VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ
INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

PARNÍ STROJ
STEAM ENGINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Štěpán Koutník
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.
SUPERVISOR

BRNO 2019

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student:	**Štěpán Koutník**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	**doc. Ing. Zdeněk Kaplan, CSc.**
Akademický rok:	2018/19

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

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Úkolem závěrečné bakalářské práce je komplexní studium, rozbor a vlastní hodnocení možností využití parního stroje jako alternativního zdroje energie.

Cíle bakalářské práce:

Cílem závěrečné bakalářské práce je vytvořit ucelený přehled problematiky využití parního stroje jako alternativního zdroje energie. Práce bude obsahovat historický úvod, teoretické základy činnosti parního stroje, zdůraznění předností, resp. nedostatků parních strojů, jejich moderní využití, resp. eliminaci a vlastní kritické hodnocení současných přístupů.

Seznam doporučené literatury:

KAMEŠ, Josef. Alternativní pohon automobilů. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 80-730--127-6.

VLK, František. Alternativní pohony motorových vozidel. Brno: Vydavatelství Vlk, 2004. ISBN 80-23--1602-5. Dostupné také z: http://www.digitalniknihovna.cz/mzk/uuid/uuid:8c0ac2b0-016c-11e6-845a-005056827e51.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Práce se zabývá technologií parního stroje. Nejdříve je popsán historický vývoj, užití v praxi a jeho součásti. Následně se práce zaměřuje na cyklus parního stroje, který je zde zanalyzován. Druhá část pojednává o moderním využití parního stroje jak v automobilním průmyslu, tak mimo něj.

KLÍČOVÁ SLOVA

Parní stroj, cyklus, moderní využití, automobil, alternativní pohon

ABSTRACT

The thesis focuses on a steam engine. At first the thesis describes its historical evolution, applications and parts. Consequently, the thermodynamic cycle of the steam engine is analysed. The second part deals with modern applications of the steam engine in automotive industry and others.

KEYWORDS

Steam engine, cycle, modern application, automobile, alternative propulsion

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOUTNÍK, Š. *Parní stroj*. Brno, 2019. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 34 s. Vedoucí práce Zdeněk Kaplan.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 24. května 2019 ……..……..……..

Štěpán Koutník

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce doc. Ing. Zdeňku Kaplanovi, CSc. za cenné rady, trpělivost a čas, které mi poskytnul při vedení mé bakalářské práce.

OBSAH

Úvod 9
1 Historický vývoj parního stroje 10
1.1 Parní stroj v praxi 11
2 Součásti parního stroje 13
3 Druhy parních strojů 14
3.1 Parní stroj s dělenou expanzí páry 15
4 Analýza cyklu parního stroje 19
4.1 Reálný cyklus 19
4.2 Ideální cyklus 20
4.3 Dělená expanze páry 20
4.4 Práce parního stroje 21
4.5 Účinnost parního stroje 22
5 Vývoj parního stroje v moderní době 23
5.1 Lear Motors 24
5.2 IAV Automotive Engineering 25
5.3 Využití parního stroje mimo automobilní průmysl 30
Závěr 31
Seznam použitých zkratek a symbolů 34

ÚVOD

V dnešní době je parní stroj považován za technologii, která dosáhla svého vrcholu před téměř 100 lety. Tím bylo využití na železnici, kde také zůstal využíván nejdéle. První část práce shrne vývoj parního stroje v minulosti, k čemu byl využíván a z jakých částí byl složen.

Cílem této práce je shrnout průběh vývoje parního stroje v moderní době a jeho uplatnění. Zaměřím se na uplatnění stroje v automobilovém průmyslu, kterému v dnešní době dominují spalovací motory, nebo hybridní a elektrické pohony. V tomto odvětví se nikdy nedostal do fáze, že by byl využíván jako plnohodnotný pohon.

V práci zmíním příklady, kdy se lidé tuto technologii pokusili využít. V historii byly případy, kdy se obraceli zpět ke starým technologiím a snažili se tuto technologii obnovit. Jedním z důvodů bylo neúplné prozkoumání možností a schopností parního stroje, který byl ve své době nahrazen rychle se šířícími motory s vnitřním spalováním. V dnešní době jsou stále nadšenci, kteří parní stroj propagují a zde bych chtěl zmínit příklady, kdy se jím zabývaly větší výrobci.

Dále se pokusím zhodnotit požadavky, které by parní stroj musel splnit, aby byl využitelný pro pohon automobilů. Původní stroje nebyly vhodné např. z důvodu velkých rozměrů stroje. Pravidelné zastávky pro doplnění nádrže s vodou jsou neakceptovatelné, protože pokud by měl vůz ujet nějakou rozumnou vzdálenost, pak by nádrž musela být obrovská. Tudíž je třeba uzavřít okruh vody kondenzátorem, který převede páru do kapalného skupenství. Otázkou zůstává, jestli by stroj malých rozměrů dokázal splnit požadavky na výkon a vyrovnal se spalovacím motorům, které jsou v dnešní době využívány v provozu.

V poslední kapitole se zaměřím na využití parního stroje mimo automobilní průmysl. Některé společnosti se zabývají vývojem parního stroje pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla, což by mohlo být jedním z budoucích využití pro stroj.

1 HISTORICKÝ VÝVOJ PARNÍHO STROJE

Vynález parního stroje způsobil významný technický pokrok a byl hlavní hnací silou průmyslové revoluce v 18. a 19. století v Evropě. Byl dominantním pohonem v průmyslu a dopravě přes 150 let [1][2].

Nebylo to ale 17. století, kdy se objevily první pokusy nějakým způsobem zkoumat sílu páry. První takový známý pokus se váže ke starověkému Řecku. Alexandrijský Řek Herón, známý též jako Méchanikos, ve své době (asi 1. stol. n. l.) shrnul a sepsal tehdejší matematické a technické znalosti. Díky vědomostem z jeho knih víme o tzv. míči boha větrů Aeola (obr. 1). Ten se skládá z kotle obsahující vodu, která je ohřívána zespodu. Kotel je spojen dutými trubicemi s koulí. Těmito proudí pára do koule a ta je opatřena dvěma tryskami. Z nich proudí pára do okolí a koule se začíná otáčet. Tento vynález ale nenašel žádné praktické využití a pravděpodobně se využíval pouze jako hračka [3].

Obr. 1 Míč boha větrů Aeola [4]

Prvním opravdovým využitím páry bylo čerpání vody z dolů, které původně využívalo sílu zvířat. Zvířata poháněla různá zařízení s nádobami a vykonávala tak nákladnou a pomalou práci, kterou bylo potřeba urychlit. Tento krok provedl v roce 1698 anglický vojenský inženýr Thomas Savery, který si nechal patentovat svůj „stroj k čerpání vody ohněm“. Tento stroj by měl spíše nést označení přístroj, neboť neměl žádné pohyblivé součástky, ale bylo to první zařízení, kde pára konala užitečnou práci. Hlavní součástí byla tlaková nádoba, do které se přiváděla pára, která následným ochlazováním zkondenzovala, způsobila podtlak a čerpala tak vodu [1].

Ve vývoji stroje poháněného parou pokračoval Thomas Newcomen. Výsledkem jeho práce byl stroj, ve kterém pára pohybovala pístem. Tlaková nádoba byla nahrazena válcem a uzavřena pístem. Pod píst se přivedla pára a zvedla ho vzhůru. Následně se do téhož prostoru vpustila voda, pára zkondenzovala a důsledkem vzniklého vakua a tlaku na druhé straně pístu se píst vrátil do původní polohy. Píst byl spojen s čerpadlem, které čerpalo vodu [1].

V dalších letech se tohoto vynálezu ujal James Watt. Tento skotský vynálezce pracoval na zdokonalení Newcomenova stroje. V roce 1769 si nechal patentovat samostatný kondenzátor, kterým přesunul kondenzaci páry mimo válec. Tímto bylo dosaženo velké úspory energie, protože válec mohl zůstat po celou dobu horký a kondenzátor zase studený. S podporou

Matthew Boultona využil svůj patent a rozšířil svůj parní stroj mezi doly a jiné uživatele potřebující spolehlivý zdroj energie. V průběhu let parní stroj zdokonaloval. Mezi tyto vylepšení patřilo upravení jednočinného stroje na dvojčinný, převod přímočarého pohybu na rotační pomocí klikových mechanismů, přidání setrvačníku ke stroji pro hladší provoz, nebo vynalezení Wattova odstředivého regulátoru, který udržoval stálé otáčky stroje [1][2].

Po vypršení Wattových patentů v roce 1800 se začalo rozšiřovat použití vysokotlaké páry. Richard Trevithick (Velká Británie) a Oliver Evans (Spojené státy) nezávisle na sobě postavili vysokotlaké parní stroje s válcovým kotlem s vnitřním topeništěm a plamencem. Trevithick tohoto stroje poté využil pro vyrobení první lokomotivy pro použití na tramvajových kolejích v Penydarren ve Walesu. Tato lokomotiva byla ale pro tehdejší koleje příliš těžká, a proto nebyla použitelná. Parní stroje se v této době využívaly spíše pro statické účely, především pro čerpání vody [1].

V průběhu 19. století docházelo k dalším úpravám parního stroje. Jednou z nich bylo sestavení sdruženého stroje, který při chodu využíval expanzi stejné páry vícekrát – ve vysokotlakém a nízkotlakém válci. Později se využívalo sdruženého parního stroje s více než dvěma válci pro efektivnější využití páry a vertikální stroje byly nahrazovány horizontálními [1].

Pára byla postupem času zaváděna v dopravě u lodí (1802) a na železnici (1829). Později byly vyrobeny první parní automobily. Ke konci 19. století se parní stroj vyvinul ve velmi výkonný motor, který poháněl obrovské lodě. Mezi lety 1897 a 1927 bylo ve spojených státech vyrobeno více než 60 000 parních automobilů [2].

V 80. letech 19. století byla stále větší potřeba vyrábět elektřinu. Pro toto využití bylo potřeba vysoké úhlové rychlosti stroje, které tehdejší parní stroje nebyly schopny vyvinout. Začala se tedy zkoumat nová řešení, která by parní stroj vylepšila, nebo nahradila. Nahrazení parního stroje pro toto využití bylo parními turbínami, které se pro výrobu elektřiny využívají dodnes [1].

1.1 PARNÍ STROJ V PRAXI

Parního stroje se využívalo v průběhu let v mnoha odvětvích. Prvním bylo využití jako pístová pumpa pro čerpání vody z dolů. V následujících letech se stroj začal vyvíjet a byl používán pro další účely. Nejdříve byl využíván jako hnací síla továren, kde byl využíván jako pohon generátorů elektřiny, nebo jeho otáčky rozvedeny tzv. transmisemi do zbytku továrny, čímž bylo poháněno vybavení továrny, např. vrtačky nebo soustruhy. Tyto parní stroje byly též využívány pro pohon mlýnů [4].

Dále byl stroj využíván v dopravních prostředcích. Nejvíce se prosadil na železnici, kde byl hnací silou parní lokomotivy. Ta nejvýznamnějším pohonem na kolejích od poloviny 19. století do poloviny 20. století. V některých méně rozvinutých zemích je výjimečně využíván dodnes pro pohon nákladních vlaků. Posledními z těchto států jsou Čína nebo Indie. V České republice jsou tyto lokomotivy využívány pouze při tzv. nostalgických jízdách (obr. 2) [4][6][7].

Obr. 2 Parní lokomotiva 475.179 [8]

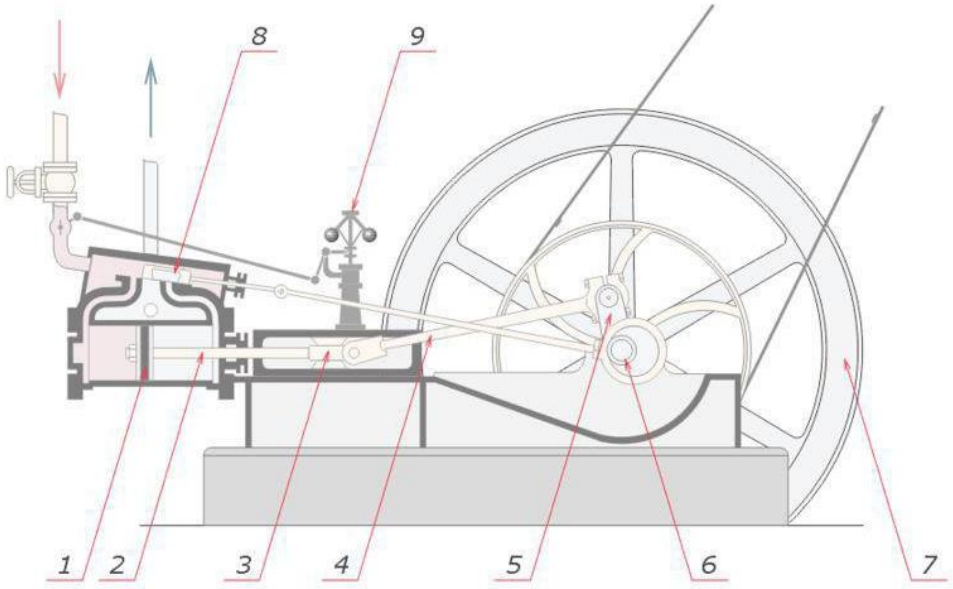
U lokomotiv se nejčastěji využíval stroj dvojčitý, méně často pak trojčitý. V pozdějších letech se využívalo také stroje s dělenou expanzí páry, a to sdružené dvouválcové a poté i tříválcové stroje [4].

Další využití:

- Lokomobila – stroj používaný v zemědělství. Jeho nástupcem je v dnešní době traktor;
- Parní válec;
- Parní automobil;
- Parní autobus;
- Parník;
- Parní letadlo.

2 SOUČÁSTI PARNÍHO STROJE

Parní stroj je parní motor využívající posuvný a vratný pohyb pístu. Jaké součásti zajišťují tento pohyb jeho přeměnu na pohyb otáčivý, je znázorněno na obr. 3.



Obr. 3 Součásti parního stroje [9]

Horká pára (symbolizována červenou šipkou) je přiváděna z parního kotle přes škrtící klapku do parní komory, ze které je pomocí šoupátka (8) rozváděna na zadní a přední stranu pístu (ta, která je blíže klice). Píst (1) se střídavě pohybuje ve válci a koná přímočarý pohyb. Ten je pomocí pístní tyče (2), křižáku (3 – kloub) a ojnice (4) přenášen na kliku (5). Klika zajišťuje přeměnu posuvného pohybu na otáčivý. Excentrický mechanismus (6) zprostředkovává přímou závislost pohybu pístu a šoupátka. Šoupátko poté rozděluje přívod horké páry do pístu a odvod páry, která na druhé straně pístu konala práci, z pístu do okolí nebo do kondenzátoru (znázorněno modrou šipkou). Wattův odstředivý (9) regulátor se používá pro stabilní chod stroje, se kterým je spojen. Tvoří ho dvě rotující závaží poháněná parním strojem. S vyšší úhlovou rychlostí se závaží oddalují od osy rotace a přivírají tím škrticí klapku, která určuje množství páry přiváděné do k pístu [4][10].

3 DRUHY PARNÍCH STROJŮ

1. **Dle hospodárnosti s vodou**

   a) Výfukový
      - pára je po expanzi vyfukována do vzduchu;

   b) Kondenzační
      - pára jde po expanzi do kondenzátoru, kde zkondenzuje ve vodu, dostane se zpět do zásobníku a je opět využita;
      - je složitější a nákladnější, ale hospodárnější ve spotřebě páry, tepla i paliva.

2. **Dle polohy parních válců**

   a) Horizontální (ležaté)
      - Lokomotiva;

   b) Vertikální (stojaté)
      - Čerpadla;

   c) Šikmé
      - Parní rypadla, hlubidla;

   d) Kývavé
      - Kolesové parníky.

3. **Podle počtu válců**

   a) Jednoválcové

   b) Několikaválcové – složeny z většího počtu stejných válců
      - Dvojčité – kliky jednotlivých válců jsou natočeny o 90° pro spouštění stroje bez použití setrvačníku;
      - Trojčité – kliky jsou natočeny o 120°, což zajišťuje rovnoměrnost běhu stroje.

4. **Podle využití válce a pístu**

   a) Jednočinné
      - Pára pracuje na jedné straně pístu;

   b) Dvojčinné
      - Pára pracuje po obou stranách pístu.

5. **Podle působení páry**

   a) Plnotlakové
      - Po celý zdvih pístu se využívá plný tlak páry – píst se plní po celou dobu zdvihu;
      - Dochází k velké spotřebě páry, proto se tento typ využívá jen tam, kde je technologické zpracování nejdůležitější;

   b) Expanzní
      - Válec se naplní určitým množstvím páry, poté se přívod uzavře a pro zdvih je využíváno expanze páry.

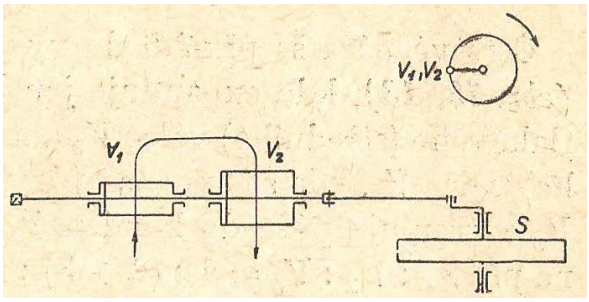
6. **Podle rychlosti**
    a) Volnoběžné;
    b) Rychloběžné.
7. **Podle velikosti tlaku páry**
    a) Nízkotlaké;
    b) Vysokotlaké.
8. **Podle využití objemu páry**
    a) S jednoduchou expanzí
        - Pára expanduje v jednom válci;
    b) S dělenou expanzí
        - Pára expanduje ve dvou až třech válcích [4].

3.1 PARNÍ STROJ S DĚLENOU EXPANZÍ PÁRY

Pro efektivnější využití energie páry je parní stroj sestaven ze 2-3 propojených válců. Tím se zvýší vykonaná práce a sníží měrná spotřeba páry v porovnání se strojem s jednoduchou expanzí. Při dělené expanzi je využíván vyšší vstupní tlak páry než u jednoduché expanze. Pára v prvním tzv. vysokotlakovém válci vyexpanduje na určitý tlak, který je poté vstupním tlakem pro druhý, nízkotlakový válec, poté je případně vedena do třetího válce. Vysokotlakový válec má menší rozměry než nízkotlakový, aby bylo zaručeno, že jejich práce budou přibližně stejné. Tyto válce mají stejný zdvih a můžou pracovat v několika různých konfiguracích. Mezi válci je tzv. přestupník, který zajišťuje vyrovnání tlakových změn při přepouštění páry mezi nimi [4].

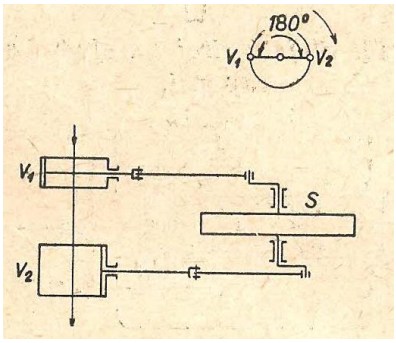
3.1.1 DVOJNÁSOBNÁ EXPANZE

Druhy zapojení parních strojů stroje využívající dva válce pro expanzi jsou zobrazeny na následujících obrázcích. Na obr. 4 je zobrazen tendemový parní stroj, který má písty na společné pístnici pracující ve stejné fázi. Výhodou tohoto zapojení je menší počet součástí v provozu, tím pádem menší pravděpodobnost poruch. Z těchto důvodů je také levnější, méně náročný na údržbu a zaujímá méně místa [4].



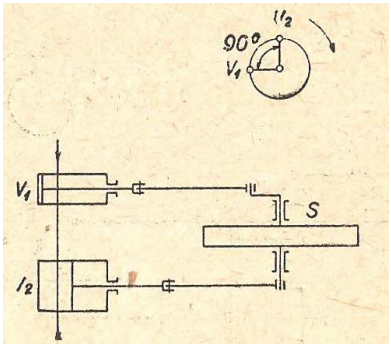
Obr. 4 Tendemový parní stroj [4]

Vulfický parní stroj je zobrazen na obr. 5, který má zapojené dva válce na dvou klikách. Tyto kliky jsou natočeny o úhel 180°. Nevýhodou tohoto uspořádání je nutnost natočení setrvačníku do určité polohy při spuštění stroje [4].



Obr. 5 Vulfický parní stroj [4]

Na následujícím obr. 6 je schéma sdruženého parního stroje. Od předchozího se liší pouze tím, že úhel mezi klikami jednotlivých válců je 90°. Tímto je zajištěno, že je stroj v každém okamžiku „rozkročen“ a je ho tedy možné spustit za jakékoli polohy. Výhodou zapojení válců vedle sebe je tedy snadnější spouštění a poté rovnoměrnější běh [4].

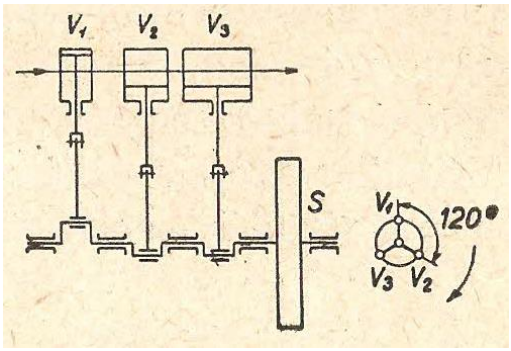


Obr. 6 Sdružený (kompaudní) parní stroj [4]

3.1.2 TROJNÁSOBNÁ EXPANZE

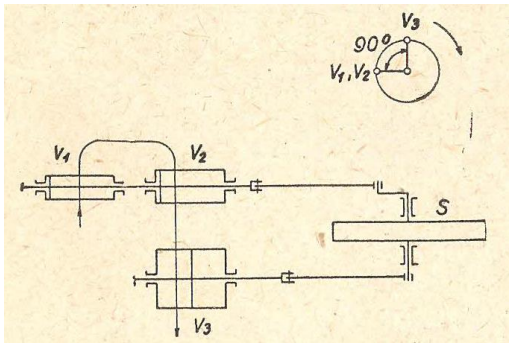
Pro trojnásobnou expanzi je mezi vysokotlakový a nízkotlakový válec vložen třetí, středotlakový válec. Poměr objemů válců se udává: $V_1 : V_2 : V_3 = 1 : (2\text{-}3) : (5\text{-}7)$. Válce mají opět stejný zdvih a můžou pracovat v několika konfiguracích.

Na obr. 7 je znázorněn stojatý parní stroj s trojnásobnou expanzí. Každý válec je připojen na vlastní kliku a jednotlivé kliky jsou pootočeny o úhel 120°. Výhodou tohoto zapojení je malá výška stroje, snadná přístupnost pístů a jednodušší montáž [4].



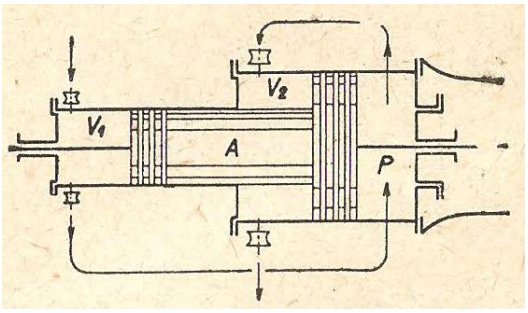
Obr. 5 Stojatý parní stroj s trojnásobnou expanzí [4]

Zapojení ležatého stroje s trojnásobnou expanzí je na obr. 8. Tento stroj využívá na jedné klice dvojnásobné expanze a na druhé klice natočené o 90° je zapojen nízkotlakový válec pro třetí fázi expanze. Válec V_3 poté koná stejně velkou práci, jako součet prací válců V_1 a V_2 [4].



Obr. 6 Ležatý parní stroj s trojnásobnou expanzí [4]

Na obr. 9 je vyobrazen Schmidtův dvouexpanzní stroj, který se skládá ze dvou válců, v nichž trojnásobně expanduje pára. Pára z kotle se vpustí do vysokotlakého válce V_1, ve kterém působí pouze z jedné strany tzv. diferenciálního pístu A. Poté se pára nejdříve vede do pracujícího přestupníku P, ve kterém částečně expanduje a následně do jednočinného nízkotlakového válce V_2. Stroj spotřebuje menší množství páry a má jednoduchý rozvod. Nevýhodou jsou vyšší pořizovací náklady [4].

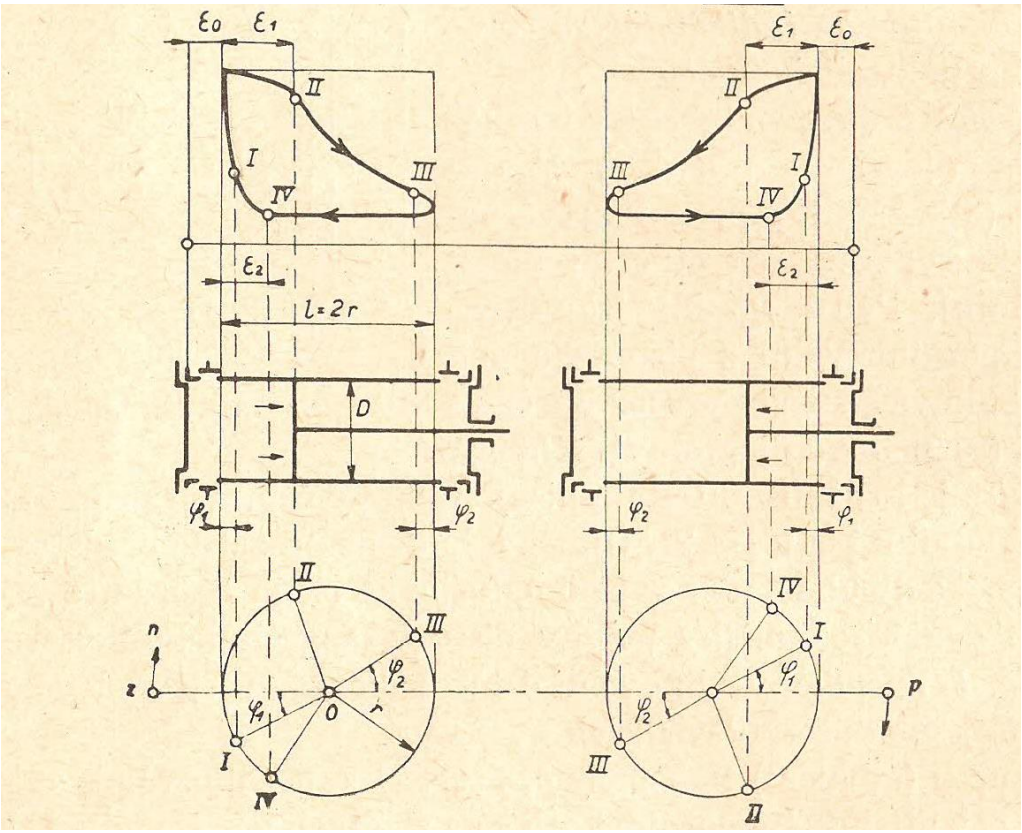


Obr. 7 Schmidtův dvouexpanzní parní stroj [4]

4 ANALÝZA CYKLU PARNÍHO STROJE

4.1 REÁLNÝ CYKLUS

Termodynamický cyklus parního stroje se skládá ze dvou cyklů, které probíhají proti sobě, po obou stranách pístu. Na následujícím obrázku jsou tyto cykly zobrazeny v indikátorovém p-V diagramu (obr. 10), který zobrazuje diagram nakreslený strojem při provozu, v diagramu zobrazujícím polohu pístu a diagramu zobrazujícím klikové kružnice.

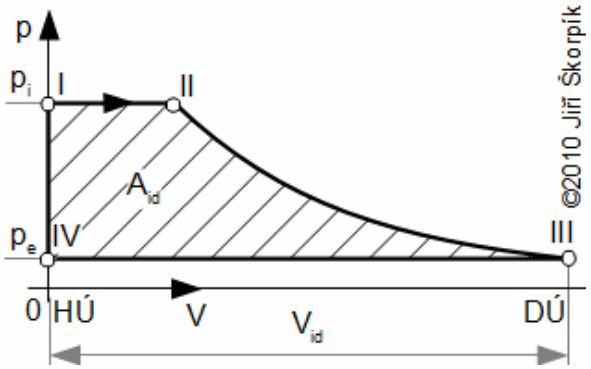


Obr. 8 Reálný cyklus parního stroje [4]

Hodnota ϵ_0 určuje škodný objem motoru, který má negativní vliv na spotřebu páry a závisí na typu rozvodu. Bod I, který je vymezen úhlem φ_1, značí otevření sacího ventilu šoupátkem. Tento úhel se udává v intervalu $\varphi_1 \in \langle 8°;14° \rangle$. Do válce vstupuje vstupní tlak páry p_1, který závisí na tlaku v parním kotli p_0 a na ztrátách v parovodu. Tato pára je při stálém otevření sacího ventilu nejdříve stlačována pístem do jeho horní úvratě a poté začne posouvat pístem směrem k dolní úvrati. Hodnota ϵ_1 značí objem, při kterém dochází ke konci plnění. V bodě II se uzavírá sací ventil a do otevření výfukového ventilu na píst působí konstantní množství expandující páry. Objem ve válci v bodě II se nazývá plnící objem. Mezi horní úvratí a tímto bodem dochází k tlakovým ztrátám v důsledku škrcení v rozvodném orgánu. Výfukový ventil se otevírá v bodě III, který je vymezen úhlem $\varphi_2 \in \langle 25°;45° \rangle$. Šoupátkem je propojen válec s výfukovým potrubím. Zároveň se na druhé straně pístu otevírá stejným pohybem šoupátka sání a tento objem se plní horkou párou. Při pootočení kliky o úhel φ_2 je píst v dolní úvrati. V bodě IV vymezeném objemem ϵ_2 se uzavře výfukový ventil a začíná komprese zbylé páry ve válci [4][11].

4.2 IDEÁLNÍ CYKLUS

Ideální cyklus (obr. 11) je takový cyklus, který základní principy z reálného cyklu zachová, ale cyklus zjednoduší na takovou úroveň, aby se dal analyticky popsat vyřešit. Parní stroj se ideálně popíše izobarickým plněním válce, izoentropickou expanzí páry, izobarickým výfukem páry a izochorickou kompresí páry.

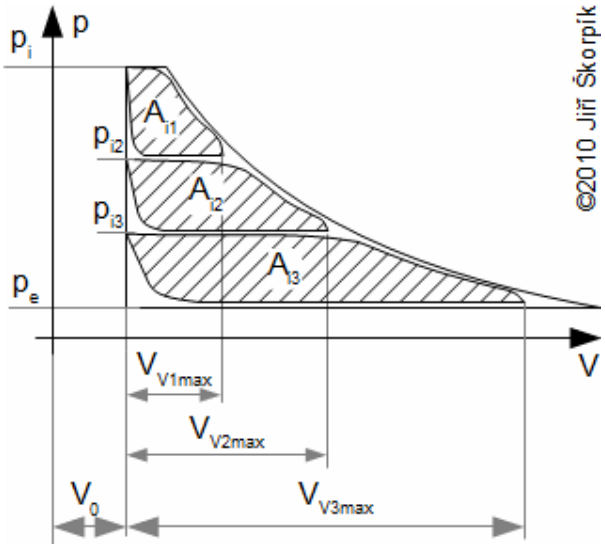


Obr. 9 Ideální p-V diagram [11]

Tento cyklus zanedbává škodný objem stroje a horní úvrať (HÚ) je umístěna na hranici nulového objemu. Hodnota V_{id} značí ideální zdvihový objem válce, p_i vstupní tlak páry a p_e výstupní. Body I – IV odpovídají bodům v reálném cyklu, ale jsou lehce posunuty. Křivka mezi body IV a I je zjednodušena na izochoru, oba body leží na úrovni horní úvratě. Mezi body I a II se neuvažují tlakové ztráty. Bod III je posunut do dolní úvratě (DÚ). Práce vykonaná tímto cyklem je v diagramu značená A_{id} [11].

4.3 DĚLENÁ EXPANZE PÁRY

Pokud stroj využívá velkého tlakového spádu, tak potřebuje vysoké plnění válce. S tímto souvisí snižování plnícího objemu válce. Pokud není možné snížit plnící objem, tak se začne snižovat termodynamická účinnost motoru. Tomuto lze předejít využitím stroje s dělenou expanzí páry. Rozdělí se tím expanze na více menších a díky snížení rozdílů teplot mezi vstupní a výstupní parou nedochází ke ztrátám kondenzací páry. Vzroste ale počet válců, pístů a dalších součástek a s tím klesne mechanická účinnost stroje [11].



Obr. 10 Termodynamický cyklus dělené expanze [11]

Pokud zakreslíme termodynamické cykly válců parního stroje s dělenou expanzí do p-V diagramu (obr. 12), vyplní jeden cyklus, který by charakterizoval parní stroj pracující se stejným vstupním tlakem páry, ale pouze s jedním válcem. Jednotlivé objemy V_{Vimax} vyznačují zdvihové objemy zapojených válců. Ve spojovacím potrubí mezi těmito válci dochází k tlakovým ztrátám, které jsou označeny p_{i2} a p_{i3}. Tyto objemy závisí na délce spojovacího potrubí [11].

4.4 PRÁCE PARNÍHO STROJE

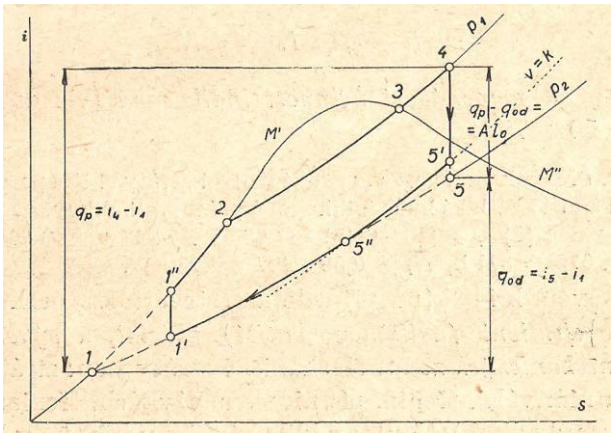
Měrná práce a se vypočítá jako rozdíl přivedeného a odvedeného měrného tepla.

$$a = q_p - q_{od}\ [J/kg], \tag{1}$$

Známe-li vstupní a výstupní tlaky a teploty a vypočítáme zbylé hodnoty využitím rovnic izobarického a izochorického děje, můžeme zakreslit h-s diagram pro cyklus parního stroje. Z tohoto diagramu (obr. 13) poté vyčteme hodnoty měrných entalpií a z nich vypočítáme hodnoty měrných tepel q_p a q_{od} dle následujících vzorců [4].

$$q_p = h_4 - h_1, \tag{2}$$

$$q_{od} = h_5 - h_1, \tag{3}$$



Obr. 11 h-s diagram parního stroje [4]

4.5 ÚČINNOST PARNÍHO STROJE

Účinnost parního stroje závisí na větším množství faktorů než účinnost motorů s vnitřním spalováním. Nejdříve se voda ohřívá v kotli, kdy vyvinuté teplo spáleného paliva je využito s tzv. kotlovou účinností. Ta je poměrem tepla obsaženého v ohřáté vstupní páře k teplu, které vyvinulo palivo k ohřátí páry na vstupní teplotu. V závislosti na dokonalosti kotle se pohybuje mezi 50 a 90 % [4].

Následně po projití páry cyklem je možno spočítat termickou účinnost, která je rovna poměru práce cyklu k přivedenému teplu. Tuto práci lze následně porovnat s prací indikovanou přímo strojem a získáme porovnávací (termodynamickou) účinnost indikovanou. Mechanická účinnost uvažuje vliv mechanických ztrát v celém stroji (např. v klikovém mechanismu) [4].

Následná celková účinnost je rovna součinu kotlové, termodynamické a porovnávací indikované a mechanické účinnosti. Vyjadřuje tak celkové využití energie paliva při přeměně na mechanickou práci na klice stroje [4].

5 VÝVOJ PARNÍHO STROJE V MODERNÍ DOBĚ

Parní stroj se v průběhu let, kdy byl nejvíce využíván, vyvinul ve velmi dokonalé zařízení. Již před druhou světovou válkou byl ale ukončen vývoj parního stroje pro využití v automobilech, neboť agregáty na výrobu páry nebyly schopné vyvinout dostatečný výkon, nebo kvůli špatné schopnosti stroje měnit výkon. Pára se vždy vyráběla v kotli, který byl zahříván nejdříve kotlem na dřevo a poté na uhlí.

Motory s vnitřním spalováním se v té době postupně vyvinuly (např. zavedením startéru) na takovou úroveň, že v automobilním průmyslu předčily parní stroj a automobilky, které se zabývaly vývojem parních strojů do automobilů tuto cestu zavrhly.

Nejznámějším automobilem s parním pohonem byl americký Stanley Steamer. V prvním desetiletí 20. stol. byl nejpopulárnějším automobilem ve Spojených státech. Nejvíce se vyrobilo modelu 735, který lze vidět na obr. 14 [12].

Obr. 12 Stanley Steamer 735 [12]

V době, kdy se lidé začali zaměřovat na alternativní pohony ke spalovacímu motoru, se také obrátil pohled na parní stroj a jeho využití v silničních dopravních prostředcích. Momentová charakteristika je pro toto využití výhodná, ale parní stroj musel nejdříve splnit některé požadavky (např. rozměrové) [13].

Kotel je možné zredukovat na trubku stočenou do spirály, čímž se ušetří prostor, a navíc urychlí výroba páry. Velkým problémem je ale způsob, jakým se motor v automobilu využívá. Na rozdíl od lokomotivy, které využívají parní stroj nepřetržitě na dlouhých vzdálenostech, je automobil často v provozu pouze na pár minut a provozuschopnost je vyžadována okamžitě po nastartování [13].

Pokud by měl být stroj provozován v zimních podmínkách, byla by třeba nemrznoucí kapalina s vlastnostmi podobnými vodě. Voda musí být opětovně využívána, tudíž musí být v uzavřeném okruhu s kondenzací [13].

5.1 LEAR MOTORS

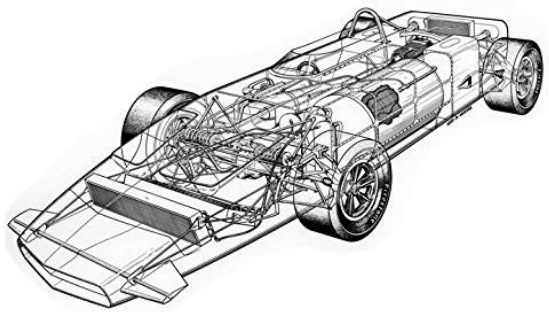
V 60. letech 20. stol. byly ve Spojených státech v Kalifornii zaváděny přísné ekologické předpisy pro vozidla. Tehdy nebyly elektropohony na takové úrovni, aby mohly nahradit spalovací motory např z důvodu neexistence kompaktních baterií. Jediným řešením byl trolejbus, který ale musel být konstantně připojen k elektrickému vedení [14].

Proto se místní dálniční policie rozhodla, že nechá svoje vozy osadit parními motory. Společnosti, které se k výzkumu přihlásily, dostaly na vývoj 6 měsíců, měly proplacený rozpočet a dostaly tehdejší Dodge Polara, do kterého měly umístit svůj motor [14].

Do projektu se zapojily dvě společnosti, Thermodynamic Systems a Lear Motors. Za druhou zmíněnou společností stál Bill Lear, známý vynálezce, jehož asi nejznámějším projektem bylo soukromé proudové letadlo Learjet [14].

Na rozdíl od parních strojů s otevřeným okruhem Lear vytvořil motor, který využíval uzavřený okruh vody. Voda byla přeměněna v páru před vstupem do válce a poté opět zkondenzovala a byla opakovaně použita. Namísto vody měla být v okruhu tajemná kapalina jménem Learium, která by byla odolná proti zamrzání [14].

Jako demonstraci svého výrobku se Lear rozhodl postavit závodní vůz (obr. 15) pro populární americký závod Indy 500 nazvaný Lear Vapordyne. Dle informací výrobce byl jeho pohon výkonnostně ekvivalentní konkurenčním závodním vozům. Motor se skládal ze šesti válců uložených do trojúhelníku a spalovaným palivem pro výrobu páry byl kerosin. Samotný závodní vůz se dochoval, ale je to pouze silueta auta bez pohonu [15].



Obr. 13 Lear Vapordyne [16]

V průběhu vývoje se koncept motoru změnil z pístového motoru na parní turbínu. Časová lhůta na vývoj a dodání byla ale velmi krátká a Lear Motors nebyl schopný tento motor dokončit. Projekt tedy byl zastaven s tím, že automobil nebyl dokončen. Kolují informace o tom, že se podařilo zprovoznit tento parní motor v Chevroletu Monte Carlo, ale neexistuje důkaz, který by jeho existenci mohl potvrdit [14].

Obr. 14 Parní autobus Lear [14]

Do roku 1973 se ale Lear zaměřil na projekt parního autobusu. Vozidlo, které se vzhledově nelišilo od normálních autobusů, je zobrazeno na obr. 16. Byl poháněn parní turbínou a pracovním médiem se opět stala voda. Trvalo jednu minutu, než byl autobus schopný provozu a dalších 90 sekund, než dosáhl plného výkonu. Kamenem úrazu nakonec pro autobus byla ropná krize, kdy se ekologičnost pohonu stala druhořadou ke spotřebě paliva, která byla slabou stránkou Learova autobusu. Pokud tedy projekt měl uspět, potřeboval by více času a zdrojů, což se mu nedostalo [14][17].

5.2 IAV AUTOMOTIVE ENGINEERING

V 90. letech minulého století k velkému vývoji v oblastech materiálů, tribologie, technologie spalování a poháněcí elektroniky. Díky tomuto pokroku byly vynalezeny stacionární hořáky na bázi termických reaktorů, které jsou schopné téměř bezemisního spalování [18].

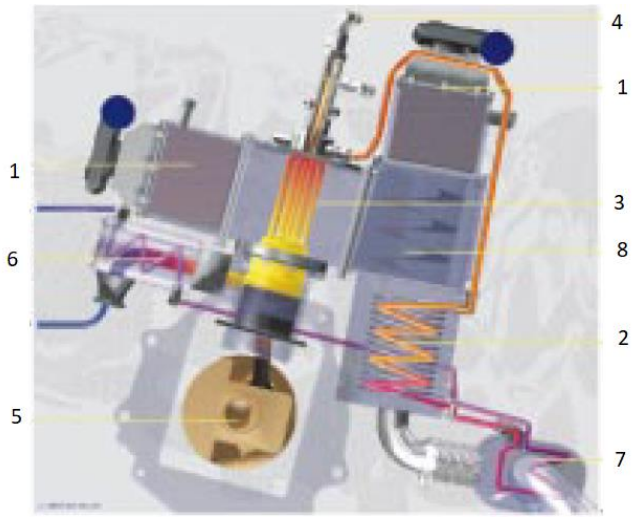
V návaznosti na to byl v roce 1994 zahájen výzkum bezemisního pohonu automobilů. Výzkum byl proveden na tříválcovém motoru pro vůz střední třídy SULEV (Super ultra-low emissions vehicle). Cílem bylo vyrobit pohon, který by bez použití katalyzátorů dosáhl velmi nízkých emisí [18].

V roce 2001 skončila první etapa vývoje ZEE (Zero emission engine). Jeho výsledkem byl prototyp tříválcového motoru ZEE03, který akceptuje automobilní požadavky. Při jeho zkušebním provozu byl testován výkon, spotřeba, výfukové emise a dynamika motoru. Otestovány byly dvě varianty – nízkotlaká využívající jmenovitý tlak páry 5 MPa a vysokotlaká, která využívala tlaku 50 MPa. Nízkotlaká využívala řízení motoru hydraulicky činnými talířovými ventily a vysokotlaká injektorový systém [18].

5.2.1 PRINCIP ČINNOSTI

Motor se skládá ze tří identických válců, jejichž parní systémy jsou oddělené. Na obr. 17 je zobrazen řez motorem ZEE. O výrobu páry se stará šest hořáků (č. 1), odpadní teplo je poté odváděno do vyvíječe páry (č. 2) a výměníku tepla výfuku (č. 7). Průběh teploty vody v uzavřeném okruhu zobrazují zabarvené části potrubí [18].

Voda nejprve prochází vysokotlakou pumpou, která vyvodí tlak 5 MPa. Poté proudí nejprve výměníkem tepla páry (č. 6), kde se ohřívá zbytkovým teplem už vyexpandované páry a výměníkem tepla výfuku, kde je ohřívána zbytkovým teplem spalin hořáků. Poté přichází voda do vyvíječe páry, kde pára dosahuje teploty kolem 500 °C. Nakonec je pára vedena do přehříváku (č. 3), kde je ohřáta na požadovanou teplotu pro zvolené otáčky motoru. V případě 50 MPa varianty je voda vstříknuta do válce injektory (č. 8), u 5 MPa varianty se o vstup páry do válce starají talířové ventily. Působením ve válci se roztáčí kliková hřídel motoru (č. 5). Po průchodu válcem je pára vedena výměníkem tepla páry do kondenzátoru. Poté se cyklus opakuje [18].



Obr. 15 Součásti ZEE [19]

5.2.2 SOUČÁSTI MOTORU

HOŘÁK

Proces spalování probíhá uvnitř porézního materiálu. Na rozdíl od hořáků s otevřeným plamenem zde dochází k homogennímu rozložení teploty díky stabilizovanému plamenu. Tento způsob hoření produkuje velmi nízké emise, umožňuje široký rozsah výkonu (1,5 - 36 kW) a možnost spalování více druhů paliv. Těmito palivy může být např. zemní plyn, vodík, propan, butan a také běžná automobilní paliva [18].

Pro každý válec jsou dva hořáky (obr. 17 č. 1). Pravý hořák se stará o ohřátí páry na základní teplotu ve vyvíječi páry pro základní zatížení motoru. Levý hořák zajišťuje potřebnou teplotu pro zatížení větší, požadované řidičem vozidla, tudíž ohřívá přehřívák. Spaliny z levého hořáku jsou ale pořád dostatečně teplé na to, aby se smíchaly se spalinami z pravého hořáku ve směšovací komoře (obr. 17 č. 8) a pomáhaly ohřívat vodu ve vyvíječi páry [20].

VYVÍJEČ PÁRY

Každý válec motoru je vybaven samostatnou jednotkou vyvíječe páry. Skládá se z žáruvzdorných paralelně zapojených trubek. Ty jsou navinuty tak, aby v nich pracovní medium proudilo rovnoměrně a docházelo k malým tlakovým ztrátám. Pára se zde ohřívá na základní teplotu 500 °C [18].

PŘEHŘÍVÁK

Přehřívák je složen ze svazku trubek z odolné slitiny na bázi niklu. Horké plyny druhého hořáku ohřívají páru na požadovanou teplotu v závislosti na požadovaném výkonu, která poté proudí k samotnému válci. Tato teplota je omezena mezí pevnosti materiálu, ze kterého jsou vyrobeny trubky, tudíž nemůže přesáhnout 900 °C [18].

Výhodou využití přehříváku je, že pára nemusí dosáhnout své nejvyšší teploty u ve vyvíječi páry. Díky tomu je možné použít v obvodu před přehřívákem využít méně odolné, levnější materiály [18].

REGULACE

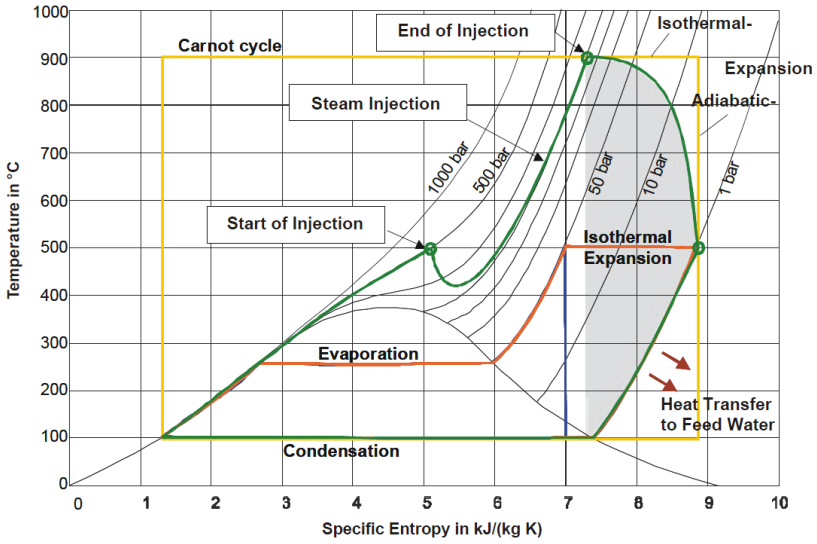
Motor je řízen elektronickou řídící jednotkou (ECU), která se liší od konvenčních motorů. Jejím úkolem je převést polohu plynového pedálu řidiče na odpovídající nastavení parního obvodu, rozvodové časy válců, výkony hořáků a otáčky vodní pumpy [18].

Kvalitu páry poté zajišťují regulační obvody. Pro požadované zatížení a otáčky motoru je potřeba přivést do válce určitou hmotnost páry. Mění se tím dynamický průběh tlaku a teploty v parním obvodu a požadovanou hodnotu ECU doreguluje [18].

ECU také automaticky spouští nebo vypíná proces výroby páry a činnosti motoru v závislosti na poloze klíče v zapalování, nebo provádí kontrolu a chybovou analýzu [18].

5.2.3 ZÁKLADNÍ TERMODYNAMICKÝ KONCEPT

Cyklus parního motoru ZEE vychází z Rankinova cyklu. Na obr. 18 jsou znázorněny dva termodynamické návrhy tohoto motoru spolu se základním Rankinovým cyklem (modrý) a Carnotovým cyklem (žlutý). Při 5 MPa variantě (oranžová) je zařazena izotermická expanze, místo izoentropické. Verze využívající tlak 50 MPa (zelená) se řídí podle nadkritického cyklu. Vodní pumpa vyvodí v kapalině tlak 50 MPa a ta se poté ohřeje ve vyvíječi páry na 500 °C, aniž by prošla oblastí mokré páry. Kombinací přehříváku a využití vstřikování místo ventilů je možné páru ohřát až na 900 °C. Speciálním designem přehříváku dosáhneme toho, aby při expanzi klesl tlak na 0,1 MPa. Pára vycházející z válce poté předává část tepla vodě, která přichází do vyvíječe páry. Následně jde voda do kondenzátoru a cyklus se opakuje [20].



Obr. 16 Termodynamický cyklus ZEE [20]

5.2.4 PROJEKTOVANÉ PARAMETRY ZEE

Tab. 1 Projektovené parametry motoru ZEE [18]

Počet válců	3	Jmenovitý výkon	32 kW
Zdvihový objem	992 cm^3	Jmenovité otáčky	2000 min^{-1}
Vrtání	90 mm	Maximální otáčky	2500 min^{-1}
Zdvih	52 mm	Jmenovitý točivý moment	300 Nm
Maximální výkon hořáků	6x36 W	Maximální točivý moment	500 Nm
		Rozsah otáček jmenovitého točivého momentu	200-1500 min^{-1}

5.2.5 DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

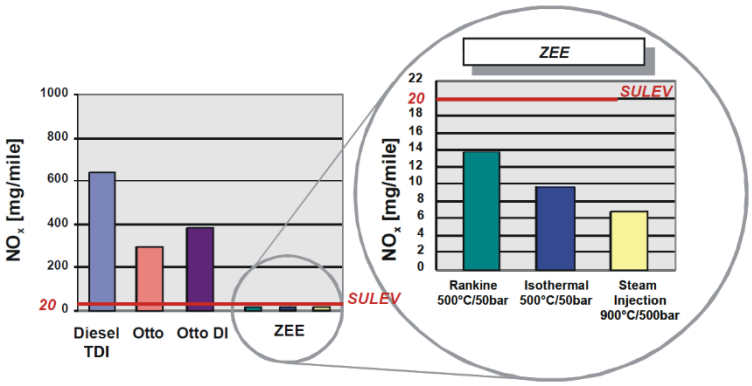
Maximální teplota trubek v přehříváku 900 °C omezuje hořáky ve výkonu, který můžou vyvinout. Možný zlepšením by bylo využití trubek z keramických materiálů, které jsou odolnější vůči teplotě jak pevností, tak nízkou délkovou roztažností [18].

V otáčkách 1800 min^{-1} dosáhl motor svého nejvyššího výkonu 32 kW. Při otáčkách 200 min^{-1} byl dosažen nejvyšší točivý moment 350 Nm, který je omezen kvůli seřízení hydraulického ovládání ventilů. Pokud by byla možnost využít plný výkon hořáků, pak by se teoreticky dalo dosáhnout výkonu 50 kW točivého momentu 300 Nm v rozmezí otáček 200 až 1500 min^{-1} [18].

5.2.6 SHRNUTÍ

ZEE by mohl být použitelný pro pohon automobilů. Jeho výhodou je, že ke spalování nevyžaduje jedno specifické palivo, ale pro provoz hořáků je jich možných více. Motor při testování dosahuje hodnot, které na svou dobu byly uspokojivé pro pohon vozidel nižší třídy [18].

Z pohledu ekologie produkuje pohon parním motorem ZEE mnohem méně emisí než konvenční spalovací motory. Z grafu na obr. 19 je patrné, že hodnoty NO_x jsou mnohem nižší než u těchto motorů. Také lze vidět, že produkované emise jsou výrazně menší než hodnoty, které vyžadují nejpřísnější předpisy pro SULEV [20].



Obr. 17 Hodnoty emisí ZEE [20]

Velikou nevýhodou motoru je, že před provozem vyžaduje přípravu 10-20 sekund. Dnes by se díky moderním technologiím mohlo toto vyřešit pomocí spuštění startovní procedury při příchodu k automobilu, takže by byl provozuschopný při nastoupení. V rámci výzkumu nebyl řešen problém zamrzání vody v záporných teplotách, takže motor ZEE je použitelný pouze v obdobích nebo místech, kde jsou teploty nad bodem mrazu [18].

5.3 VYUŽITÍ PARNÍHO STROJE MIMO AUTOMOBILNÍ PRŮMYSL

Přestože se parní stroj ve velkovýrobě v rámci automobilů od druhé světové války neuplatnil, objevily se odvětví, ve kterých by své využití našel. Jedním by mohla být společná výroba tepla a elektrické energie (kogenerace). Několik společností má ve svém portfoliu technologií i parní motory.

5.3.1 TENZA A. S.

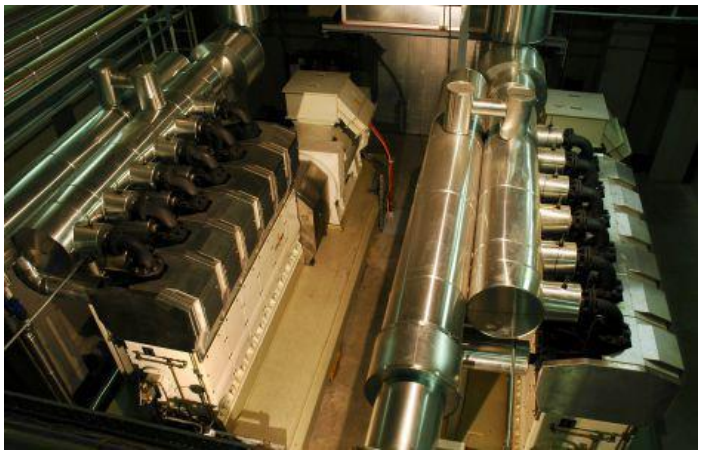
Jednou z nich je česká firma TENZA a. s., která se pohybuje v oborech energetiky, strojírenství a stavebnictví. V rámci jejího výzkumu vznikla parní elektrická jednotka PEJ-1, která pístovým parním strojem vyrábí elektrickou energii s využitím odpadního tepla různých spalovacích procesů [21].

Teplo spalin ohřívá kotel s vodou a vyrábí vodní páru. Energie páry se poté mění v mechanickou energii, která roztáčí elektrický generátor. Tato parní jednotka je schopná vyvinout výkon od 10 kW do 100 kW. Teplo odcházející z cyklu parního stroje se dále může využít např. k vytápění [21].

5.3.2 SPILLING TECHNOLOGIES

Další firmou zabývající se parními stroji je německá Spilling Technologies GmbH. U své technologie kombinuje termodynamické výhody pohonu pístu tlakem páry a konstrukci moderního dieselového motoru [22].

Využití této technologie je vhodné pro malé elektrárny vyrábějící elektřinu spalováním biomasy, spalovny odpadu nebo pro kombinovanou výrobu elektřiny a tepla. Stroje jsou tvořeny modulárně, tudíž je možné postavit stroj s jedním až šesti válci s patnácti různými průměry válce, pro požadované vstupy a výstupy. Parní stroj se šesti válci je na obr. 20 [22].



Obr. 20 Parní stroj Spilling Technologies [22]

S jedním strojem je možné realizovat i dělenou expanzi páry s využitím stejné konstrukce, jako je pro jednoduchou expanzi. Tímto lze dosáhnout rozpětí výkonu od 100 kW do 1200 kW [22].

ZÁVĚR

Tato práce představuje shrnutí poznatků o parním stroji z historického hlediska a také jeho moderní vývoj. Jako jedna z nejstarších technologií pohonu strojů se jeho vývoj zastavil do doby před druhou světovou válkou. Následně se na něj upřela pozornost při hledání alternativního zdroje pohonu automobilů ke spalovacím motorům. V době, kdy pohon např. elektromotory hlavně z důvodů nízké kapacity baterií, nebyl alternativou, která by mohla ovlivnit dopravu, se určité společnosti pokusily obnovit myšlenku parního stroje. Změnou v původním konceptu bylo uzavření okruhu vody kondenzací v kondenzátoru.

V 60. letech vyvíjela parní motor americká společnost Lear Motors v reakci na projekt Kalifornské dálniční policie. V rámci vývoje byl vyroben závodní automobil, který měl sloužit jako propagace tohoto pohonu. Motor se v průběhu projektu změnil z parního stroje v parní turbínu, a nakonec kvůli krátké lhůtě na dokončení byl zastaven. Společnost se pokusila vrátit se s autobusem na parní pohon, ale tento projekt v roce 1973 ukončila ropná krize.

Na přelomu století se využitím parního stroje zabývala společnost IAV Automotive Engineering. Středem vývoje byl tříválcový motor pro pohon vozidel střední třídy, ve kterém se voda ohřívala ve spirále pomocí hořáků. Tento motor byl schopný vyvinout výkon 32 kW, v době výzkumu výkon vhodný pro vozidla nižší třídy. Vyšší výkon v rámci výzkumu nebyl možný z důvodu nejvyšší možné teploty, která je limitujícím faktorem u trubek ohřívané spirály. Z hlediska emisí je motor na výborné úrovni, kdy nepřesahují ani nejpřísnější limity pro extrémně ekologická vozidla (SULEV).

Velkým problémem moderního parního stroje dle mého názoru je skutečnost, že neexistuje kapalina, která by byla schopná nahradit vodu ve všech ohledech jako pracovní médium, a zároveň by byla odolná vůči mrazu. Za aktuálních podmínek by tedy byl motor vhodný jedině pro provoz v teplých klimatických zónách. Neméně významným problémem je řešení rychlosti odezvy na polohu akcelerátoru. Dle mého názoru není možné dostatečně rychle měnit teplotu páry, která vstupuje do válce, aby motor reagoval na požadavky řidiče tak, jak je to v konvenčních spalovacích motorech.

V dnešní době, kdy jsou elektromobily hlavním a nejpropagovanějším alternativním pohonem, se automobilky zaměřují na vývoj hybridních pohonů a elektromobilů. V pozadí těchto pohonů ale vždy stojí elektrárna, kde se vyrábí elektřina převážně spalováním uhlí, ropy nebo využitím jaderného štěpení. Parní motor by se mohl ukázat jako alternativní pohon díky tomu, že by ke spalování mohlo být využito více druhů paliv. Nejdříve by ale musel projít výzkumem, který by prokázal nebo vyvrátil jeho využitelnost v praxi. Tento výzkum by byl velice nákladný, a protože by mohl skončit neúspěchem, nemyslím si, že by se jím některá z předních automobilek mohla zabývat.

Protože v automobilním průmyslu se v poslední době tento typ pohonu neuplatnil, posledními místy, kde se vyskytuje jako plnohodnotně funkční stroj, jsou speciální kogenerační jednotky některých společností. Pro nadšence jsou každoročně pořádány nostalgické jízdy a srazy např. parních automobilů, kde majitelé předvádí své kousky v nejlepší formě. Tato technologie tedy má stále své příznivce a pravděpodobně nikdy neupadne v zapomnění.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

[1] Muzeum starých strojů – historie parního stroje, 2007. Muzeum starých strojů [online]. Žamberk [cit. 2019-02-12]. Dostupné z: http://starestroje.cz/historie/historie.parniho.stroje.php

[2] Steam Engine. *Science Clarified* [online]. Advameg, 2019 [cit. 2019-02-28]. Dostupné z: http://www.scienceclarified.com/Sp-Th/Steam-Engine.html

[3] Vynálezci a objevitelé v oblaku páry!. 21stoleti.cz VĚDA KTERÁ VÁS BUDE BAVIT [online]. Praha: RF HOBBY, 2006 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: https://21stoleti.cz/2006/12/19/vynalezci-a-objevitele-v-oblaku-pary/

[4] Míč boha větrů Aeola. In: *OSEL.CZ* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: http://www.osel.cz/popisek.php?popisek=19914&img=aeolipile-illustration.jpeg

[5] KLÁG, Josef. *Parní stroje*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1953.

[6] Uses of steam engine. Motor [online]. [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: https://en.demotor.net/steam-engine/uses

[7] Steam in Asia (West) 2019. International Steam Locomotives 2019 [online]. [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: http://www.internationalsteam.co.uk/asiawest.htm#India

[8] In: *Aktuality a články – ŽelPage* [online]. Spolek ŽelPage, 2001 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://www.zelpage.cz/fotogalerie/big/475750.jpg

[9] *Složení motoru* [online]. In: . [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://slideplayer.cz/slide/2283892/8/images/3/Slo%C5%BEen%C3%AD+motoru.jpg

[10] LEHAR, František a Miroslav VORÁČEK. *Fyzika: pro kurs z učiva osmileté střední školy*. 2. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961.

[11] ŠKORPÍK, Jiří. Termodynamický návrh pístového parního motoru. Transformační technologie. Brno: Jiří Škorpík, 2013. ISSN 1804-8293. Dostupné také z: http://www.transformacni-technologie.cz/29.html

[12] Stanley Steamer -- General Information. *Stanley Motor Carriage* [online]. 2003 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: http://stanleymotorcarriage.com/GeneralTechnical/GeneralInfo.htm

[13] MACKERLE, Julius. *Automobil s lepší účinností*. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1985.

[14] Theme: Disappointment – All Steam&Mirrors. *Driven To Write* [online]. 2013 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: https://driventowrite.com/2015/12/02/lear-steam-car/

[15] Lear Steam Car. *The Virtual Steam Car Museum* [online]. 2015 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: http://www.virtualsteamcarmuseum.org/makers/lear_motors_corporation.html

[16] 1969 Lear Vapordyne Championship Car. In: *Amazon.com* [online]. Amazon, 1996 [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: https://www.amazon.com/1969-Vapordyne-Championship-Photo-Poster/dp/B00VKZFKW2

[17] Lear Introduces Vapor Turbine Engine. *The New York Times* [online]. 1972, (13 February), s. 60 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: https://www.nytimes.com/1972/02/13/archives/lear-introduces-vapor-turbine-engine.html

[18] KAMEŠ, Josef. Alternativní pohon automobilů. Praha: BEN – technická literatura, 2004. ISBN 80-7300-127-6.

[19] Der Dampfmotor Entwicklungsstand und Marktchancen. *MTZ Motortechnische Zeitschrift*. 2001, **2001**(62).

[20] MÖßBAUER, Stephan, Franz DURST, D TRIMIS a Tobias HAAS. Zero Emission Engine – A Novel Steam Engine for Automotive Applications [online]. 2001, 2001/01/01 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/237317776_Zero_Emission_Engine_-_A_Novel_Steam_Engine_for_Automotive_Applications

[21] Parní Motory. *Tenza – Realizujeme vaše představy* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: http://www.tenza.cz/cz/aktivity/energetika/technologie/parni-motory/

[22] Steam Engines. *Spilling Technologies GmbH* [online]. Hamburg, 2019 [cit. 2019-05-22]. Dostupné z: https://www.spilling.de/products/steam-engines.html

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A_{i1-3}	[J]	Jednotlivé práce stroje s dělenou expanzí páry
A_{id}	[J]	Práce ideálního cyklu
h	[J/kg]	Měrná entalpie
p_0	[Pa]	Tlak v parním kotli
p_1	[Pa]	Vstupní tlak páry
p_e	[Pa]	Výstupní tlak páry při ideálním cyklu
p_i	[Pa]	Vstupní tlak páry při ideálním cyklu
q_{od}	[J/kg]	Odvedené měrné teplo
q_p	[J/kg]	Přivedené měrné teplo
V_0	[m^3]	Škodný objem
V_{1-3}	[m^3]	Objem válce
V_{id}	[m^3]	Ideální zdvihový objem válce
$V_{V1-3max}$	[m^3]	Jednotlivé zdvihové objemy stroje s dělenou expanzí páry
$\varphi_{1,2}$	[°]	Úhel natočení kliky stroje