  pístové plochy. Nanášejí se do diagramu v absolutních atmosférách (ata nebo  $\text{kg/cm}^2$ ) to je tlak měřený od absolutní nuly čili od vakua.

Na vodorovnou osu se vynášejí měrný objem páry  $v$ . Je to objem, který za určitého tlaku zaujímá 1kg páry, jenž se udává v  $\text{m}^3$  na 1kg páry.



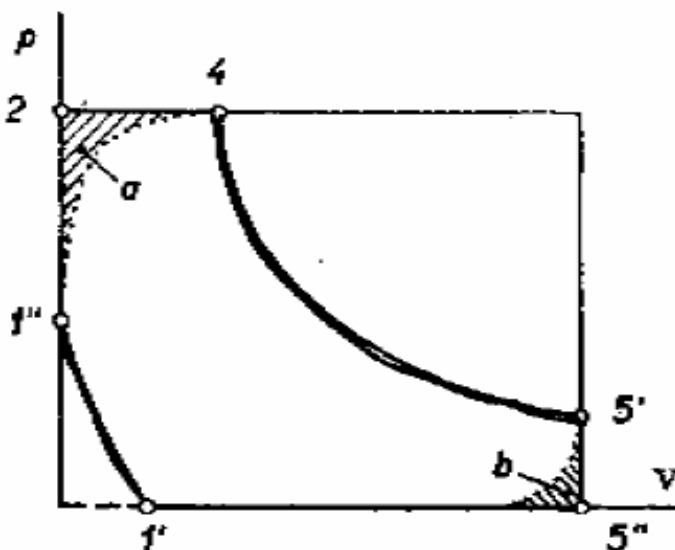
Obr. 2-2 oběh ideálního parního stroje[9]

4 → 4	Od zadní mrtvé polohy v bodě 2 se do bodu 4 plní prostor parního válce čerstvou parou z kotle.
4	V bodě 4 je plnění skončeno a vstupní kanál se uzavírá.
4 → 5'	Po zavření vstupního kanálu se začne pára rozpínat, tlak páry klesá na hodnotu v bodě 5'.
5'	V přední mrtvé poloze se otevře výstupní kanál a nastává výstup páry.
5' → 5''	Tlak páry klesne na protitlak a to buď na tlak venkovního atmosférického vzduchu, nebo na tlak kondensátoru.
5'' → 1'	Pára je vytlačována pístem z válce.
1'	V tomto bodě se uzavře výstupní kanál a pára, která zbyla ve válci se stlačuje.
1' → 1''	Tlak páry stoupá, práci k tomu potřebnou dodává setrvačnick.
1'' → 2	V mrtvé poloze 1'' se otevře vstupní kanál, tlak páry ve válci vzroste na tlak čerstvé páry do bodu 2, následuje další plnění.

Takto by vypadal teoretický diagram ideálního parního stroje beze ztrát. Takový ideální stroj bychom si mohli představit jako stroj s velmi pomalým chodem a velkými průřezy parního potrubí, rozváděcích kanálů a velkými rozvodovými orgány (šoupátka, ventily). Účinnost takového cyklu se pohybuje kolem 35 % [8, 9].

### 2.3 Oběh stroje skutečného

U skutečného parního stroje by se objevily v diagramu šrafované odchylky. V bodě 1'' by neprobíhal vzestup tlaku podle 1'' → 2, ale podle tečkované. Podobně i při výstupu páry z bodu 5'. Tyto změny vyžadují totiž jisté doby, za kterou píst již uběhne jistou dráhu. To má vzápětí ztrátu na práci parního stroje, která je úměrná šrafovaným plochám  $a$ ,  $b$ .



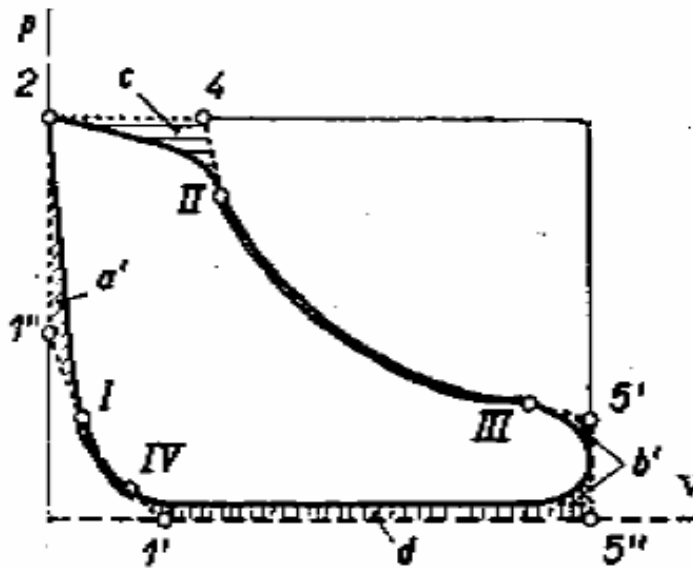
Obr. 2-3 oběh parního stroje se ztrátami[9]

Pro zmenšení těchto ztrát se v okamžiku předchozího vstupu I otevře u skutečného stroje vstup páry do válce ještě před mrtvou polohou pístu. Výstup páry se v okamžiku předchozího výstupu III otevře před druhou mrtvou polohou. Příslušné ztráty  $\underline{a'}$ ,  $\underline{b'}$  vyjdou pak menší než v obr. 2-3.

Další ztráta  $\underline{c}$  na ploše diagramu, tím pádem i na práci parního stroje má příčinu v přívodním parním potrubí a ubírá energii, potřebnou na zrychlení páry v potrubí. Je to způsobeno škrcením páry při zavírání vstupního ventilu na konci plnění v bodě II, kde začíná expanze páry II  $\rightarrow$  III.

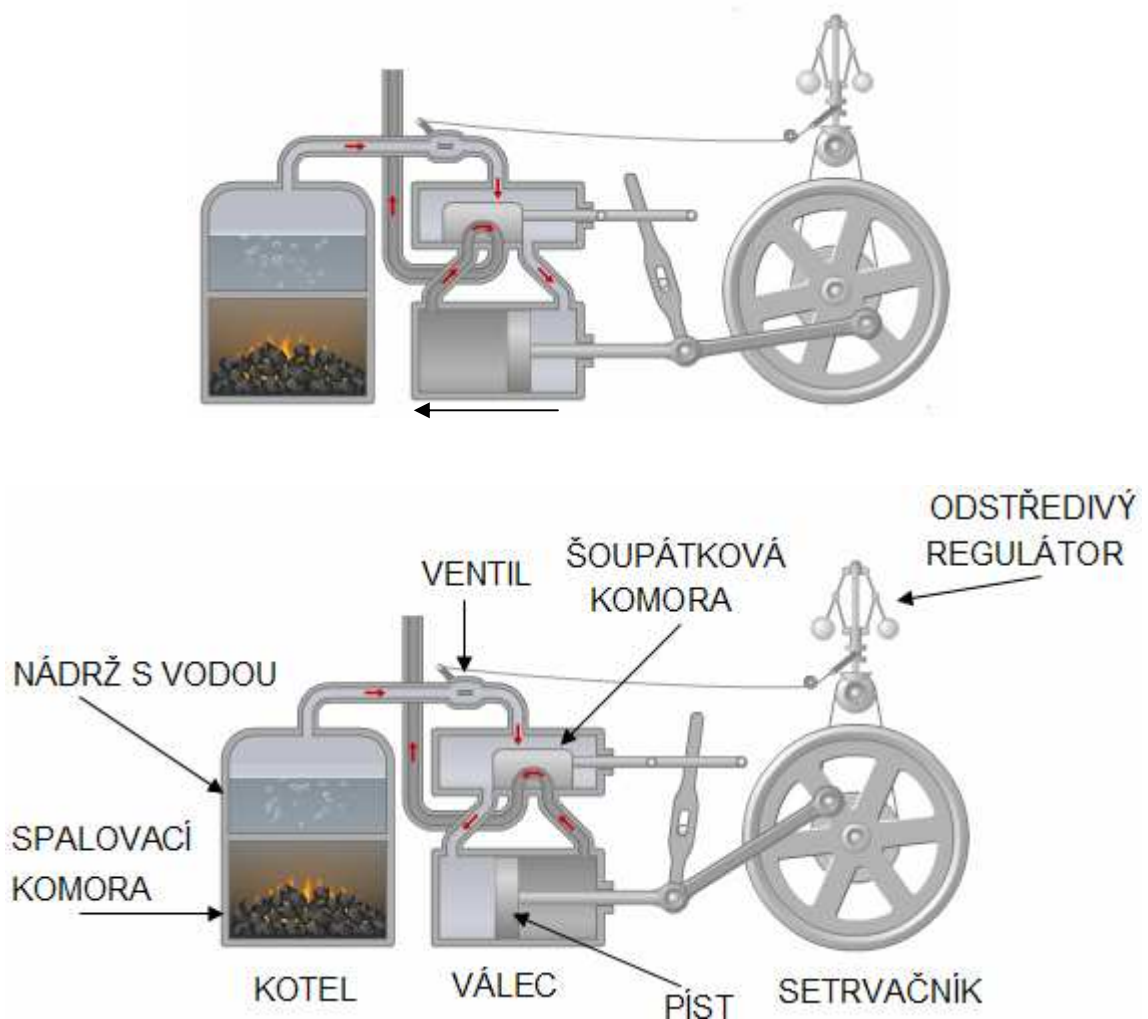
Ztráta  $\underline{d}$  je způsobena odporem výstupního potrubí a výstupního ventilu. Při jeho zavírání na konci výstupu páry v bodě IV, což je současně počátkem komprese IV  $\rightarrow$  I, se dostaví vlivem škrcení malé stoupaní tlaku. Tím, že je však celkem nepatrné, bude zanedbáváno. Protože otvírání a zavírání kanálů je plynulé, nastává škrcení páry, které způsobí zaokrouhlení rohů skutečného diagramu.

Práce vykonaná tímto oběhem je pak rovna obsahu plochy uzavřené křivkou. Účinnost reálného cyklu je kolem 16 % [8, 9].



Obr. 2-4 oběh parního stroje se ztrátami[9]

### 3. Popis práce parního stroje



Obr. 3-1 schéma parního stroje [10]

Spalováním paliva se ve spalovací komoře vytváří teplo na ohřev vody v nádrži. Pára, která se z vody vypaří je vedena přívodním potrubím z kotle přes regulátor do šoupátkové komory a odtud je pak rozdělována do válce. Tlak páry ve válci způsobí pohyb pístu. Na setrvačnick je přes pístní tyč s klikou přenášen posuvný pohyb pístu. Klika při posuvu pístu posouvá šoupátko z jedné polohy do druhé. Použitá pára je posuvem pístu vytlačována přes šoupátkovou komoru a dále odvodním potrubím ven. Odstředivý regulátor ovládá ventil a zajišťuje tak stabilizaci otáček. Tyto motory se vyznačují vysokou spolehlivostí, snadnou regulací otáček a výkonu a snadnou reverzační chodu. Podle toho, kam se použitá pára vypouští, rozlišujeme:

**Výfukové motory** – po proběhnutí cyklu je pára vyfouknuta ven ze stroje a déle se s ní nepracuje.

**Kondenzační motory** – po proběhnutí cyklu se pára ochladí v kondenzátoru, teplo se znovu využije.

**Dvojčinné motory** – pracovní prostor je po obou stranách pístu [1, 8, 10]

## 4. Využití parního stroje

### 4.1 Parní lokomotiva

V roce 1804 Richard Trevithick sestrojil první parní lokomotivu pohybující se po kolejnicích. Nejvýznamnější osobností parních lokomotiv byl ale Georg Stephenson, který se jejich konstrukcí zabýval od roku 1814. Postavil například stroj Locomotion, podle kterého dostaly lokomotivy jméno. Dále pak slavnou lokomotivu Rocket, jež dosahovala rychlosti 32,5 km/h. Na Rocket byly uplatněny principy, zejména v konstrukci kotle s žárovými trubkami. Tento princip konstrukce kotle se zachoval u parních lokomotiv až dodnes. Hlavním stavebním materiálem byla ocel.

První polovina 20. století znamenala pro parní lokomotivy období největšího rozmachu. Po celém světě zajišťovalo 90% železniční dopravy skoro čtvrt miliónu parních lokomotiv.

Do druhé poloviny 20. století prošly parní lokomotivy mnoha vylepšeními. Přesto měla nízkou energetickou účinnost, pracnou obsluhu, složitou přípravu a provoz, omezení maximální rychlosti a vyžadovala manipulaci s velkými objemy pohonných hmot, vody a odpadu. To bylo spojeno s úpravami železničních stanic. Proto nebyly schopny obstát proti konkurenčním konstrukcím lokomotiv, a do konce 20. století prakticky vymizely ze všech tratí.

Největším provozovatelem je dnes Čína, která vlastní asi 6500 aktivních parních lokomotiv. Na ostatních místech světa se používají jen tam, kde je levné uhlí. Ve zbytku světa jsou parní lokomotivy využívány pouze pro turistické účely[15].



Obr. 4-1 Parní lokomotiva která jezdila trasu Praha – Modřany[16]

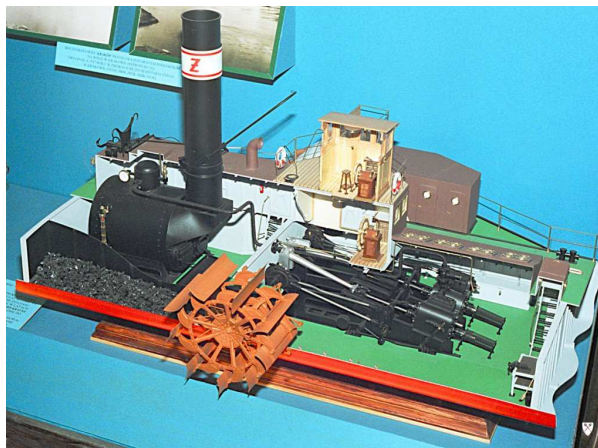


Obr.4-2 Lokomotiva Rocket[17]

## 4.2 Parníky

Jako parník je označena loď, jejíž pohon zajišťoval parní stroj. Parníky byly stavěny především jako kolesové, ty se používaly od 19. století až do počátku 20. století. Po té je v námořní dopravě vystřídaly lodě poháněné lodním šroubem kvůli lepší účinnosti. Kolesové parníky se ale dodnes udržely v říční dopravě. Zde jsou kolesa naopak výhodnější než lodní šroub, nepoškozují dno mělkých toků, dovolují lepší manipulaci s lodí a nejsou tolik náchylné na namotávání vodních rostlin. Kolesa se rychle zdokonalila od kol s pevnými lopatkami na kolesa v natáčecích lopatkami, to zvýšilo jejich účinnost. Používaly se dvě uzpůsobení koles[20]:

- **Parník s bočními kolesy.** Tento typ má dvě kolesa na bocích lodě. Obvykle uprostřed délky, protože hřídel, která kolesa spojuje, je zároveň kliková hřídel parního stroje. Na druhou stranu od hřídele se umísťuje kotel, aby byla loď optimálně vyvážená[20].



Obr. 4-3 Řez strojovnou kolesového parníku[18]

- **Parník se zadním kolesem.** Takto konstruovaný parník má jen jedno koleso na zádi. Parní stroj, který přes pákový převod poháněl koleso byl opět co nejbliže k těžišti. Tato konstrukce umožňovala větší vnitřní objem lodi[20].



Obr. 4-4 Kolesový parník na Lake city v Minnesotě[19]



### 4.3 Parní automobil

Jde o dopravní prostředek s parním strojem určenou pro silniční dopravu. První funkční prototyp parního automobilu od francouzského vynálezce Nicolase-Josepha Cugnota (1725-1804) vyjel na silnici roku 1769. První známá automobilová nehoda se stala roku 1771, kdy tento vynálezce upravil původní model a narazil s ním do zdi. Pokusy o parní automobil byly i u nás v letech 1815 – 1817, kdy v Praze Josef Božek úspěšně předvedl svůj prototyp. Bohužel po loupeži na předváděcí akci byl parovůz zničen a další pokusy již nebyly provedeny. Do 30. let 20. století se vyráběly různé typy nákladních automobilů s parním pohonem. Takovéto automobily se ujaly především v Anglii. I v tehdejší Československu se proháněl nákladní parní automobil Škoda Sentinel. V 60. letech se nejvíce prodával britský vůz Stanley Steamer. V dnešní době je automobil s parním pohonem spíše kuriozita[23].



Obr. 4-5 pozdější model Stanley Steameru z roku 1923[24]



Obr.4-6 Škoda Sentinel, Brno[29]

#### 4.4 Lokomobila

Jde o mobilní sestavu parního kotle s parním strojem. Používaly se k orbě polí. Systém orby se skládal ze dvou lokomobilů, které byly přes pole naproti sobě. Mezi nimi bylo nataženo lano na kterém byla připevněn pluh. Jeden lokomobil lano navíjel a druhý ho odvíjel, při tom pluh dělal v poli brázdy. Na konci brázdy obě lokomobily popojely dál a takto zoraly celé pole. Díky jejich malé hmotnosti byla orba tímto způsobem velice kvalitní protože nezpůsobovala udusávání pole.

Kromě orby byly lokomobily využívány k pohánění generátorů elektrického proudu přes plochý řemen. Takto uzpůsobená lokomobila byla využita v obou světových válkách jako polní elektrárna[14].



obr. 4-7 Lokomobila v Muzeum Narodowe Rolnictwa v Szreniawie, Polsko[13]

#### 4.5 Parní válec

Jedná se o speciální silniční stroj, který se používal k válcování silnic jeho vlastní vahou a tím k jejich zpevnění. Je složen podobně jako lokomobila z ležatého parního kotle, který poháněl dvě zadní kola. Nad kotlem je umístěn parní stroj se setrvačником. Ve předu místo předních kol má široký válec. V zadní části parního válce se nacházel prostor pro obsluhu se zásobníkem na uhlí a vodu. Takto konstrukčně provedený parní válec upravoval silnice po celém světě zhruba do druhé poloviny 20. století. Po té byl v provozu nahrazen silničním válcem poháněným dieslovým motorem nebo vibračním válcem[21].



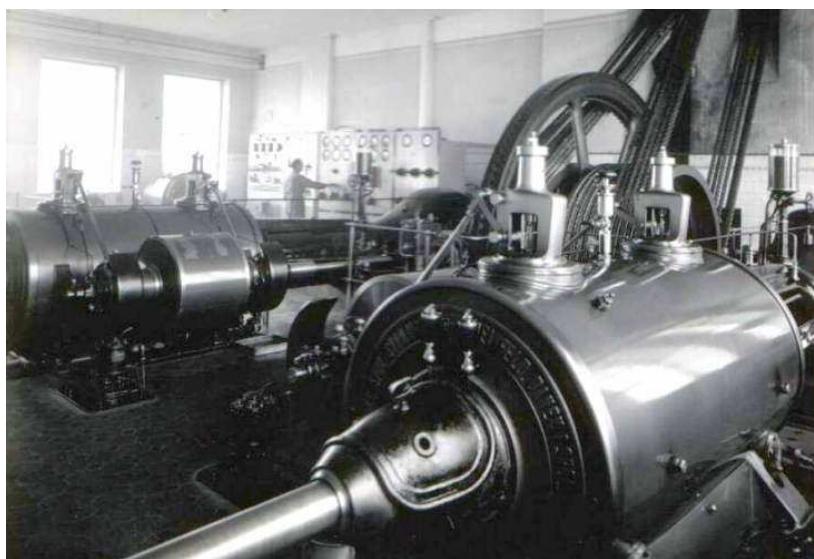
Obr. 4-8 Parní válec z muzea starých strojů, Brno[22]

## 4.6 Stabilní parní stroj

Tento parní stroj byl připevněn na stabilním podloží, se kterým se již nedalo hýbat. Většinou to bylo v budově nebo v místnosti, které se říkalo strojovna. Takto používaný stroj mohl mít několik funkcí. Mohl pohánět generátor, čímž vyráběl elektřinu. Nebo byla jeho mechanická práce pomocí převodů rozváděna do okolí. Tohle uspořádání sloužilo k transféru hnací síly od jednoho zdroje hned k několika spotřebičům. Z původních provozů můžeme vidět zachovalé a funkční parní stroje tohoto typu v muzeích[11].



Obr.4-9 Stabilní parní stroj v Tower Bridge v Londýně. Jeden ze dvou strojů sloužících ke zvedání mostu[12].



Obr. 4-10 Parní stroj pro pohon strojů i elektrických alternátorů Textilní továrna v Humpolci na Brunce(1948)[7]

## 5. Využití parního stroje v 21.století

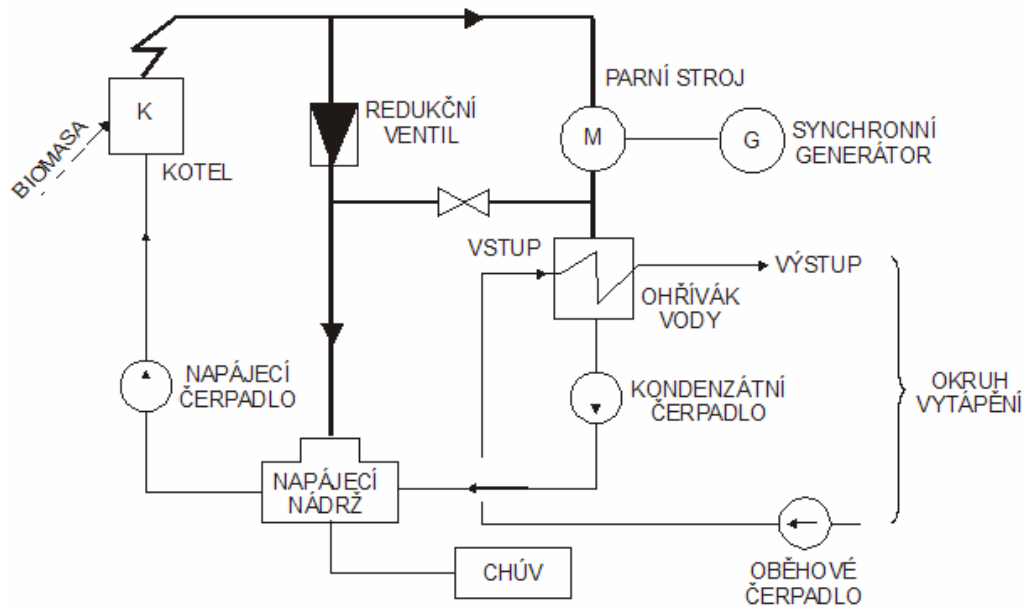
### 5.1 Energie z biomasy a parní stroj

O biomase se dnes mluví jako o významném obnovitelném zdroji energie. Veškerý materiál, který se dá spálit a nějakým způsobem energeticky využít, je biomasa. Je prakticky všude okolo nás. Stačí ji jen vhodně zpracovat a využít. V našich přírodních podmínkách se získává z odpadu ze zemědělských a dřevozpracujících průmyslů nebo ji lze vypěstovat v podobě energetických plodin nebo rychle rostoucích dřevin.

U biomasy jsou hlavními parametry výhřevnost a obsah vody. Dřevěné peletky s nízkým obsahem vody a popeloviny může mít výhřevnost vyšší než hnědé uhlí. Naopak palivo s vysokým obsahem vody je špatně spalitelné, tudíž má nízkou energetickou výhřevnost. Proto je důležité materiál co nejdokonaleji vysušit a spálit v kvalitních zařízeních a zajistit tak co nejefektivnější hoření[31].

Velké spalovny využívají biomasu jen jako doplňkové palivo z důvodu náročnosti na skladování a dopravu této suroviny. Existují u nás ale i menší provozy, které spalují výhradně biomasu. Výkony těchto malých tepláren a spaloven se pohybují v jednotkách MW. Parní výkon jejich kotlů se pohybuje v řádu jednotek tun za hodinu. Tlakem se tato pára pohybuje do 1,3MPa a teplotou okolo 200°C.

V takovýchto provozech se čím dál častěji používají na redukcí páry parní stroje nebo turbíny o nízkých výkonech v řádech desítek kW. Díky tomuto zapojení získávají k dodávanému teplu i malý podíl vyrobené elektřiny (8-10%). I přes svoji nízkou účinnost této vynucené výroby elektrické energie citelně zlepšuje bilanci zařízení. Tato energie slouží převážně pro vlastní spotřebu teplárny[28].



Obr.5-1 Tepelné schéma výtopny s parním strojem pro redukcí páry[28]

## 5.2 Parní motory malých výkonů

V energetice se stále hledají cesty jak nejlépe využít energii paliva. Jednou z odpovědí na tuto otázku je kogenerace. Ta v sobě skrývá výrobu tepla a elektrické energie v jednom zařízení. Pro využití odpadního tepla nebo úpravě parametrů páry se redukčními ventily na škrcení páry nahradí expanzním tepelným motorem.

K tomuto záměru slouží buď turbína nebo pístový tepelný parní motor. Tyto stroje těží energii z expanze páry a slouží tak jako zdroje elektrické a mechanické energie. Při současném trendu snižování nákladů na provoz zařízení je tento způsob kogenerace hojně využíván. Protože využívaná pára má nízké parametry, musí instalovat tepelné motory s malými výkony.

V tomto směru mají turbíny některá omezení, jako např. minimální délka lopatky a množství proudící páry. Pára se musí minimálně o 20°C přehřívat. Při dodržení těchto kritérií se účinnost parní turbíny pohybuje okolo 60-76%.

Pro tyto technické problémy je možným řešením právě expanzní parní stroj. Protože se jedná o objemový tepelný motor tak u něj lze libovolně zmenšovat rozměry tím i výkony při zachování jeho objemové účinnosti na vysoké úrovni. Jeho vnitřní termodynamická účinnost pro výkony 20 – 100kW může dosáhnout 80% i více. Ztráty netěsností lze zanedbat díky kontaktním ucpávkám. Díky jeho nízkým otáčkám (do 1500 min<sup>-1</sup>) ho lze přímo připojit na vícepólový elektrický generátor. Tímto nám odpadají problémy s konstrukcí speciálních ložisek, vysokých obvodových rychlostí, převody a olejovým hospodářstvím pro převodovku. Výskyt mazacího oleje z pístu a pístní tyče je zachycován v odlučovačích.

Parní stroj by tedy mohl být vhodnou variantou tam, kde výrobci parních turbín nemohou poskytnout adekvátní technické řešení[25, 32].



Obr. 5-2 Parní motor PM-VS pro výkon (10-75)kWe [26, 27]

## 6. Návrh parního pístového motoru pro redukci páry

Pomocí výpočtového a grafického řešení provedeme návrh jednoválcového motoru se čtyř ventilovým rozvodem.

### 6.1 Vstupní hodnoty

Vstupní tlak páry	$p_0 = 1,5 \text{ MPa}$
Vstupní teplota páry	$t_0 = 188,29 \text{ }^\circ\text{C}$ (odpovídá sytosti páry při daném tlaku)
Protitlak	$p_4 = 0,1 \text{ MPa}$
Svorkový výkon	$P_{\text{SW}} = 12 \text{ KW} = 12.000 \text{ W}$
Otáčky	$n = 1500 \text{ min}^{-1} = 25 \text{ s}^{-1}$

### 6.2 Volené hodnoty

Pro sestavení indikátorového diagramu jsou hodnoty voleny dle doporučené literatury[9].

Škodný prostor	$\varepsilon_0 = 6,5\%$
Plnění	$\varepsilon_1 = 25\%$
Vyplachování	$\varepsilon_2 = 6,5\%$
Mocnitel	$m = 1,1(-)$
Úhel	$\text{tg } \alpha = 0,25$
Úhel	$\text{tg } \beta = 0,278$
Předchozí vstup	$\Psi_1 = 12^\circ$
Předchozí výstup	$\Psi_2 = 44^\circ$
Tlaková ztráta v parovodu	$\Delta p_0 = 0,075 \text{ MPa}$
Tlaková ztráta v rozvodu	$\Delta p_1 = 0,1 \text{ MPa}$
Tlaková ztráta v kondenzátoru	$\Delta p_4 = 0,01 \text{ MPa}$

### 6.3 Sestavení indikátorového diagramu

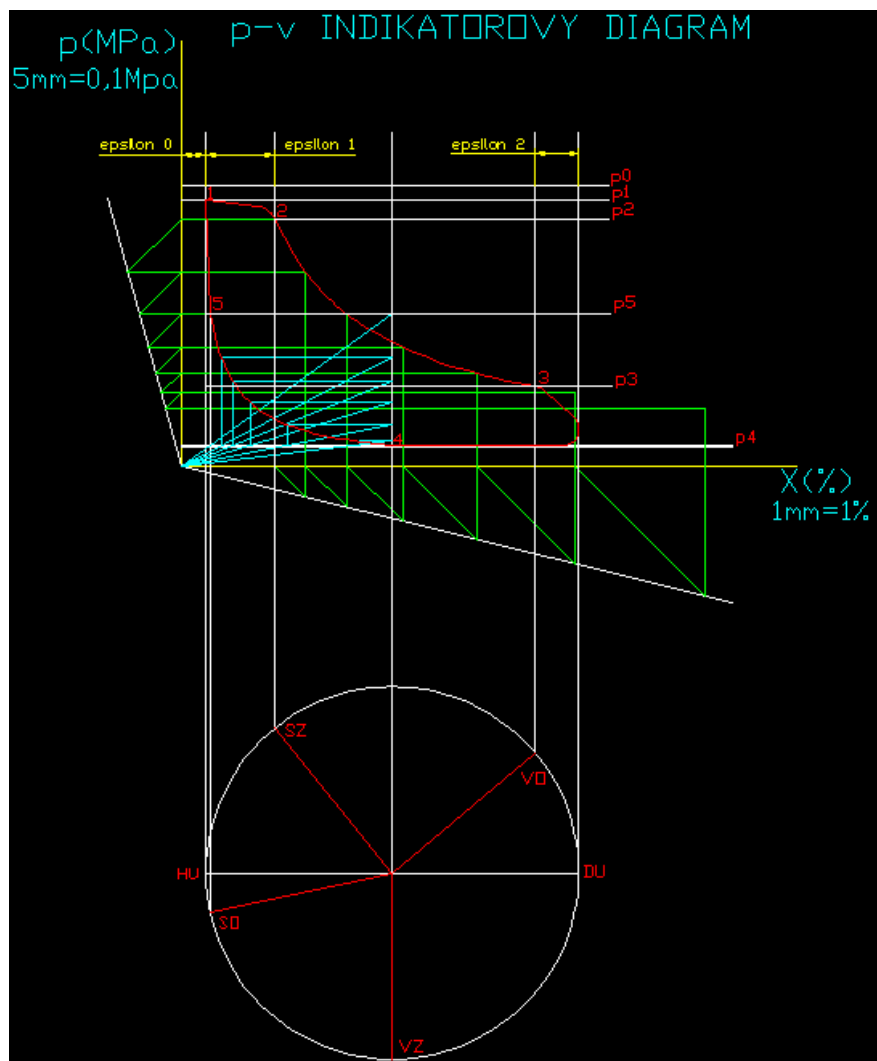
Pomocí programu Autocad 2006 byl graficky sestaven indikátorový diagram. Postup konstrukce s ohledem na zadané hodnoty a zvolené hodnoty z literatury[9]. Velikost předpokládané indikované práce odpovídá ploše ohraničené červenou křivkou na obrázku 2-1

#### Tlak na vstupu do rozvodu

$$p_1 = p_0 - \Delta p_0 = 1,5 - 0,075 = 1,425 \text{ MPa}$$

#### Tlak na počátku expanze

$$p_2 = p_0 - \Delta p_0 - \Delta p_1 = 1,5 - 0,075 - 0,1 = 1,325 \text{ MPa}$$



Obr.6-1 Indikátorový a kruhový diagram[33]

(HU-horní úvrať,DU-dolní úvrať,SO-sání otevřeno,SZ-saní zavřeno,VO-výfuk otevřen,VZ-výfuk zavřen)

## 6.4 Určení zdvihového objemu

### Plocha indikátorového diagramu

$$S_{id} = 2970,25 \text{ mm}^2$$

### Délka indikátorového diagramu

$$L_{id} = 100 \text{ mm}$$

### Střední indikovaný tlak

$$P_{id} = ((S_{id} / L_{id}) \cdot 0,1) / 0,5 = ((2970,25 / 100) \cdot 0,1) / 0,5 = 0,59405 \text{ MPa}$$

### Účinnosti komponent

Mechanická účinnost  $\eta_m = 0,82 (-)$

Účinnost el. Generátoru  $\eta_G = 0,91 (-)$

Počet pracovních prostor  $n_c = 2(-)$

### Indikovaná práce jednoho oběhu

$$A_i^1 = \frac{P_{sw}}{\eta_m \cdot \eta_g \cdot n \cdot n_c} = \frac{12000}{0,82 \cdot 0,91 \cdot 25 \cdot 2} = 321,6295899 \text{ J}$$

### Zdvihový objem

$$V_{vmax} = \frac{60 \cdot P_{sw}}{n \cdot P_{id}} = \frac{60 \cdot 12}{1500 \cdot 0,59405} = 0,8080 \text{ dm}^3 = 0,000808 \text{ m}^3$$

## 6.5 Výpočet hlavních rozměrů válce

### Zdvih pístu

Součinitel zmenšení činné plochy pístu  $\psi = 0,95$   
Střední pístová rychlost  $c_{st} = 3,5 \text{ m/s}$   
Hodnoty voleny dle literatury [9].

$$L_p = \frac{c_{st}}{2 \cdot n} = \frac{3,5}{2 \cdot 25} = 0,07 \text{ m} = 70 \text{ mm}$$

### Vrtání válce

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{vmax}}{\psi \cdot \pi \cdot L_p}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,000808}{0,95 \cdot \pi \cdot 0,07}} = 0,12 \text{ m} = 120 \text{ mm}$$

### Průměr pístní tyče

$$d = D \cdot \sqrt{1 - \psi} = 120 \cdot \sqrt{1 - 0,95} = 26,83 \text{ mm}$$

### Skutečný zdvihový objem válce

$$V_{vmaxs} = \frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2) \cdot L_p = \frac{\pi}{4} \cdot (0,12^2 - 0,02683^2) \cdot 0,07 = 0,0007521 \text{ m}^3$$

### Délka ojnice

$$L_o = (L_p / 2) \cdot 5 = (70 / 2) \cdot 5 = 175 \text{ mm}$$

## 6.6 Výpočet spotřeby páry

Za předpokladu, že pro vypočtený tlak  $p_2$  má v bodě 2 (obr.6-1) teplotu sytosti, je měrný objem v tomto bodě  $v_2 = 0,146545 \text{ Kg/m}^3$ .

Mezi body 1 a 2 uvažujeme přibližně izoentalpickou expanzy. Množství páry tak určíme z objemu válce při uzavření plnění a měrného objemu páry  $v_2$

### Objem válce při uzavření plnění

$$V_{v_2} = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_1}{100} \cdot V_{vmaxs} = \frac{6,5 + 25}{100} \cdot 0,0007521 = 0,000237 \text{ m}^3$$



### **Spotřeba páry na jeden oběh**

$$m_1 = \frac{V_{v_2}}{v_2} = \frac{0,000237}{0,1465} = 0,00162 \text{ kg}$$

### **Spotřeba páry**

$$m_i = m_1 \cdot n_c \cdot n = 0,00162 \cdot 2 \cdot 25 = 0,0809 \text{ kg / s} = 291,2 \text{ kg / hod}$$

## **6.7 Výpočet účinnosti**

### **Určení entalpií**

$$i_3 = f_i(x; p_1) = (1; 1,425) = 2783,4 \text{ kJ/kg}$$

$$s_3 = f_s(x; p_1) = (1; 1,425) = 6,46 \text{ kJ/kgK}$$

$$i_4 = f_i(s_3; p_4) = (6,46; 0,1) = 2340,85 \text{ kJ/kg}$$

### **Ideální práce při izentropické expanzi**

$$A_{i1} = m_1 \cdot (i_3 - i_4) = 0,00162 \cdot (2783,4 \cdot 10^3 - 2340,85 \cdot 10^3) = 716,9 \text{ J}$$

### **Práce oběhu přepočítaná pomocí indikovaného tlaku**

$$A_{i1} = p_{id} \cdot V_{v \max s} = 594050 \cdot 0,000752 = 446,73 \text{ J}$$

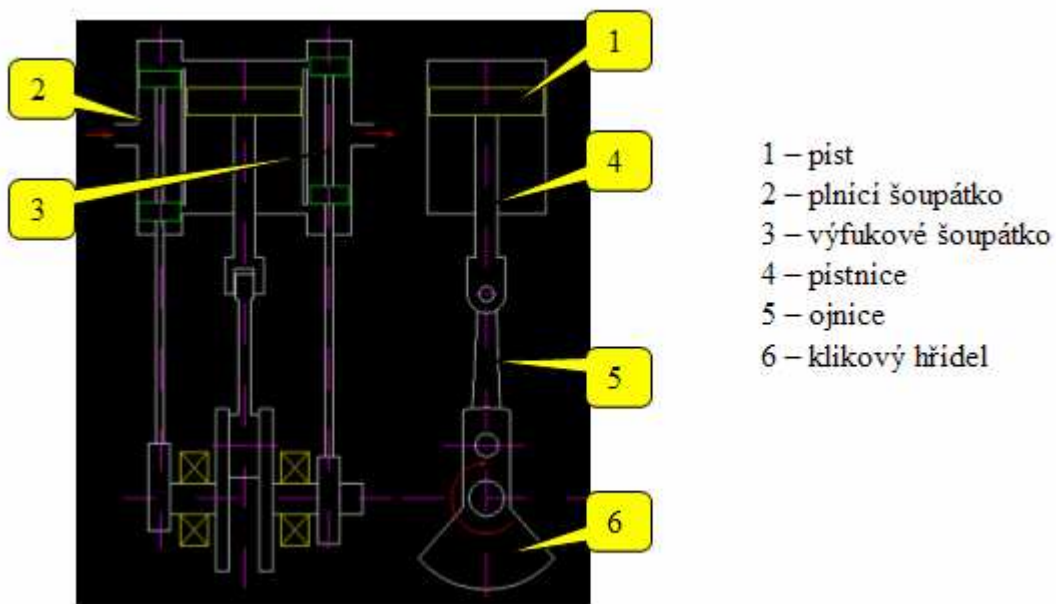
### **Vnitřní účinnost**

$$\eta_{idi} = \frac{A_{i1}}{A_1} = \frac{446,73}{716,9} = 0,623 = 62,3\%$$



## 7.2 Jednoválcový dvojčinný stroj s rozvodem přes dvě šoupátka

Takto volený rozvod parního stroje je tvořen dvěma šoupátky uloženými po stranách válce. Šoupátka jsou ovládána táhly, které jsou přes oko připevněny ke klikovému hřídeli. První šoupátko zajišťuje plnění válce parou z přední i zadní strany pístu. Druhé šoupátko ovládá výfuk páry ven pro obě strany pístu. Olej obsažený v kapičkách mokré páry promazává píst i šoupátka. Díky použitým dvěma šoupátkům v rozvodu můžeme optimálně nastavit dobu plnění, expanze, výfuku i komprese. O těsnost válce proti únikům páry se stará dotyková ucpávka. Pro jeho jednoduchost má nižší výrobní náklady než ventilový rozvod[9, 25].

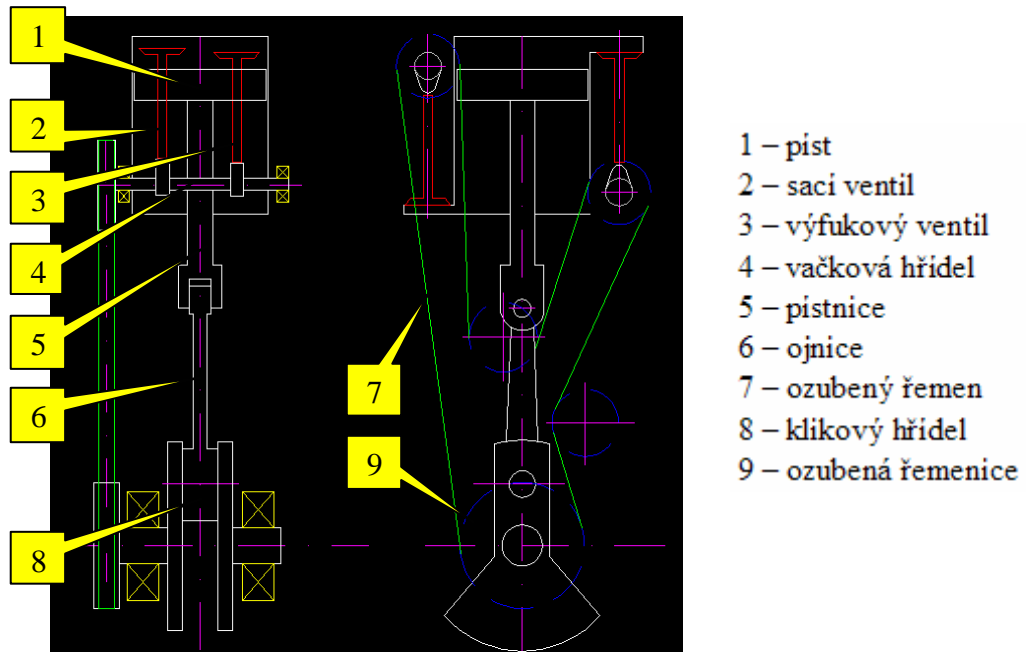


Obr.7-2 Schéma koncepce parního motoru šoupátkového [25]

## 7.3 Jednoválcový dvojčinný stroj s rozvodem pomocí čtyř ventilů

Moderní konstrukce parních motorů používá ventilový rozvod páry. Vačkové hřídele ovládají ventily, které jsou umístěny po stranách válce. Vačkové hřídele pohání přes ozubené řemenice klikový hřídel se setrvačnickem. Olej obsažený v kapičkách mokré páry maže píst ve válci. Olejový systém na mazání klikového mechanismu je poháněn zubovým čerpadlem. Těsnost válce je garantována kontaktní ucpávkou.

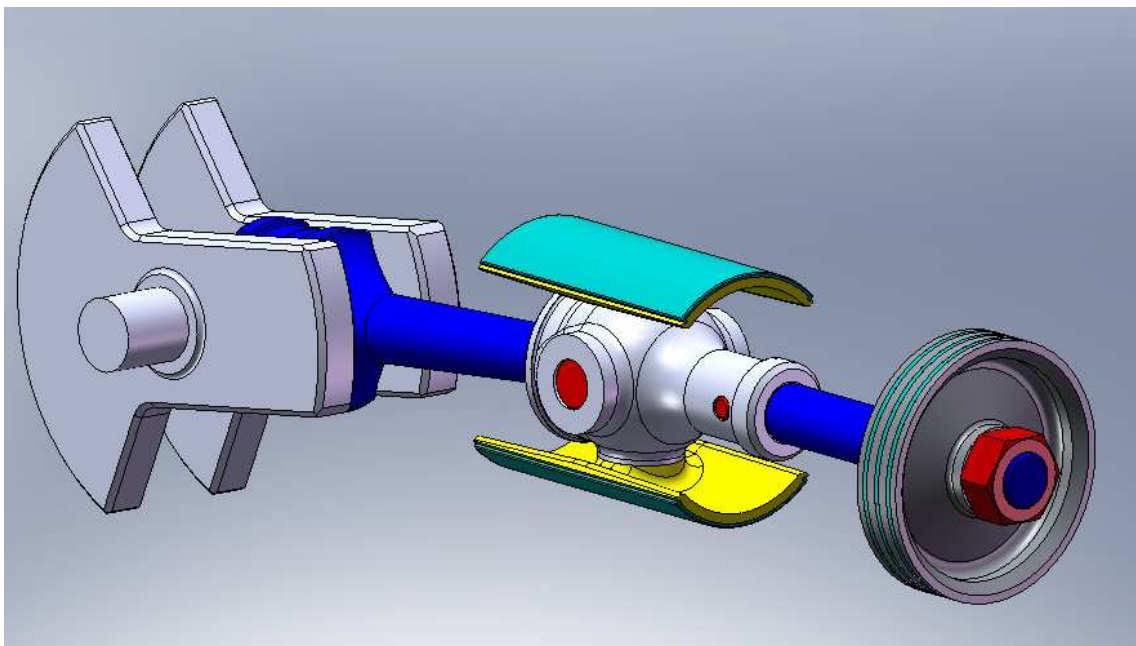
Ventily mají větší mechanickou účinnost než šoupátka, protože jsou značně odlehčeny a nepředstavují pro poháněcí ústrojí takovou zátěž. Tento mechanismus má mnohem menší mechanické ztráty a umožňuje dokonalejší rozvádění páry. Takto navržený mechanismus je sice dokonalejší než koncepce s šoupátkem, ale při vysokých otáčkách je jeho použití nevhodné a má také vyšší cenu[9, 25].



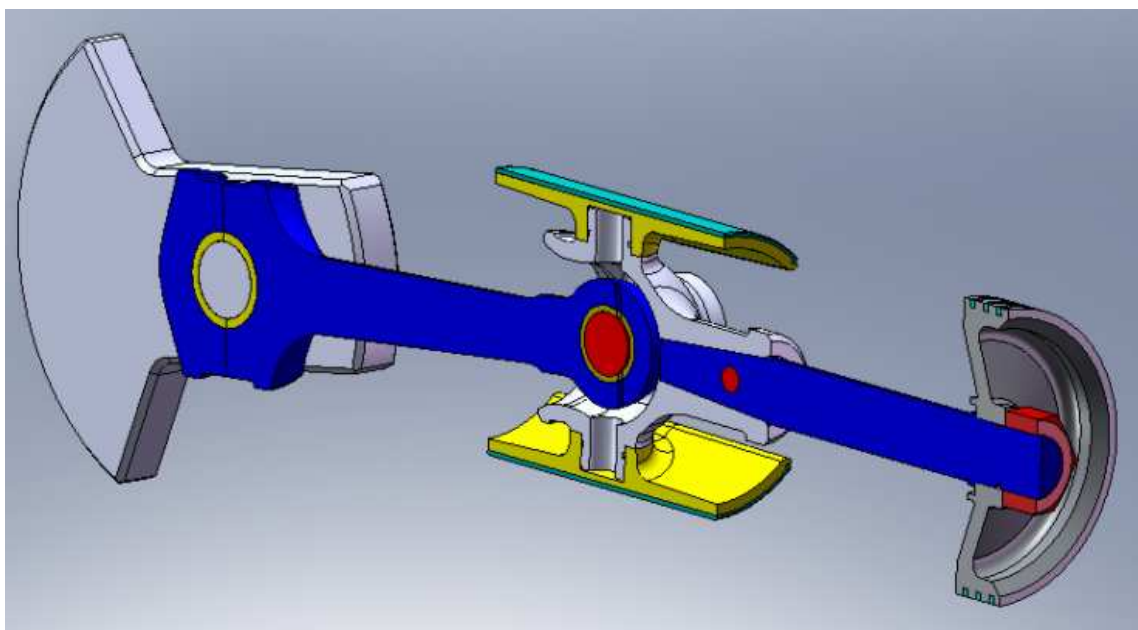
Obr.7-3 koncepce parního motoru s ventily[25]

#### 7.4 Klikový mechanismus

Klikový mechanismus který zobrazuje obr. 7-4 je tvořen pístem, pístní tyčí, křížákem, ojnicí a klikového hřídele. V křížáku je pístní tyč fixována kolíkem a ojnice je v něm uložena tak, aby mohla provádět kývavý pohyb, pomocí čepu.



Obr. 7-4 klikový mechanismus[33]



Obr. 7-5 řez klikovým mechanismem[33]

Píst je z důvodu hmotnosti a tepelných dilatací konstruován s odlehčenými čelními plochami. Aby byl škodlivý prostor co nejmenší, tak musí vybrání pístu i konců válce na sebe přesně dosednout. Těsnost pístu ve válci je zaručena třemi pístními kroužky.

Pístní tyč je pístové strany zakončena závitem. Na tento závit je natočena matice, která tak drží píst pevně na místě. Druhá strana tyče končí kuželem tak, aby přesně pasovala do křížáku, kde je zafixována kolíkem.

Druhá strana křížáku je zakončena výběhem, který musí být dostatečně široký, aby dokázal výkyvy ojnice bez problému zpracovat. Aby bylo jeho vedení ve válci co nejlepší, obsahuje smýkadla, jenž mají válcovitý tvar. Toto vedení vyrovnává radiální složku síly, která působí v čepu od ojnice. Proto jsou smýkadla opatřena ocelovým pláštěm, který jim poskytuje ochranu před namáháním na otěr.

Klikový hřídel je tvořen jedním dílem, proto má ojnice dělenou pánev. Je to jednoduché při montáži, vyvažování a případných opravách. Ojnice je vzhledem k otáčkám opatřena kluznými ložisky. Ložisko v pánvi je dvoudílné a je uloženo v bronzovém obalu s mazací drážkou. Konec ojnice, který je v křížáku, je opatřen mazací drážkou s otvory. K ložiskům je mazivo dopravováno soustavou dutin v klikovém hřídeli [9, 33].

## Závěr

Parní stroj znamenal pro lidstvo obrovský pokrok. Jeho vynález odstartoval průmyslovou revoluci a umožnil tak zrychlení výroby a usnadnil práci v mnoha odvětvích průmyslu. S jeho pomocí v dopravních prostředcích se lidé mohli dopravovat mnohem rychleji a mnohem dál než kdykoliv předtím. Má obrovskou výhodu v univerzálnosti paliva, stačí mít jen dostatek vody a pořádný kotel, jedno jakého typu. Postupem času ho nahrazovaly mnohem efektivnější stroje, které umožnily lidstvu pokročit zase o krok dále ve vývoji. V dnešní době se parní stroje starších typů nacházejí už jen v muzeích.

Se vzrůstajícími požadavky na úspory energie, a co nejdokonalejšímu využívání paliv, se parní stroj dostává opět na scénu. S využitím moderních materiálů se jeho konstrukce stává kompaktnější, méně náročná na údržbu a při nízkých otáčkách má přijatelnou účinnost. Jeho funkce se nemění, pouze pohled na jeho konstrukci. Pára, kterou zpracovává, může mít nižší parametry než je potřeba na provoz parních turbín. Podle parametrů páry můžeme měnit výkony a velikosti parních strojů. Moderní konstrukce umožňuje široké uplatnění parních pístových motorů právě tam, kde výrobci parních turbín nemají přijatelné technické a finanční řešení .

V poslední době má veliké zastoupení v malých spalovnách a teplárnách spalujících biomasu. V těchto malých provozovnách se používalo na úpravu parametrů páry škrcení pomocí redukčních ventilů, které je čím dál hojněji nahrazováno expanzí v tepelném motoru. Toto zapojení umožňuje úpravu páry na požadované parametry a navíc využívá toto odpadní teplo k výrobě elektrického proudu. Výkony těchto zařízení se pohybují v řádu desítek kilowatt. Je to jednoduché a efektivní řešení, které provozovněm odlehčuje vlastní spotřebu elektrické energie.

Parní stroj skýtá mnoho užitečných možností. Jeho využití v malých spalovnách na biomasu je určitě další krok jak snižovat spotřebu fosilních paliv, a tím i zlepšovat životní prostředí.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] Parní stroj [online]. Wikipedie, otevřená encyklopedie. [28.3. 2010]. Dostupné na WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Parn%C3%AD\\_stroj](http://cs.wikipedia.org/wiki/Parn%C3%AD_stroj)>.
- [2] Parní stroj [online]. Století páry [28.3.2010]. Dostupné z WWW: <<http://www.fdhs.cz/historie.html>>
- [3] Parní stroj [online]. Wikipedie, otevřená encyklopedie. [29.3. 2010]. Dostupné na WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Thomas\\_Savery](http://cs.wikipedia.org/wiki/Thomas_Savery)>.
- [4] Parní stroj [online]. Wikipedie, otevřená encyklopedie. [29.3. 2010]. Dostupné na WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Thomas\\_Newcomen](http://cs.wikipedia.org/wiki/Thomas_Newcomen)>.
- [5] Parní stroj [online]. Wikipedie, otevřená encyklopedie. [29.3. 2010]. Dostupné na WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/James\\_Watt](http://cs.wikipedia.org/wiki/James_Watt)>.
- [6] Parní stroj [online]. Katedra fyziky, Praha [11.4.2010]. Dostupné na WWW: <[http://kdf.mff.cuni.cz/heureka/puvodni-web/cesty/cern2003/LD/ld\\_035.jpg](http://kdf.mff.cuni.cz/heureka/puvodni-web/cesty/cern2003/LD/ld_035.jpg)>.
- [7] Parní stroj [online]. Logistický areál Brunka [11.4.2010]. Dostupné na WWW: <[http://www.brunka.cz/img/hist\\_obr\\_13.jpg](http://www.brunka.cz/img/hist_obr_13.jpg)>.
- [8] Termika, motory [online]. Školní web [30.3.2010]. Dostupné na WWW: <<http://jan.gfxs.cz/studium/files/termika/motory2.pdf>>.
- [9] KLÁG, J. *Parní stroje a turbíny - Obsluha a provoz*. 1. vydání. Praha: Vydavatelství Práce, 1952. 319 s.
- [10] Parní stroj [online]. Parní stroj [6.4.2010]. Dostupné na WWW: <<http://www.parnistroj.czweb.org/schema.html>>.
- [11] Parní stroj [online]. Wikipedie, otevřená encyklopedie. [7.4. 2010]. Dostupné na WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Stabiln%C3%AD\\_parn%C3%AD\\_stroj](http://cs.wikipedia.org/wiki/Stabiln%C3%AD_parn%C3%AD_stroj)>.
- [12] Parní stroj [online]. Wikipedie, otevřená encyklopedie. [7.4. 2010]. Dostupné na WWW: <<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4c/Tower.bridge.99.machinery.london.arp.jpg>>.
- [13] Parní stroj [online]. Statické panorama [7.4.2010]. Dostupné na WWW: <<http://static.panoramio.com/photos/original/15164555.jpg>>.
- [14] Parní stroj [online]. Wikipedie, otevřená encyklopedie. [7.4. 2010]. Dostupné na WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Lokomobila>>.
- [15] Parní stroj [online]. Wikipedie, otevřená encyklopedie. [7.4. 2010]. Dostupné na WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Parn%C3%AD\\_lokomotiva](http://cs.wikipedia.org/wiki/Parn%C3%AD_lokomotiva)>.
- [16] Parní stroj [online]. Wikipedie, otevřená encyklopedie. [7.4. 2010]. Dostupné na WWW: <<http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Ctyrkolak.jpg>>.
- [17] Parní stroj [online]. Wikipedie, otevřená encyklopedie. [7.4. 2010]. Dostupné na WWW: <[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5f/Replica\\_rocket.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5f/Replica_rocket.jpg)>.
- [18] Parní stroj [online]. Wikipedie, otevřená encyklopedie. [10.4. 2010]. Dostupné na WWW: <[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7d/Silownia\\_bocznokolowca\\_Gdansk.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7d/Silownia_bocznokolowca_Gdansk.jpg)>.
- [19] Vodní doprava [online]. Minnesota tourism [10.4.2010]. Dostupné na WWW: <<http://www.minnesotabeautiful.com/wp-content/uploads/image/paddle%20boat.jpg>>.
- [20] Parní stroj [online]. Wikipedie, otevřená encyklopedie. [10.4. 2010]. Dostupné na WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Kolesov%C3%BD\\_parn%C3%ADk](http://cs.wikipedia.org/wiki/Kolesov%C3%BD_parn%C3%ADk)>.
- [21] Parní stroj [online]. Wikipedie, otevřená encyklopedie. [10.4. 2010]. Dostupné na WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Parn%C3%AD\\_v%C3%A1lec](http://cs.wikipedia.org/wiki/Parn%C3%AD_v%C3%A1lec)>.
- [22] Parní stroj [online]. Internetové Fotoalbum [10.4.2010]. Dostupné na WWW: <[http://img5.rajce.idnes.cz/d0508/1/1975/1975085\\_cfec6629d1e0d30dc4ae66b60eccd4a4/images/parni\\_valec.JPG](http://img5.rajce.idnes.cz/d0508/1/1975/1975085_cfec6629d1e0d30dc4ae66b60eccd4a4/images/parni_valec.JPG)>.

- [23] Parní stroj [online]. Wikipedie, otevřená encyklopedie. [10.4. 2010]. Dostupné na WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Parn%C3%AD\\_automobil](http://cs.wikipedia.org/wiki/Parn%C3%AD_automobil)>.
- [24] Parní stroj [online]. Galerie obrázků [10.4.2010]. Dostupné na WWW: <<http://www.battyden.net/pictures/Photos/steam/stanley4.jpg/stanley4.jpg>>.
- [25] Fiedler, J. *Parní motory malých výkonů*. článek v časopise: 3T číslo 5/2000. 16-17 s. ISSN 1210-6003.
- [26] Polycorp [online]. Energie pro budoucnost [11.4.2010]. Dostupné na WWW: <<http://polycomp.cz/obrazek.php?lang=cz&cesta=vyroba/obrazky/5pmvs01.jpg>>.
- [27] Polycorp [online]. Energie pro budoucnost [11.4.2010]. Dostupné na WWW: <<http://polycomp.cz/obrazek.php?lang=cz&cesta=vyroba/obrazky/5pmvs03.jpg>>.
- [28] Fiedler, J. *Energie z biomasy a parní stroj*, VUT Brno, FSI, OEI 4 strany, 2008
- [29] Parní stroj [online]. Wikipedie, otevřená encyklopedie. [12.4. 2010]. Dostupné na WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%A0koda\\_Sentinel](http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%A0koda_Sentinel)>.
- [30] Průmyslová revoluce[online]. Navajo, otevřená encyklopedie. [12.4.2010]. Dostupné na WWW: <<http://prumyslova-revoluce.navajo.cz/prumyslova-revoluce.jpg>>.
- [31] Biomasa [online]. Energie pro města [12.4.2010]. Dostupné na WWW: <<http://www.energiepromesta.cz/rubrika/biomasa>>.
- [32] Polycorp [online]. Energie pro budoucnost [12.4.2010]. Dostupné na WWW: <<http://www.polycomp.cz/page.php?lang=cz&f=1fk0clanek>>.
- [33] Novotný, Z. *Výpočet a návrh konstrukce parního pístového motoru*. VUT Brno, FSI, OEI 22 stran, 2008.



## Seznam použitých značení a symbolů

symbol	rozměr	název
c	$m/s$	rychlost
D	$m, mm$	průměr
d	$m, mm$	průměr
i	$kJ/kg$	entalpie
L	$m, mm$	zdvih
l	$m, mm$	zdvih
m	$kg/s$	hmotnostní tok páry
n	$s^{-1}, min^{-1}$	otáčky
p	$Pa, MPa$	tlak
P	$KW/W$	výkon
s	$KJ/kg.K$	entropie
S	$m^2$	průřez
t	$^{\circ}C$	teplota
u	$m/s$	obvodová rychlost
v	$m^{-3}/kg$	měrný objem
V	$m^3$	objem
x	-	měrná suchost
$\alpha$	$^{\circ}$	úhel
$\beta$	$^{\circ}$	úhel
$\varepsilon$	-	objemový poměr
$\eta$	-	účinnost
$\varphi$	$^{\circ}$	úhel kliky
$\psi$	-	součinitel plochy