



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

PARNÍ STROJ

STEAM ENGINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

LUKÁŠ FLIMEL

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAN FIEDLER, Dr.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Lukáš Flimel

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:

Parní stroj

v anglickém jazyce:

Steam Engine

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte parní stroj o výkonu do 30 kW

Parametry páry: 1,42 MPa sytá pára

Protitlak: 0,25 MPa

Otáčky: 1 500 /min

Cíle bakalářské práce:

- 1) Zpracujte rešerši používaných konstrukcí parních strojů a navrhněte vhodnou koncepci včetně regulace
- 2) Navrhněte hlavní rozměry parního stroje
- 3) Základní konstrukční výkresy vybraných součástí stroje

Seznam odborné literatury:

Klág, J.: Parní stroje. SNTL 1953

Firemní podklady k parním strojům

Fiedler, J.: Parní turbíny - návrh a výpočet, CERM- Brno 2004

Krbek, J. Polesný, B. Fiedler, J.: Strojní zařízení tepelných centrál, PC-DIR, 1999

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

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 19.10.2012

L.S.

doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.
Ředitel ústavu

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

Anotace:

Práce je zaměřená na pístové parní motory. V první části práce je pojednáno o historii vzniku, vývoji, užívaných koncepcích, regulaci a praktickém využití pístových parních motorů. Druhá část práce je zaměřena na termomechanický a pevnostní výpočet a konstrukční řešení parního válce včetně pístu a pístní tyče.

Annotation:

This thesis is intended on piston`s steam engines. The first part of this thesis is about history, developing, using conceptions, regulation and practical using of piston`s steam engines. In the seconde part of this thesis is made thermal and solidity calculation and konstruktive solve of steam engine.

Klíčové slova:

Parní motor
Regulace
Účinnost

Key words:

Steam engine
Regulation
Operation

Bibliografická citace:

FLIMEL, L. *Parní stroj*. Brno, 2013. 34 s., 6 s. příloh. Bakalářská práce na Vysokém učení technickém na Ústavu energetickém. Vedoucí diplomové práce Doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.

Čestné prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, bez cizí pomoci. Během práce jsem vycházel z vlastních znalostí, z odborné literatury a odborných konzultací.

V Brně, 15.5.2013

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu práce Doc. Ing. Janovi Fiedlerovi, Dr. za vedení bakalářské práce a za cenné rady, které mě byly poskytnuty.

Obsah:

1	Úvod.....	13
1.1	Historie parního motoru	13
1.1.1	Wattovo zdokonalení	13
1.1.2	Využití zdokonaleného wattova motoru v praxi.....	14
1.1.3	Další vývoj pístových parních motoru	14
1.2	Dělení pístových parních motorů podle koncepce.....	15
1.2.1	Stabilní motory ležaté	15
1.2.2	Stabilní motory stojaté	16
1.2.3	Lokomotivní motory	16
1.2.4	Lodní motory	17
1.3	Parní rozvody	17
1.3.1	Ventilové rozvody.....	17
1.3.2	Šoupátkové rozvody.....	18
1.4	Regulace.....	21
2	Návrh parního motoru.....	22
2.1	Výpočet parního motoru	22
2.1.1	Termomechanický výpočet a rozměrový návrh parního motoru.....	22
2.1.2	Pevnostní výpočet a rozměrový návrh.....	27
2.2	Konstrukční řešení	30
2.2.1	Válec	30
2.2.2	Vložka válce.....	30
2.2.3	Píst.....	30
2.2.4	Pístnice.....	30
2.2.5	Víka parního válce	30
3	Závěr	31
4	Seznam použité literatury	32
5	Seznam použitých symbolů	32
6	Seznam příloh	34

1 Úvod

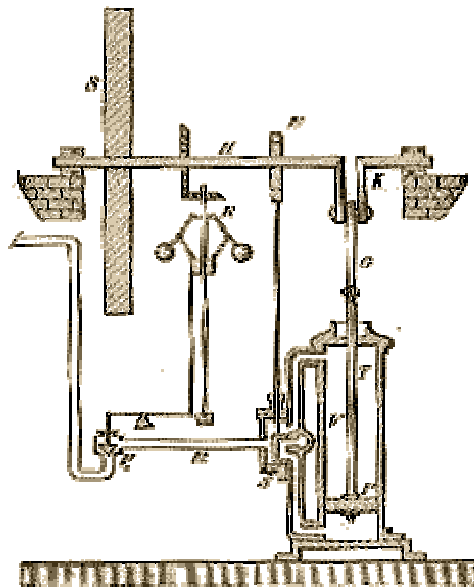
1.1 Historie parního motoru

Vynález parního pístového motoru ovlivnil celou řadu technických odvětví. Je považován za symbol průmyslové revoluce 19.století. Příčinou prvního vzniku parního motoru byla nutnost čerpání podzemní vody z těžbařských dolů efektivnějším způsobem.

První pístový parní motor byl postaven Angličanem Thomasem Newcomenem v letech 1722-1724. Tento parní motor ještě nepřeváděl přímočarý pohyb pístu na rotační. Princip činnosti byl založen na expanzi páry v uzavřeném válci s pístem, který byl zahříván. Po expanzi páry byl válec skrácen studenou vodou v důsledku čeho došlo ke zpětné kondenzaci páry. Ohřev a chlazení válce probíhalo periodicky v důsledku čeho vznikala opakující se podtlak, který byl využíván k čerpání vody. Tento první parní motor byl málo účinný a rychlost práce byla velmi nízká.

1.1.1 Wattovo zdokonalení

Ve vývoji parního pístového motoru udělal velký pokrok James Watt. Wattovo zdokonalení spočívalo v myšlence oddělit výrobu páry, expanzi a kondenzaci do tří nezávislých nádob, to je do kotle, válce a kondenzátoru. Tato myšlenka byla patentovaná roku 1769. Další zdokonalení spočívalo v přeměně přímočarého pohybu na pohyb rotační. Přímočarý pohyb byl převáděn na rotační pomocí vahadla a jednoduchého klikového mechanismu. Později byla tato koncepce nahrazena křížákem a pístnicí. Další zdokonalení spočívalo ve dvoučinné práci stoje. Pára byla u prvních variant pouštěna střídavě pod a nad válec pomocí jednoduchého plochého šoupátka. Tyto myšlenky byly, díky technologickým problémům ve výrobě, průmyslově realizovány až v letech 1775-1800, kdy se J.Watt spojil s Matthem Boultonem továrníkem z Birminghamu. V těchto letech začali komerčně prodávat parní pístové motory.



Obr.1 koncepce wattova parního motoru

1.1.2 Využití zdokonaleného wattova motoru v praxi

První využití zdokonaleného parního wattova motoru bylo stejné, jako první Newcomenův parní motor, to je na čerpání podzemní vody z těžařských dolů. Po osvědčení parního motoru v tomto oboru bylo parního motoru využíváno skoro ve všech průmyslových odvětvích. Další z prvních odvětví bylo v textilní a strojní výrobě, kde parní motor roztáčel, pomocí transmise umístěné u stropu výrobních hal, včetně výrobních strojů, jako byli například tkalcovské stavy nebo soustruhy. Další místo, kde byl parní motor využívat byly velké průmyslově vyráběné mlýny na obiloviny. Roku 1804 byla postavena první parní lokomotiva konstruktérem Richardem Trevithickem. Tato lokomotiva byla významně zdokonalena v letech 1814-1829 konstruktérem Georgem Stephensonem. Od té doby železniční dopravu zcela ovládl parní stroj až do nástupu dieslových vlaků v 50. letech 20.století. Roku 1803 byl sestrojen první parník konstruktérem Robertem Fultonem. A tak se stala lodní doprava dalším oblastí, kde byl pístový parní motor velmi výhodně využíván i po nástupu parních turbín si udržel v lodní dopravě, až do nástupu spalovacích motorů. Roku 1769 vyjel první prototyp parního automobilu od vynálezce Nicolase Cugnota. Parní motor se však v silniční dopravě neosvědčil. Parní motor byl využíván pouze při výstavbě silnic a dalších pozemních úprav ve formě parního válce. V zemědělství se parní motor osvědčil k pohodu parních oraček, nebo jako mobilní pohon mlátiček obilí, takzvaná lokomobila.

Parní motor se osvědčil v celé řadě oborů jako například: strojírenství, hutnictví, těžařství, textilní průmysl, energetice, zemědělství, stavebnictví, lodní a železniční doprava. Parní motor byl nahrazován až po nástupu jiných typů energických motorů, zejména parních turbín, spalovacích motorů s vnitřním spalováním a plynových turbín. Další aspekt, který vedl ke snížení využívání parních strojů byla výstavba rozsáhlejší elektrické sítě a používání elektromotorů jako koncových pohonů.

1.1.3 Další vývoj pístových parních motoru

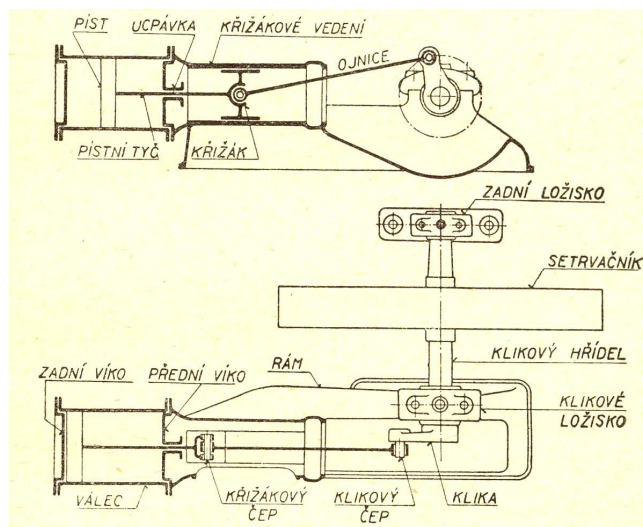
Po definování základního principu funkce parního motoru J.Wattem se způsob činnosti již neměnil. Od té doby se vývoj pístových parních motorů zaměřoval převážně na zdokonalení technického provedení parního motoru. Nejvýznamnější zdokonalení bylo přechod z parních motoru plnotlakých na stroje expanzní, toto zdokonalení bylo možné realizovat díky důmyslnějšímu rozvodu páry. Plnotlaké stroje nevyužívaly expanze ale pouze konstantního tlaku páry. U expanzních strojů byla pára vpuštěna do válce a nechala se expandovat. Tento způsob využívání páry podstatně snížil parametry výfukové páry, při zachování stejného výkonu, což bylo velmi výhodné. Další zdokonalení bylo zejména zlepšení mazání, kondenzace, kotlů a dalších komponent parního motoru, dále na zvyšování počtu válců, zvyšování parametrů páry (využití přehřáté páry), zdokonalení expanze ve válci, snížení škodlivých prostorů ve válci, využití vícenásobné expanze, využití výfukové páry pro další technologie, jako například vytápění.

Všechny tyto zdokonalení se měli docílit zlepšení účinnosti celého oběhu. Zvyšovat účinnost oběhu parního stroje byla snaha již prvních vývojových pracovníků. V té době šlo primárně o snížení spotřeby uhlí k výrobě páry.

1.2 Dělení pístových parních motorů podle koncepce

Každý pístový parní motor se skládá ze základních částí jako je: základní rám, válce, víka válců, ucpávky, hřídel, pístní tyč, křížák, křížákové vedení, rozvodové ústrojí (šoupátkové/ventilové), setrvačnick.

Parní motor je však možné zkonstruovat v nejrůznějších koncepcích. Nejčastější koncepce jsou uvedeny níže.

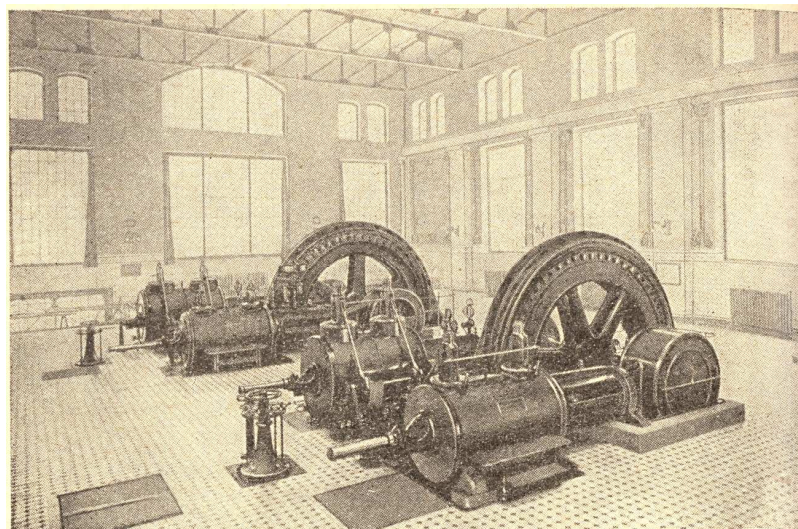


Obr.2 Základní schéma pístového parního motoru

1.2.1 Stabilní motory ležaté

Stabilní motory se na začátku průmyslového využívání koncipovaly převážně jako ležaté, často víceválcové kondenzační stroje s ventilovým rozvodem páry. Výkony takových strojů byly od 250 do 1000 HP, průměr pístu až 1000mm, zdvih až 1200mm, otáčky okolo 150 min^{-1} hmotnost až 50 tun. Takové motory pracovaly s mokrou, nebo přehřátou vodní párou tlaku až 25 atp a 400°C .

Stabilní ležaté motory se stavěli ve vyšších výkonnostních třídách.

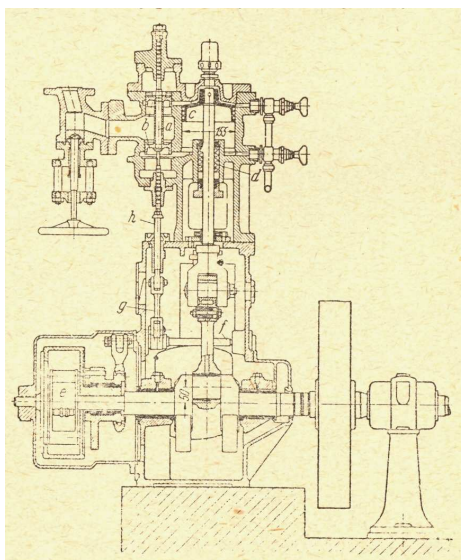


Obr.3 dva ležaté tandemové parní motory

1.2.2 Stabilní motory stojaté

První stabilní stojaté motory jsou převážně rychloběžné motory malých výkonů řádově do 300 HP. Otáčky takových strojů jsou až 3500 min^{-1} . Novější stabilní stojaté motory z 50.- 80. let 20. století jsou motory vyšších výkonů až 800 HP o otáčkách $500-600 \text{ min}^{-1}$.

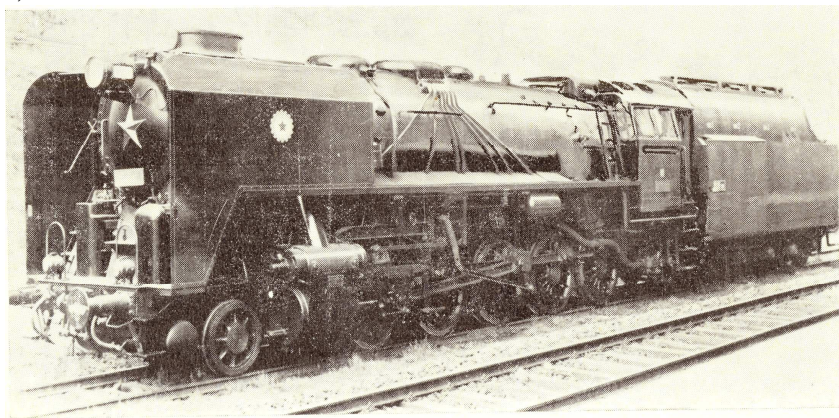
Takové motory jsou stroje s větším počtem válců řadově uspořádaných se šoupátkovým rozveden páry. Počet válců 2-4, hmotnost od 3 – 12 tun, tlak vstupní páry až 22 atp. Takové stroje vyráběla v daných letech česká továrna ČKD Praha.



Obr.4 Rychloběžný stojatý parní motor, otáčky 1000 min^{-1}

1.2.3 Lokomotivní motory

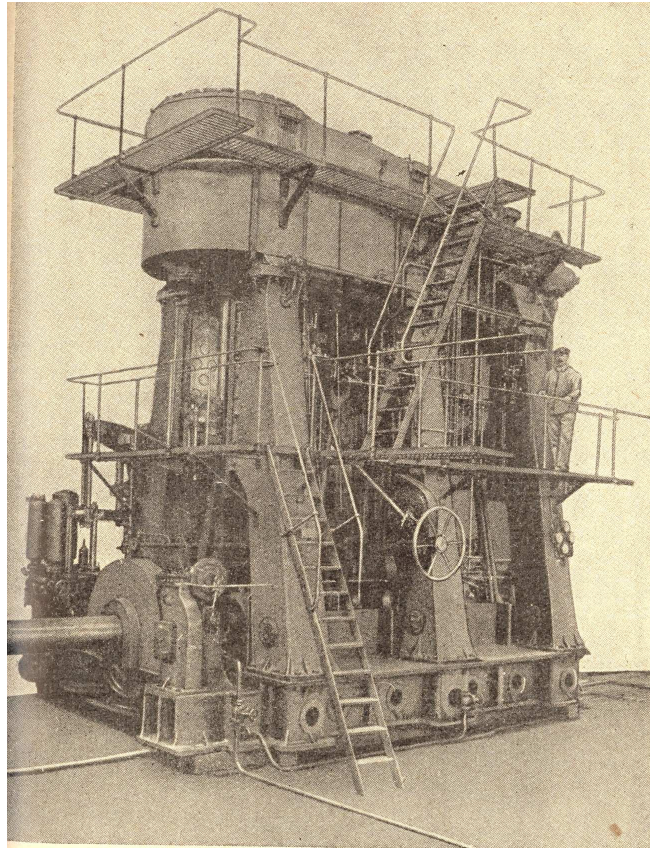
Lokomotivní motory jsou stroje na mokrou páru. Nejvýkonnější lokomotivní motory byly zkonstruovány během druhé světové války a v 50. letech 20. století. Jeden z výkonnějších lokomotivních motorů byl umístěn v československé lokomotivě řady 556.0, v této lokomotivě byl dvoučinný, dvouválcový parní pístový motor s šoupátkovým rozvedením o výkonu 2200 HP, průměr pístu 550 mm, zdvih 660 mm. Jedna lokomotiva řady 556.0 byla schopna vyvinout tažnou sílu až 220 kN. Ne zřídka se využívaly i lokomotivní motory tří válcové. Takové motory měli například československé lokomotivy řady 477.0, 498.0, 498.1.



Obr.5 parní lokomotiva řady 556.0

1.2.4 Lodní motory

Lodní motory se stavěly ležaté nebo šikmé pro pohon kolesových parníků. Novější parníky s lodními šrouby byly vybavené stojatými stroji, většinou víceválcovými s řadově uspořádanými válci. Hřídel stroje byla obvykle napřímo spojená s lodním šroubem, nebo kolesem. Výkony lodních motorů až 2500 HP, otáčky 30 -600 min⁻¹.



Obr.6 stojatý šoupátkový lodní parní motor

1.3 Parní rozvody

Rozvod páry je část parního motoru, která střídavě pouští páru nad a pod píst a odvádí expandovanou páru ven z válce. Parní rozvody zaznamenaly velký vývoj v době kdy se přestaly konstruovat parní stroje jako plnotlaké. U expanzních strojů byla pára vpuštěna do válce a nechala se expandovat. Od té doby se také začala realizovat důmyslnější regulace, která spočívala ve škrcení, nebo ve změně času po kterou je vstup páry plně otevřen. Druhý typ regulace byl realizovaný právě v parním rozvodu.

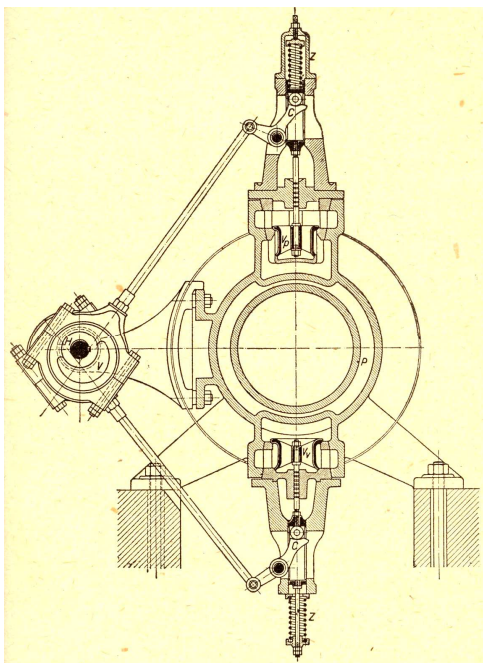
Základní rozdělení rozvodů páry je na ventilové a šoupátkové.

1.3.1 Ventilové rozvody

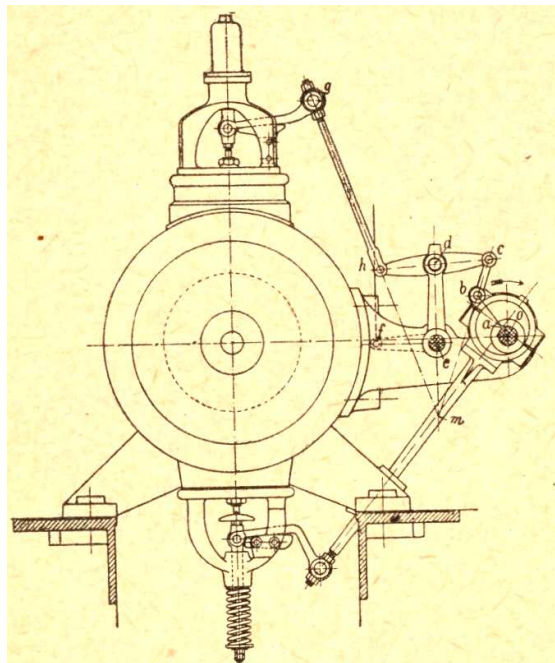
Ventilové rozvody se většinou využívají u ležatých stacionárních parních motorů nebo u stojatých lodních motorů. Oproti šoupátkovému rozvodu jsou ventilové rozvody výrobně náročnější. Stroj je celkově dražší, protože oproti šoupátkovým rozvodům jsou zapotřebí čtyři ventily na jeden dvoučinný válec. Dva vstupní a dva výfukové. Výhodou ventilových rozvodů je možnost dokonalejšího seřízení stroje a lepší celkový chod stroje. Ventilový rozvod se

obvykle využívá od výkonu 50 HP. Ventily jsou hnané přes táhla pomocí excentrů. Excentry jsou hnané nejčastěji hřídelem, který je rovnoběžný s osou válce.

Známe několik druhů ventilových rozvodů, které je od sebe liší koncepcí.



Obr.7 Lentzův ventilový rozvod

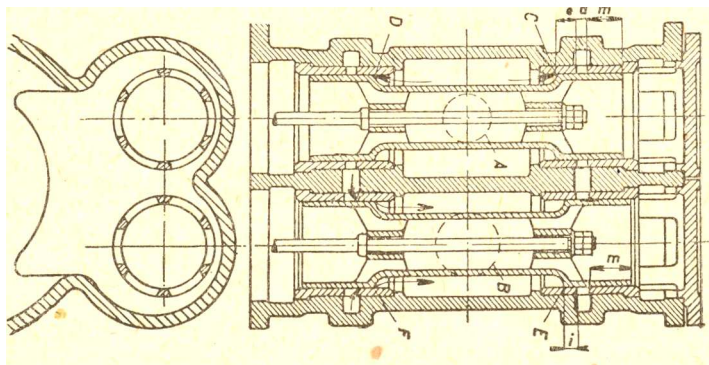


Obr.8 Widenmannův ventilový rozvod

1.3.2 Šoupátkové rozvody

Šoupátkové rozvody se většinou využívají u stacionárních stojatých motorů, lokomotivních motorů, lodních stojatých motorů nebo u parních válců, oraček a lokomobilů.

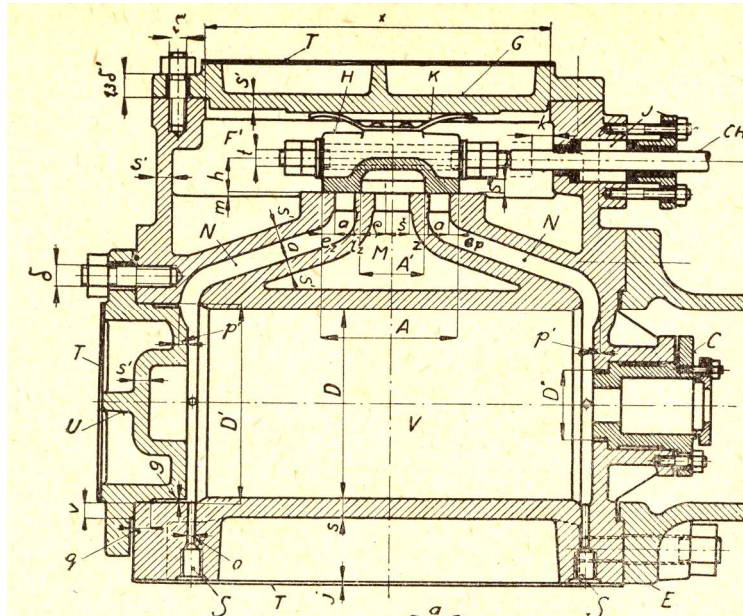
Šoupátkové rozvody jsou výrobně jednodušší a levnější než ventilové rozvody. Většinou se využívá jediné šoupátko pro vstup i výstup páry z obou stran válce. Někdy se vyrábí zvlášť šoupátkové vstupní a výstupní. Šoupátko, nebo šoupátka jsou obvykle hnané excentrem, který je umístěn na klikovém hřídeli motoru. Lokomotivní šoupátka jsou hnané kývavou kulisou. Rozeznáváme několik druhů šoupátek. Jednotlivé typy se liší konstrukčním zpracováním.



Obr.9 šoupátkový rozvod se samostatným vstupním a výstupním šoupátkem

1.3.2.1 Jednoduché ploché šoupátko

Jedná se o nejstarší typ šoupátka. Šoupátko má broušenou rovinou dosedací plochu a smýká se po dosedací ploše tělesa s rozvodnými kanály. Šoupátko se pohybuje v parní komoře vstupní páry.



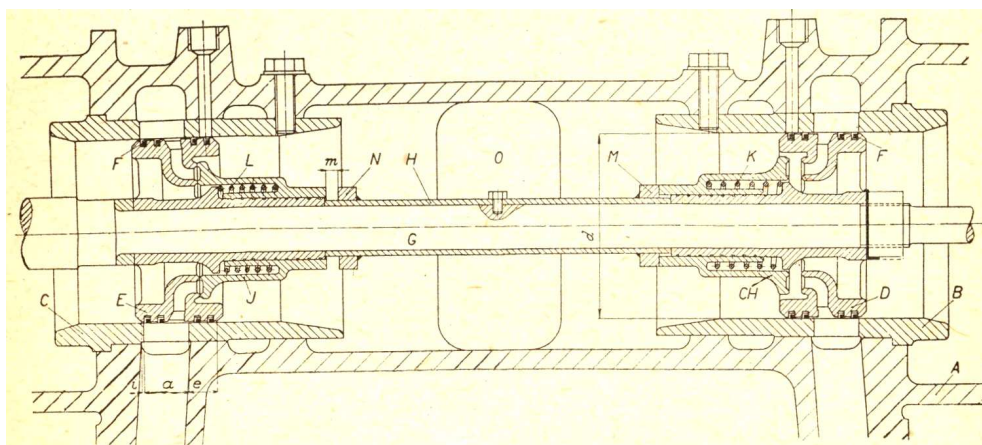
Obr.10 parní válec s jednoduchým plochým šoupátkem

1.3.2.2 Válcové (Corlisovo) šoupátko

Corlisovo šoupátko vznikne, stočením dosedací plochy jednoduchého plochého šoupátka. Je možné použít pouze jedno šoupátko pro vstup i výstup, ale je optimálnější využít čtyři kusy šoupátek zvlášť pro vstup a výstup páry. Válcové šoupátko vykonává během provozu kývavý pohyb, proto se mu někdy říká kývavé, nebo oscilující.

1.3.2.3 Pístové šoupátko

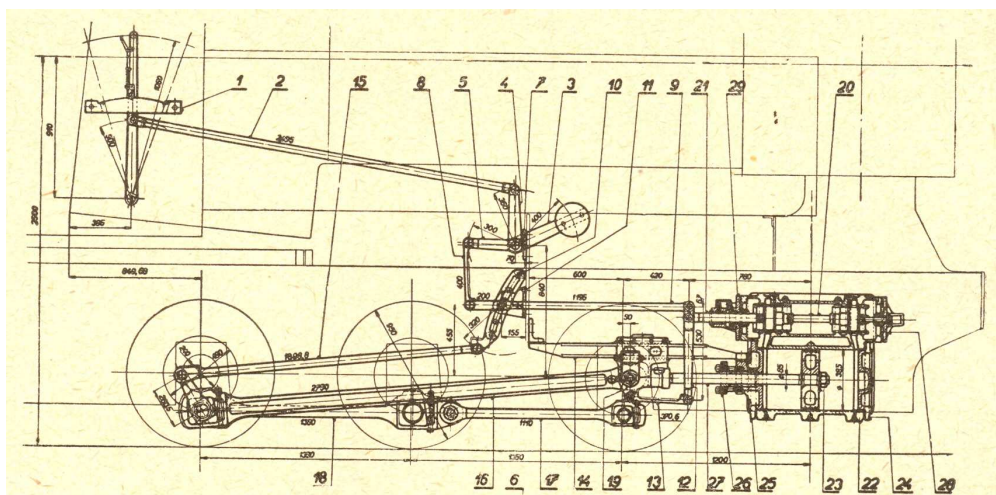
Pístové šoupátko je nejčastěji tvořené jedním válcovým obrobem, nebo dvěma menšími odlitky. Tyto písty konají vrativý pohyb, rozvádí vstupní páru a zároveň odvádí páru výfukovou. Šoupátko je hnané excentrem přes šoupátkovou tyč. Výhodou pístového šoupátka jsou velké průřezy vstupních a výstupních kanálů při zachování malých vnějších rozměrů šoupátkové komory. Pístové šoupátko bývá obvykle vyvločkové.



Obr.11 Pístové šoupátko tvořené dvěma menšími odlitky

1.3.2.4 Lokomotivní šoupátkový rozvod

U československých lokomotiv větších výkonu, jako například lokomotivy řady 464.0, 464.1, 464.2, 475.0, 475.1, 498.0, 498.1, 556.0 se používalo pro pohon šoupátka kulisové kývavého mechanismu, který sloužil k regulaci výkonu stroje a k reverzaci.



Obr.12 rozkres šoupátkového rozvodu parní lokomotivy a jeho pohon. 1-rozvodový stojan, 2 – rozvodové táhlo, 3 – páka s proti závažím, 4 – rozvodová páka, 5 – přestavná páka, 7 – ložisko rozvodové hřídele, 8 – závěsa, 9 – posuvná šoupátková tyč, 10 – kulisa, 11 – kulisové ložisko, 12 – předstihová páka, 13 – vodidlo, 14 – křížákové pravítko, 15 – výstředníkový tyč, 16 – ojnice, 17 – první spojnice, 18 – druhá spojnice, 19 – křížák, 20 – parní šoupátko, 21 – šoupátková tyč, 22 – parní válec, 23 – parní píst, 24 – přední víko válce, 25 – zadní víko válce, 26 – ucpávka pístnice, 27 – pístnice, 28 – přední víko šoupátkové komory, 29 – zadní víko šoupátkové komory [1]

1.4 Regulace

Regulace parního stroje slouží v regulaci rychlosti (otáček) nebo výkonu. Častěji se setkáváme s regulací otáček. Často požadujeme aby hnaný stroj pracoval ve stejných otáčkách a to při nízkém i vysoké zatížení. Regulace taky slouží jako pojistka, proti rozběhu stroje do nekontrolovaných otáček při náhlém poklesu zatížení.

Regulace může být ruční, nebo samočinná (automatická). Regulace může být realizovaná škrcením, nebo změnou času plnění.

Regulace škrcením je realizovaná škrtící klapkou, která mění průřez vstupního potrubí. Škrcením je méně výhodné, protože během škrcení vznikají ztráty. Regulace škrcením se provádí nejčastěji do výkonu 15 HP.

Regulace změnou času plnění je realizována délkou doby (času) po kterou je plně otevřen vstupní kanál. Tím pádem nedochází ke ztrátám škrcením.

Oba typy regulace jsou praktikovány pro ruční i automatickou regulaci.

Ruční regulace se využívá u strojů, které pracují s konstantním zatížením, například: pohon čerpadel se stálou výškou výtlaku a stálou dodávkou nebo u kompresorů se stálou dodávkou stlačeného média. Regulace ruční je jediný možný způsob regulace u parních lokomotiv, parních válců a oraček.

Automatická (samočinná) regulace je zpravidla využívána u více výkonných stabilních, nebo lodních strojů a strojů, které jsou využívány pro pohon synchroních generátorů, čerpadel, kompresorů. Samočinný regulační člen je nejčastěji koncipován jako odstředivý regulátor. Princip je založen na změně odstředivé síly při změně otáček. Vlivem změny odstředivé síly dojde k regulaci. Existuje několik druhů odstředivých regulátorů, které se liší koncepcí a konstrukčním zpracováním.

2 Návrh parního motoru

Vzhledem k zadanému výkonu 30 kW, volím koncepční uspořádání stojatého motoru s pístovým šoupátkovým rozvodem. Tato koncepce je také nejvýhodnější z hlediska náročnosti na výroku, ceny, hmotnost a kompaktnost stroje.

Dále vzhledem k požadovanému výkonu a předpokládanému použití pro hnaní elektrického generátoru, volím automatickou regulaci otáček škrcením. Regulace by mohla být realizovaná pomocí odstředivého regulátoru, nebo modernějším způsobem, pomocí elektronického snímání otáček s následnou vazkou na servomotor, který bude realizovat škrcení. Druhá varianta neklade tak vysoké nároky na pracovní prostor pro stroj, složitost konstrukce, snižuje hmotnost stroje a náročnost na obsluhu. Oproti tomu je nevýhoda, nutnost elektrického napájení snímače otáček a servomotoru.

2.1 Výpočet parního motoru

V této části práce se zabývám termomechanickým výpočtem, návrhem rozměrů a pevnostním výpočtem daných součástí.

2.1.1 Termomechanický výpočet a rozměrový návrh parního motoru

Vstupní hodnoty:

Hodnoty zadané:

$$p_1 = 1,42 \text{ MPa}$$

$$p_2 = 0,25 \text{ MPa}$$

$$P_e = 30 \text{ kW}$$

$$n = 1500 \text{ min}^{-1}$$

Hodnoty zvolené:

$$c_s = 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\eta_M = 80\%$$

$$\eta_{TDi} = 65\%$$

$$c_k = 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Zvolené hodnoty jsem volil podle doporučení v knížce dle seznamu použité literatury [1].

Během výpočtu jsem využíval místo tištěného i-s diagramu program Pára – verze 1.1.

2.1.1.1 Ztráta v rozvodu

$$\Delta p = 1 \div 2at$$

$$\Delta p = 1 \cdot at$$

$$\Delta p = 1 \cdot 0,1$$

$$\Delta p = \underline{\underline{0,1 \text{ MPa}}}$$

[1]

2.1.1.2 Tlak páry v kotli

Uvažuji ztrátu v rozvodu 0,1 MPa a ztrátu v parovodu 5% tlaku p_0 .

$$p_1 = 0,95 \cdot p_0 - ata \Rightarrow p_0 = \frac{p_1 + ata}{0,95}$$

$$p_0 = \frac{1,42 + 0,1}{0,95}$$

$$p_0 = \underline{\underline{1,6 \text{ MPa}}}$$

[2]

2.1.1.3 Konečný expanzní tlak

$$p_3 = 0,6 \cdot at + p_2 \quad [3]$$

$$p_3 = 0,6 \cdot 0,1 + 0,25$$

$$p_3 = \underline{\underline{0,31MPa}}$$

2.1.1.4 Škodlivý prostor

$$\varepsilon_0 = 7 \div 12\% \quad [4]$$

$$\varepsilon_0 = 10\%$$

2.1.1.5 Začátek plnění

$$\varphi_1 = 10^0 \quad [5]$$

2.1.1.6 Plnění

$$\varepsilon_1 = 50\% \quad [6]$$

2.1.1.7 Výstup páry

$$\varphi_2 = 30^0 \quad [7]$$

2.1.1.8 Komprese

$$\varepsilon_1 = 25\% \quad [8]$$

2.1.1.9 Kompresní tlak

$$p_k = 0,6 \cdot p_1 \quad [9]$$

$$p_k = 0,6 \cdot 1,52$$

$$p_k = \underline{\underline{0,912MPa}}$$

2.1.1.10 Tlak indikovaný

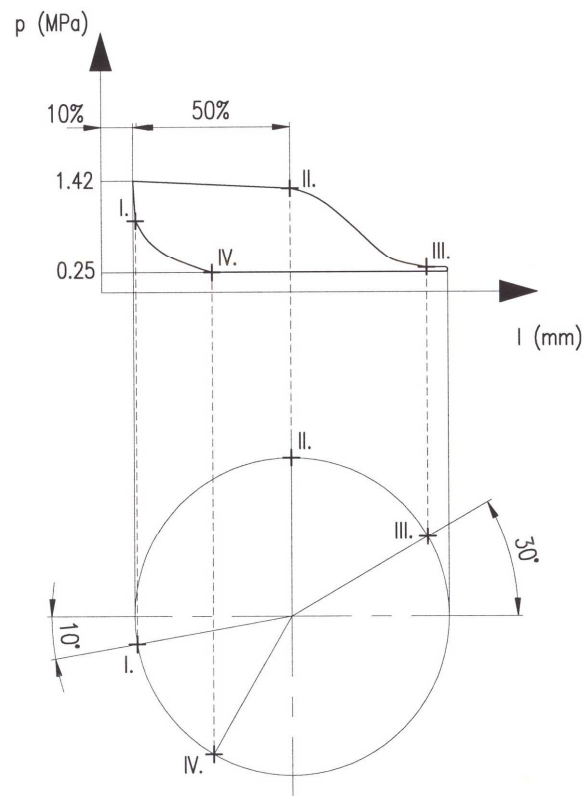
$$S_{ID} = 1828mm^2$$

$$p_2 = 0,25MPa \approx 6,25mm - \text{měřítko v p-V diagramu}$$

$$S_{ID} = (p_i - p_2) \cdot 100 \Rightarrow p_i = \frac{S}{100} + p_2 \quad [10]$$

$$p_i = \frac{1828}{100} + 6,25$$

$$p_i = 24,5mm \approx \underline{\underline{0,98MPa}}$$



Obr.13 Indikátorový diagram

2.1.1.11 Zdvih pístu

$$c_s = \frac{l \cdot n}{30} \Rightarrow l = \frac{30 \cdot c_s}{n} \quad [11]$$

$$l = \frac{30 \cdot 4}{1500}$$

$$l = 0,08 = \underline{\underline{80mm}}$$

2.1.1.12 Vnitřní výkon

$$P_i = \frac{P_e}{\eta_M \cdot \eta_{TDi}} \quad [12]$$

$$P_i = \frac{30}{0,8 \cdot 0,65}$$

$$P_i = 57,69kW \cong \underline{\underline{58kW}}$$

2.1.1.13 Vnitřní práce

$$A_i = \frac{P_i}{2 \cdot n} \quad [13]$$

$$A_i = \frac{58 \cdot 10^3}{2 \cdot 25}$$

$$A_i = \underline{\underline{1160J}}$$

2.1.1.14 Práce na hřídeli

$$A_e = A_i \cdot \eta_M \cdot \eta_{TDi} \quad [14]$$

$$A_e = 1160 \cdot 0,8 \cdot 0,65$$

$$A_e = 603,2 \cong \underline{\underline{600J}}$$

2.1.1.15 Průměr pístu

$$D_{PS} = \sqrt{\frac{4 \cdot P_e}{p_i \cdot \psi \cdot \pi \cdot \eta_M \cdot \eta_{TDi} \cdot c_s}} \quad [15]$$

$$D_{PS} = \sqrt{\frac{4 \cdot 30 \cdot 10^3}{0,98 \cdot 10^6 \cdot 0,985 \cdot \pi \cdot 0,8 \cdot 0,65 \cdot 4}}$$

$$D_{PS} = 0,1379m \cong \underline{\underline{138mm}}$$

2.1.1.16 Spotřeba páry

Hodnoty potřebné pro výpočet: $p_1 = 1,42$ $t_{II} = 200^0 C$ $v_{II} = 0,14cm^3 \cdot kg^{-1}$

Objem válce

$$V = \frac{\pi \cdot D_{PS}^2}{4} \cdot l \quad [16]$$

$$V = \frac{\pi \cdot 138^2}{4} \cdot 80$$

$$V = 1.196.569,8mm^3 \cong \underline{\underline{1.196.570mm^3}}$$

Objemový tok

$$\dot{V} = (2 \cdot V \cdot \varepsilon_1 + \varepsilon_0 \cdot V) \cdot n \quad [17]$$

$$\dot{V} = (2 \cdot 1.196.570 \cdot 1000^{-3} \cdot 0,5 + 0,1 \cdot 1.196.570 \cdot 1000^{-3}) \cdot 25$$

$$\dot{V} = \underline{\underline{0,0329m^3 \cdot s^{-1}}}$$

Spotřeba páry za hodinu

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}}{v_{II}} \quad [18]$$

$$\dot{m} = \frac{0,0329}{0,14}$$

$$\dot{m} = 0,235kg \cdot s^{-1} \cong \underline{\underline{846,15kg \cdot h^{-1}}}$$

Spotřeba páry na jeden cyklus

$$m_p = \frac{V \cdot \varepsilon_1 + V \cdot \varepsilon_0}{v_{II}} \quad [19]$$

$$m_p = \frac{1.196.570 \cdot 1000^{-3} \cdot 0,1 + 1.196.570 \cdot 1000^{-3} \cdot 0,5}{0,14}$$

$$m_p = \underline{\underline{5,128 \cdot 10^{-3} kg}}$$

2.1.1.17 Průřez kanálu

$$S_K = \frac{\dot{V}}{c_k} \quad [20]$$

$$S_K = \frac{0,0329}{30}$$

$$S_K = 1,096 \cdot 10^{-3} m^2$$

$$\text{volím } a = 60mm \Rightarrow S = a \cdot b \Rightarrow b = \frac{S}{a}$$

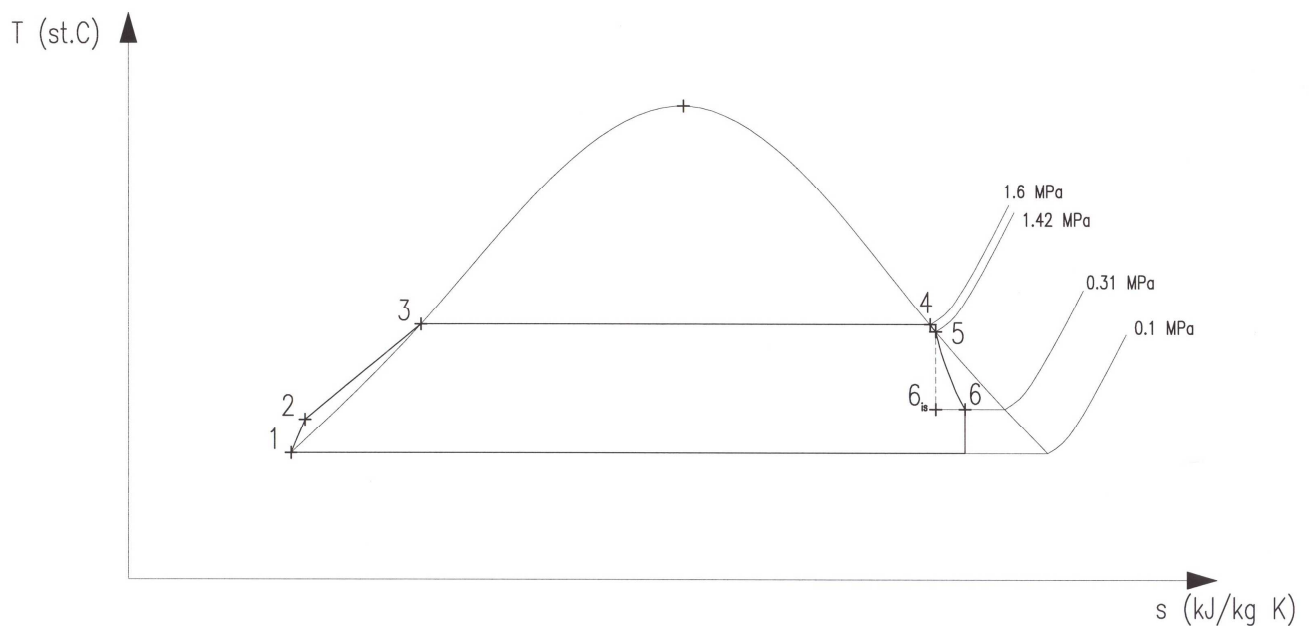
$$b = \frac{1,096 \cdot 10^{-3}}{0,06}$$

$$b = 0,01827 \cong 18,3mm$$

Rozměr kanálu: $a \times b = 60 \times 18,3$

2.1.1.18 Termická účinnost okruhu

BOD	p_i	t_i	x_i	i_i	s_i	u_i	v_i	pozn.
-	[MPa]	[°C]	[-]	[kJ·kg ⁻¹]	[kJ·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	[kJ·kg ⁻¹]	[m ³ ·kg ⁻¹]	-
1	0,10	99,63	0,000	417,51	1,3027	417,41	1,0434	vstup do čerp.
2	1,60	99,63	0,000	-	-	-	-	vstup do kotle
3	1,60	201,38	0,000	858,58	2,3436	856,73	1,1587	
4	1,60	201,38	1,000	2791,70	6,4175	2593,80	123,6800	vystup z kotle
5	1,42	195,71	1,000	2788,20	6,4600	2591,10	138,8100	vstup do válce
$\bar{6}_{is}$	0,31	134,67	0,902	2514,00	6,4600	2349,90	529,6800	
6	0,31	134,67	0,946	2610,00	6,6952	2437,70	555,7000	výfuk



Obr.14 T-s diagram

Adiabatický entalpický spád

$$\Delta h_{is} = i_5 - i_{6is} \quad [21]$$

$$\Delta h_{is} = 2788,2 - 2514$$

$$\Delta h_{is} = 274,2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Skutečný entalpický spád

$$\Delta h = \Delta h_{is} \cdot \eta_{TDi} \quad [22]$$

$$\Delta h = 274,2 \cdot 0,65$$

$$\Delta h = 178,23 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Tepelná účinnost

$$\eta_T = \frac{\Delta h}{i_4 - i_1} \quad [23]$$

$$\eta_T = \frac{178,23}{2791,7 - 417,51}$$

$$\eta_T = 0,075 \approx \underline{\underline{7,5\%}}$$

Termická účinnost cyklu je počítaná pro cyklus ve kterém je zapojení pouze parní motor bez dalšího využití výfukové páry, proto je termická účinnost velmi nízká. Výfuková pára má, pro daný vypočítaný parní motor, parametry 0,25 MPa a teplotu 127,5⁰C. Z toho vyplývá, že je možné výfukovou páru využít, pro další technologii, například pro parní vytápění, nebo ohřev vody. Za tohoto předpokladu by termická účinnost cyklu mohla být až 80%.

2.1.2 Pevnostní výpočet a rozměrový návrh

Pokud nebude uvedeno jinak, je počítáno s bezpečností 1,5 proti meznímu stavu a cyklickým namáháním dané součásti.

2.1.2.1 Šrouby hlavy válce

$$p_{\max} = 1,42 \text{ MPa}; D_{ps} = 138 \text{ mm}$$

$$p = \frac{F}{S} = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot D_{ps}^2} \Rightarrow F_{\max} = \frac{p \cdot \pi \cdot D_{ps}^2}{4} \quad [24]$$

$$F_{\max} = \frac{1,42 \cdot \pi \cdot 138^2}{4}$$

$$F_{\max} = 21.239 \cong 21.250 \text{ N}$$

Uvažuji 8x šroub 8.8. $\Rightarrow \sigma_{kt} = 640 \text{ MPa}$

$$\sigma_{dov} = \frac{0,3 \cdot \sigma_{kt}}{k} \quad [25]$$

$$\sigma_{dov} = \frac{0,3 \cdot 640}{1,5}$$

$$\sigma_{dov} = 128 \text{ MPa}$$

$$F_{1/8} = 2,5 \cdot \frac{F_{\max}}{8} \quad [26]$$

$$F_{1/8} = 2,5 \cdot \frac{21250}{8}$$

$$F_{1/8} = 6640,625 \cong 6645 \text{ N}$$

Výsledná síla na jeden šroub. Síla je násobena koeficientem 2,5 z důvodu bezpečnosti proti profuku páry.

$$\sigma_{dov} = \frac{F}{S} = \frac{4 \cdot F_{1/8}}{\pi \cdot d_3^2} \Rightarrow d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{1/8}}{\sigma_{dov} \cdot \pi}} \quad [27]$$

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot 6645}{128 \cdot \pi}}$$

$$d_3 = \underline{\underline{8,13mm}} \Rightarrow M12$$

Utahovací moment

$$M_u = F_{1/8} \cdot K \cdot d_3 \quad [28]$$

$$M_u = 6645 \cdot 0,075 \cdot 9,853$$

$$M_u = 4910,48Nmm \cong 5Nm$$

2.1.2.2 Tloušťka stěny válce

$$p_{\max} = 1,42MPa ; D_{ps} = 138mm$$

Uvažuji materiál válce 42 2633 $\Rightarrow \sigma_{kt} = 200MPa$

$$\sigma_{dov} = \frac{0,3 \cdot \sigma_{kt}}{k} \quad [29]$$

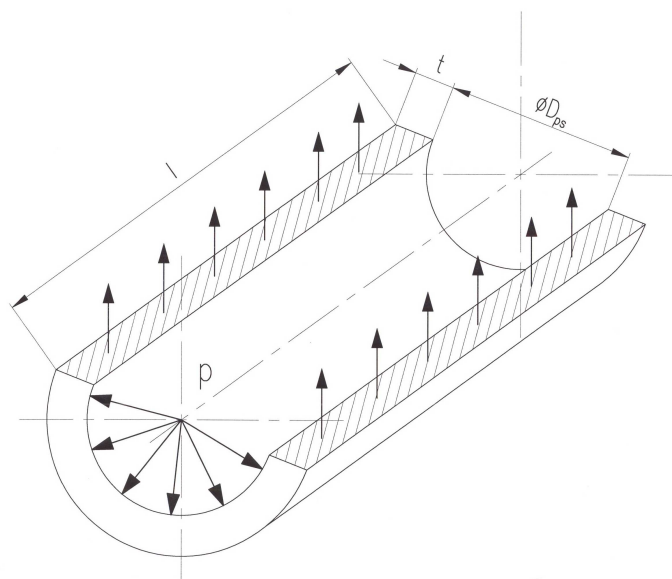
$$\sigma_{dov} = \frac{0,3 \cdot 200}{1,5}$$

$$\sigma_{dov} = 40MPa$$

$$\sigma_{dov} = \frac{F}{S} = \frac{p \cdot D_{ps} \cdot l}{2 \cdot l \cdot t} \Rightarrow t = \frac{p \cdot D_{ps}}{2 \cdot \sigma} \quad [30]$$

$$t = \frac{1,42 \cdot 138}{2 \cdot 40}$$

$$t = 2,4495mm \cong \underline{\underline{2,5mm}} \Rightarrow 10mm$$



Obr.15 Válec v řezu

2.1.2.3 Pístnice

$$F_{\max} = 21.250N$$

Uvažuji materiál 14 220 $\Rightarrow \sigma_{kt} = 600MPa$

$$\sigma_{dov} = \frac{0,3 \cdot \sigma_{kt}}{k} \quad [31]$$

$$\sigma_{dov} = \frac{0,3 \cdot 600}{1,5}$$

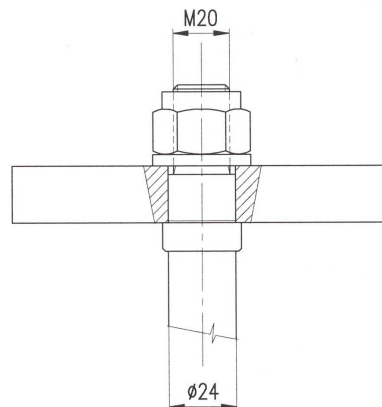
$$\sigma_{dov} = 120MPa$$

Šroub pístnice

$$\sigma_{dov} = \frac{F}{S} = \frac{4 \cdot F_{\max}}{\pi \cdot d_3^2} \Rightarrow d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot F_{\max}}{\sigma_{dov} \cdot \pi}} \quad [32]$$

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot 21.250}{120 \cdot \pi}}$$

$$d_3 \cong \underline{\underline{15mm}} \Rightarrow \underline{\underline{M20}}$$



Průměr pístnice volím $D_{pt} = 24mm$

Obr.16 Detail šroubu pístnice

Kontrola na vzpěr

Předběžnou délku pístní tyče volím $L_{PT} = 300mm$, průměr pístní tyče $D_{pt} = 24mm$.

$$J = \frac{\pi \cdot D^4}{64} = \frac{\pi \cdot 24^4}{64} \cong 16.286mm^4 \quad [33]$$

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot 24^2}{4} = 452,38 \cong 452mm^2 \quad [34]$$

$$i = \sqrt{\frac{J}{S}} = \sqrt{\frac{16.286}{452}} \cong 6 \quad [35]$$

$$\lambda = \frac{L_{PT}}{i} = \frac{300}{6} = 60 \quad [36]$$

$$\lambda_k = \sqrt{\frac{\alpha^2 \cdot E}{\sigma_{dov}}} = \sqrt{\frac{(2 \cdot \pi)^2 \cdot E}{\sigma_{dov}}} = \sqrt{\frac{(2 \cdot \pi)^2 \cdot 2,1 \cdot 10^5}{120}} = 262 \quad [37]$$

$\lambda < \lambda_k \Rightarrow$ pístní tyč nebude namáhána na vzpěr

Prostá tah/tlak

$$\sigma_{provoz} = \frac{F_{\max}}{S} = \frac{21.250}{452} = 47MPa \quad [38]$$

$$k = \frac{0,3 \cdot \sigma_{kt}}{\sigma_{provoz}} = \frac{0,3 \cdot 600}{47} \cong \underline{\underline{3,8}} \text{ - bezpečnost proti prostému tahu/tlaku}$$

Ucpávka pístnice

$$D_{pt} = 24mm$$

$$t_s = 2 \cdot \sqrt{D_{pt}} = 2 \cdot \sqrt{24} = 9,79 \cong \underline{10mm} \quad [39]$$

$n_u = \underline{4}$ - čtyři kroužky ucpávky

Materiál ucpávkové šňůry volím PTFE+GRAFIT

Výpočet a volba materiálů byla provedena podle katalogu firmy HENNLICH INDUSTRIETECHNIK s.r.o.

2.2 Konstrukční řešení

Další částí práce jsem se zabýval konstrukční řešením parního válce, včetně pístu, pístní tyče a ucpávky páry. Níže jsou popsány jednotlivé prvky z technologického hlediska. Konstrukční zpracování a detaily jsou patrné z výkresové dokumentace.

2.2.1 Válec

Polotovár válce bude odlitek z materiálu 42 2633, který bude obroben soustružením a dokončen broušením. Válec je řešen jen po parní kanály. Celý parní válec s šoupátkovou komorou by byl řešen jako jeden obrobený odlitek.

2.2.2 Vložka válce

Polotovár vložky bude zhotoven odstředivým litím z tvárné perliticko-feritické litiny 42 2306. Po odliti budou zhotoveny frézováním otvory pro vstup a výstup páry, poté bude vložka dokončena jemným broušením.

2.2.3 Píst

Píst je řešen také jako svarek. Polotovary pro svaření jsou čtyři mezikruží o různých rozměrech. Po svaření bude píst soustružen, broušen a vystružen. Píst bude vybaven dvěma pístními kroužky, pro snížení ztrát netěsností. Tolerance a rozměry drážek pro pístní kroužky jsem volil podle doporučení v literatuře [4], viz seznam použité literatury. Uvažovaný materiál s ohledem na dobrou svařitelnost, obrobitelnost a mechanické vlastnosti jsem volil 11 373.

2.2.4 Pístnice

Pístní tyč je řešená jen po výstup z ucpávky páry. Pístní tyč bude vyrobena soustružením z kulatiny materiálu 14 220. Tento materiál jsem volil z ohledem na její vysokou mez pevnosti a možnost tepelného zpracování což je zapotřebí z důvodu přijatelných rozměrů pístní tyče. Po soustružení bude tepelně chemicko-tepelně zpracována cementováním a poté zakalena. Po zakalení bude dokončena broušením.

2.2.5 Víka parního válce

Víka budou zhotoveny soustružením na CNC soustruhu z výpalku a poté vyvrtány na frézce, nebo vyvrtávače. Materiál 11 373.

3 Závěr

Tato práce poskytuje základ pro výrobu parního motoru, který by byl využíván pro kogenerační výrobu elektrické energie a tepelné energie. Daný parní motor by bylo možné využívat pro malé výrobní provozy, dřevo zpracovatelské závody, zemědělské stavby, kancelářské nebo administrativní budovy, nemocnice a další zařízení, kde je obecně možnost redukce páry používané pro vytápění nebo technologické účely. Kromě kogenerační výroby by daný parní motor mohl sloužit jako záložní zdroj elektrické energie do výkonu 30 kW. Vzhledem ke značné jednoduchosti na výrobu, pořizovacím nákladům a provozu se jeví parní motor daleko vhodnější pro dané použití oproti parní turbíně malého výkonu. U parních pístových motorů odpadá řada problému se kterými se potýkáme u parních turbín malých výkonů. Jako například, nutnost náročného olejové hospodářství a vysoké nároky na ložiska. Dále výkon parní turbíny, není možné snižovat libovolně, se snižující délkou lopatky a parciálním ostřikem výrazně klesá její účinnost. Velkou výhodou pístového parního motoru je schopnost pracovat v oblasti mokré páry bez výrazného snížení vnitřní termodynamické účinnosti, což je velmi výhodné právě pro daný případ užití v kogeneračním režimu. V praxi se nesetkáme například s parním vytápěním, které by využíval páru o parametrech na hranici sytosti.

Pro praktické využití daného parního motoru by bylo nutné početně a konstrukčně vyřešit zbylé části parního motoru, jakou je: křížák, křížákové vedení, ojnice, kliková hřídel, kliková skříň, šoupátková komora, šoupátko, mazací systém a další nutné prvky. Poté by bylo nutné vyrobit prototyp stroje a odladit konstrukční nedostatky a podrobit parní motor provozním zkouškám. Je možné, že konečný efektivní výkon bude vyšší oproti vypočtenému výkonu 30kW, jelikož jsem ve výpočtu vycházel z doporučené vnitřní termodynamickou účinností 65%, je možné, že tato vnitřní termodynamická účinnost bude na vyrobeném stroji vyšší, což by mělo dopad na výkon. V takovém případě by bylo nutné zvážit zda parní motor vydrží z hlediska pevnostního dlouhodobě vyšší výkon. Poté by bylo možné parní motor prakticky využívat.

4 Seznam použité literatury

- [1] KLÁG, Josef. *Parní stroje a turbíny*. Vyd.1. Praha: Vydavatelstvo ROH – PRÁCE – vydavatelství knih, 1952.
- [2] NOHOVCOVÁ, Ladislava. *150 let společnosti Škoda*. Vyd.1. Plzeň: Starý most s.r.o., 2009.
- [3] FIEDLER, Jan. *Parní turbíny*. Vyd.1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2004
- [4] ČERNOCH, Svatopluk. *Strojně technická příručka*. Vyd.20. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1968
- [5] VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky*. Vyd.2. Úvaly: ALBRA – pedagogické nakladatelství, 2005
- [6] FIEDLER, Jan. 3T-Teplo, technika, teploty. *Parní motory malých výkonů*. 5/2005, str. 16-17. ISSN 1210-6003.

5 Seznam použitých symbolů

Symbol	Název	Jednotky
a	šířka kanálu	mm
A_e	efektivní práce	kJ
A_i	vnitřní práce	kJ
at	atmosféra	MPa
atm	atmosféra	MPa
b	výška kanálu	mm
c_k	střední pístová rychlost	m·s ⁻¹
c_s	střední rychlost páry v kanálu	m·s ⁻¹
d₃	průměr jádra šroubu	mm
D_{PS}	průměr pístu	mm
D_{PT}	průměr pístnice	mm
E	modul pružností v tahu	MPa
F	síla	N
F_{max}	maximální síla na píst	N
F_{1/8}	síla na jeden šroub hlavy válce	N
Δh_{is}	isoentripický entalpický spád	kJ·kg ⁻¹
Δh	skutečný entalpický spád	kJ·kg ⁻¹
i	měrná entalpie	kJ·kg ⁻¹
i	součinitel zpěrnosti	-
J	kvadratický moment průřezu	mm ⁴
k	bezpečnost proti meznímu stavu	-
K	součinitel tření mezi závity	-
l	zdvih pístu	mm

L_{PT}	délka pístní tyče	mm
\dot{m}_p	hmotnostní průtok páry	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
m_p	spotřeba páry za jeden cyklus	kg
M_u	utahovací moment	Nm
n	otáčky	s^{-1}
n_v	počet ucpávek	MPa
p	tlak	MPa
p_0	tlak v kotli	MPa
p_1	tlak páry na vstupu do válce	MPa
p_2	tlak výstupní páry	MPa
p_3	konečný expanzní tlak	MPa
P_e	efektivní výkon	kW
P_i	vnitřní výkon	kW
p_i	indikovaný tlak	MPa
p_k	kompresní tlak	MPa
p_{\max}	maximální tlak ve válci	MPa
Δp	tlaková ztráta v rozvodu	MPa
s	měrná entropie	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
S	obecná plocha	mm^2
S_{ID}	plocha indikátorového diagramu	mm^2
S_k	průřez kanálu	mm^2
t	obecná tloušťka	mm
t_s	tloušťka ucpávky	mm
t_{II}	teplota páry na začátku expanze	$^{\circ}\text{C}$
u	vnitřní energie	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
V	objem válce	mm^3
v	měrný objem páry	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
v_{II}	měrný objem páry na začátku expanze	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$
\dot{V}	objemový tok páry	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
η_M	mechanická účinnost	%
η_{TDi}	vnitřní termodynamická účinnost	%
λ	štíhlost	-
λ_{kr}	kritická štíhlost	-
ε_0	škodlivý prostor	%
ε_1	plnění	%
ε_2	komprese	%
σ	normálové napětí	MPa
σ_{dov}	dovolené normálové napětí	MPa
σ_{kt}	mez kluzu v tahu	MPa
φ_1	začátek plnění	$^{\circ}$
φ_2	výstup páry	$^{\circ}$
ψ	součinitel zmenšení činné plochy pístové	-

6 Seznam příloh

1. Výrobní výkres VÁLCE, číslo výkresu: BP – 126000 - 1
2. Výrobní výkres VÍKA HORNÍHO, číslo výkresu: BP – 126000 - 2
3. Výrobní výkres VÍKA DOLNÍHO, číslo výkresu: BP – 126000 - 3
4. Výrobní výkres PÍSTU, číslo výkresu: BP – 126000 - 5
5. Výrobní výkres VLOŽKY VÁLCE, číslo výkresu: BP – 126000 - 7
6. Výkres sestavy PARNÍHO VÁLCE, číslo výkresu: BP – 126000 - S