

6. TEPELNÉ OBĚHY A JEJICH REALIZACE

Jiří Škorpík, ORCID: 0000-0002-3034-1696, skorpik.jiri@email.cz

Úvod 1

Oběhy spalovacích motorů 1

- Lenoirův oběh 1 • Oběh zážehového motoru (Ottův oběh) 3 • Oběh vznětového motoru (Dieselův oběh) 5 • Přepřínování spalovacích motorů 6

Rankine-Clausiiův oběh (parní oběh) 7

- výpočet parního oběhu [Ú.623] 8

Braytonův oběh (Jouleho oběh) 9

- výpočet Braytonova oběhu [Ú.625] 10

Chladicí oběh 10

Carnotizace porovnávacího tepelného oběhu – zvyšování tepelné účinnosti 12

Tepelné stroje a podobné pojmy 12

- Tepelná elektrárna a její účinnost 12 • Teplárna – kombinovaná výroba tepla a elektřiny 13

Odkazy 15

Přílohy 17

- 59 Odvození rovnic pro Braytonův oběh 17 • 620 Odvození rovnic pro zážehový (Ottův) oběh 18 • 622 Odvození rovnic pro Rankine-Clausiiův oběh (parní oběh) 19 • 623 Řešení úlohy 21 • 625 Řešení úlohy 22 • 629 Odvození rovnic energetické bilance chladicího oběhu 23 • 977 Odvození rovnic pro Lenoirův oběh 24 • 979 Odvození rovnic pro vznětový (Dieselův) oběh 25

Úvod

Vymezení pojmů reálný a vratný tepelný oběh a jaké znalosti je nutné mít k pochopení

Teplo⁴³ lze transformovat na práci⁴³ pomocí tepelných oběhů⁴³, tedy opakující se sérii změn stavových veličin pracovního plynu v objemovém nebo lopatkovém stroji. Proč je taková transformace možná je popsáno v článku Technická termomechanika⁴³. V tomto článku jsou už popsány některé ideální tepelné oběhy, které jsou složeny z vratných termodynamických změn⁴³. Technické praxi nelze ideální oběhy dokonale realizovat pouze se k nim přiblížit, takové oběhy můžeme nazývat reálné tepelné oběhy. Například porovnání ideálního oběhu pístového parního motoru²⁸ s reálným v kapitole Návrh p-V diagramu pístového parního motoru²⁹. Aby se reálné oběhy blížily těm ideálním, musely by probíhat velmi pomalu, a musely by se také na minimum omezit ztráty.

Proč potřebujeme znát ideální tepelné oběhy

Hlavním důvodem přiblížit podobu reálného oběhu tomu ideálnímu je dosažení vysoké tepelné účinnosti⁴³ oběhu. Proto se tepelné oběhy složeny pouze z vratných termodynamických změn nazývají také porovnávací tepelné oběhy⁴³. Každý tepelný oběh by měl mít porovnávací oběh, aby bylo možné definovat ztráty a oběh optimalizovat.

Zobrazujeme v diagramech stavových veličin

Tepelné oběhy se znázorňují v p-V diagramech⁴³ a nebo v T-s diagramech⁴³, ve kterém jsou lépe patrné energetické toky pro vytvoření energetické bilance oběhu.

Oběhy spalovacích motorů

Také výbušné nebo motory s vnitřním spalováním

Tímto pojmem, nebo pojmem výbušné motory, jsou označovány oběhy objemových strojů¹¹ (nejčastěji pístových), u kterých přerušované (výbušné) hoření palivové směsi probíhá přímo v pracovním objemu – válci, proto se také nazývají motory s vnitřním spalováním.

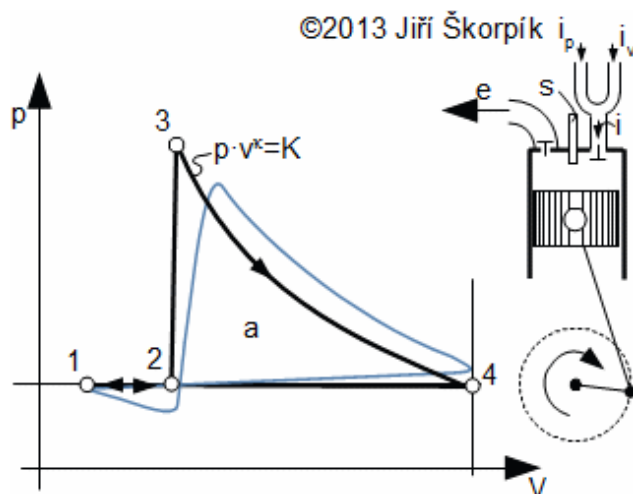
Lenoir, Otto a Diesel

Nejčastěji se jako porovnávací oběhy těchto motorů používají tyto tři oběhy: Lenoirův oběh, Ottův oběh a Dieselův oběh, které jsou pojmenovány po svých tvůrcích Jeanu Lenoirovi¹, Nikolausu Ottovi¹ a Rudolfu Dieselovi¹.

Lenoirův oběh

Dvoudobý motor

Jedná se o oběh plynového pístového motoru. Celý oběh je realizován během jednoho otočení hřídele – říkáme, že probíhá během dvou dob, první odpovídá trvání pohybu pístu z horní do dolní úvrati a druhá odpovídá trvání pohybu pístu z dolní úvrati do horní. Ve válci postupně probíhá: **1.** nasátí vzduchu a hořlavého plynu; **2.** zapálení a hoření této směsi; **3.** expanze horkých spalin; **4.** vytlačení spalin z válce, které spadá už do druhé doby. Viz *Obrázek 976, s. 2.*

976 p-v diagram
Lenoirova oběhu

i sání; e výfuk; i_p sání paliva nebo vstřík paliva v případě jeho kapalné fáze; i_v sání vzduchu; s zapalovací svíčka. p [Pa] tlak; V [m^3] objem; κ [-] exponent izoentropie⁴³ pracovního plynu ve válci; a [$J \cdot kg^{-1}$] měrná práce oběhu; K konstanta. Modře je vyznačen reálný průběh oběhu.

Sání

1/4. Sání směsi paliva (plyn) a vzduchu (okysličovadla) otevřeným ventilem i je realizováno pístem při jeho pohybu z horní do dolní úvrati. V p-V diagramu je tento proces popsán izobarickou změnou na úseku 1-2.

Zapálení a hoření

2/4. Po dokončení sání (píst není ještě v dolní úvrati) je uzavřen ventil i a směs je zapálena pomocí zapalovací svíčky s – nastává hoření. Hoření probíhá ideálně náhle mezi body 2-3 v p-V diagramu (tzv. izochorická změna), při kterém roste tlak i teplota pracovního plynu ve válci.

Expanze

3/4. Po ukončení hoření horké spaliny, v ideálním případě izoentropicky⁴³, expandují při pohybu pístu zpět do původního tlaku při sání. V p-V diagramu tuto změnu popisuje křivka mezi stavy 3-4, kdy píst právě dosáhne dolní úvrati.

Výfuk

4/4. Po ukončení expanze se otevře ventil pro výfuk spalin e a pohybem pístu z dolní do horní úvrati se vytlačí z válce ven. Po uzavření ventilu pro výfuk se může celý oběh opakovat. V p-V diagramu je tato změna popsána přímkou mezi body 4-1.

Motor s vnitřním
spalováním a
otevřeným oběhem

V Lenoirově oběhu se teplo generuje přímo uvnitř stroje hořením palivové směsi, proto mluvíme o motoru s vnitřním spalováním. Navíc se každý oběh koná s novou náplní (výměna pracovní tekutiny po každém oběhu), proto hovoříme i o otevřeném oběhu.

Kde vznikají rozdíly
mezi ideálním a
reálným oběhem
oběhem

Největší rozdíly mezi p-V digramem ideálním a reálným vznikají vlivem tlakových ztrát³⁸ při proudění plynů, kontinuálním pohybem pístu, který se při hoření nezastaví, a při sdílení tepla s okolím.

Lenoirův plynový
motor

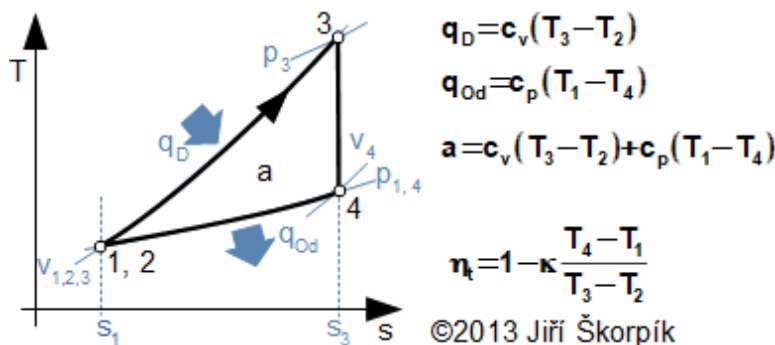
Motor, ve kterém je snahou se tomuto oběhu co nejvíce přiblížit se nazývá Lenoirův plynový motor¹. Při prvních realizacích byl vybaven šoupátkovým rozvodem a jako palivo se používal

svítiplyn⁷ o atmosférickém tlaku, který byl společně nasáván se vzduchem.

Výpočet Lenoirova oběhu

Výpočet Lenoirova oběhu není složitý a jednotlivé vzroce lze snadno odvodit ze zákonů pro vratné termodynamické změny a pravidel pro konstrukci T-s diagramů⁴³, *Obrázek 977*.

977 T-s diagram Lenoirova oběhu a základní rovnice



T [K] absolutní teplota; s [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] měrná entropie⁴³; q_D [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] měrné teplo dodané do oběhu; q_{Od} [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] měrné teplo odvedené z oběhu; v [$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$] měrný objem⁴³; c_v [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] měrná tepelná kapacita plynu při stálém objemu; c_p [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] měrná tepelná kapacita plynu při stálém tlaku; η_t [-] tepelná účinnost oběhu. Při odvození základních rovnic ze vychází rovnic Prvního zákona termodynamiky pro uzavřený systém⁴³, protože v ideální případě se termodynamické změny realizují v uzavřeném válci. Odvození rovnic energetické bilance Lenoirova oběhu je uvedeno v *Příloze 977*, s. 24.

Při hoření se mění termodynamické vl. pracovního plynu

Při návrhu reálného oběhu je nutné zohledňovat i skutečnost, že při hoření se mohou měnit termodynamické vlastnosti pracovního plynu/směsi/spalin.

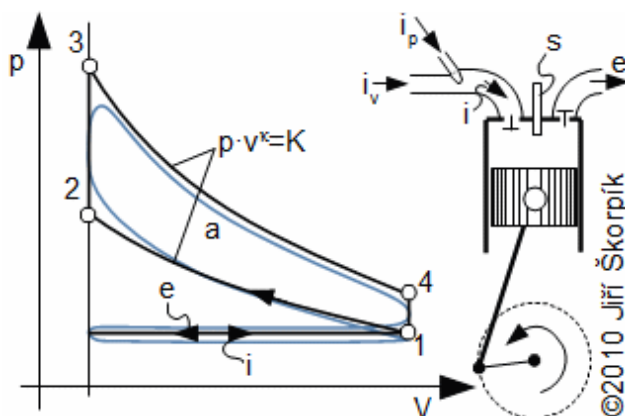
Oběh zážehového motoru (Ottův oběh)

Čtyřdobý motor na kapalná i plynná paliva

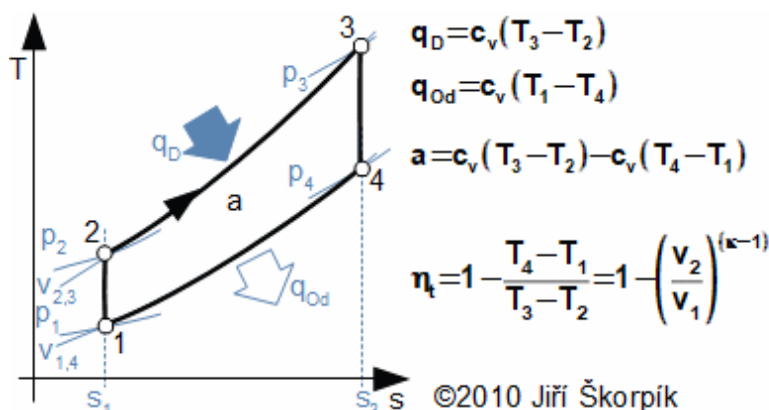
Zážehový oběh je rozdělen do čtyř termodynamických vratných změn probíhajících ve válci s pístem a dvěma ventily (sací a výfukový). Celý oběh je realizován během dvou zdvihů pístu (čtyři doby nebo též čtyři takty), *Obrázek 617 a 620*, s. 4. Vstupní pracovní látkou je hořlavá směs, nejčastěji to bývá směs vzduchu a hořlavých par paliva nebo hořlavého plynu. Původně se tyto motory nazývaly Ottovy motory¹, v současné době se dává přednost označení zážehové motory.

Rozdíl mezi ideálem a realitou, spojitý pohyb pístu a předstih

K realizaci zážehového oběhu by bylo potřeba, mimo jiné, přetržitého chodu pístu. Takový mechanismus je pro praktické použití nevhodný a pohyb pístu je nejčastěji realizován spojitě pomocí klikového mechanismu³¹. Odtud je zřejmé, že nemohou být realizovány izochorické děje na úseku 1-3 a 4-1 oběhu, ale pouze se k takovým dějům lze přiblížit. U reálných motorů se proto zapálení směsi děje ještě před dosažením horní úvrati pístu, s tzv. předstihem, během komprese. Podobně se s předstihem provádí otevření výfukového ventilu ještě před dosažením dolní úvrati pístu během expanze spalin. Na tvar oběhu mají vliv i ventily a sací a výfukové potrubí představující tlakové odpory, což snižuje práci oběhu.

617 *p-v diagram
zážehového oběhu*

i sání pracovní směsi, píst se pohybuje k dolní úvrati při otevřeném sacím ventilu; **1-2** izentropická komprese pracovní směsi, sací ventil uzavřen (kompresní poměr – poměr maximálního a minimálního objemu válce se pohybuje od 8 do 13 podle typu paliva [7, s. 11]), stav 2 musí odpovídat tlaku a teplotě nižší, než je teplota vznícení směsi ale zároveň už musí odpovídat teplotě hoření; **2-3** hoření směsi – ve stavu 2 dojde pomocí zapalovací svíčky *s* k iniciaci hoření směsi, která velice rychle shoří, přičemž se zvýší její tlak a teplota na stav 3. Ideálně hoření probíhá izochoricky – píst se nepohybuje; **3-4** expanze horkých spalin – izentropická expanze horkých spalin ze stavu 3 do stavu 4. Přitom spaliny působí na píst silou, který se pohybuje do své dolní úvrati; **4-1** výfuk – ve stavu 4 se otevře výfukový ventil a větší část spalin je z válce vyfouknuta do výfuku. Oběh je ukončen vytlačení zbylých spalin z válce pomocí pohybu pístu k horní úvrati přes otevřený výfukový ventil *e*. Nyní se celý oběh může opakovat. Modře je zakreslen přibližný průběh reálného oběhu zážehového motoru.

620 *T-s diagram
zážehového oběhu a
základní rovnice*

Při odvození základních rovnic ze vychází rovnic Prvního zákona termodynamiky pro uzavřený systém, protože v ideální případě se termodynamické změny realizují v uzavřeném válci. Odvození rovnic energetické bilance zážehového oběhu je uvedeno v Příloze 620, s. 18.

Dvoudobá verze

Zážehový oběh lze realizovat i během dvou dob. U dvoudobých motorů probíhá při pohybu pístu k dolní úvrati postupně hoření, expanze a nakonec i výfuk. Výfukový ventil *e* se otvírá ještě před dosažením dolní úvrati. Při pohybu pístu k horní úvrati jsou ze začátku otevřeny ventily pro výfuk *e* i sání *i*, přičemž sání probíhá díky podtlaku vzniklým ochlazením právě vyfukovaných spalin. Po uzavření sacího ventilu probíhá komprese a před horní úvrati *i* zapálení směsi. Místo pro výfuk je umístěn nikoliv na čele pístu, ale někde v oblasti dolní úvrati. Dvoutaktní motor je jednodušší než čtyřtaktní, má větší výkon při stejných otáčkách, ale horší účinnost ve větší části provozních parametrů.

Moderní benzinový motor a vstřík paliva přímo do válce

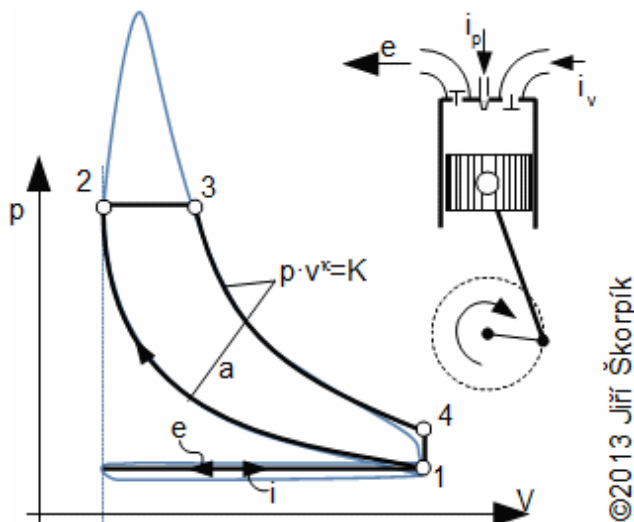
U moderních benzinových motorů, které mají blízko k oběhu zážehovému, se vstříkuje benzín přímo do válce aby se zvýšila teplota a snížila spotřeba paliva, problém je ale vznik sazí, které se odstraňují ve filtru tuhých částic.

Čtyři doby, velké stlačení pro dosažení teploty vznícení

Oběh vznětového motoru (Dieselův oběh)

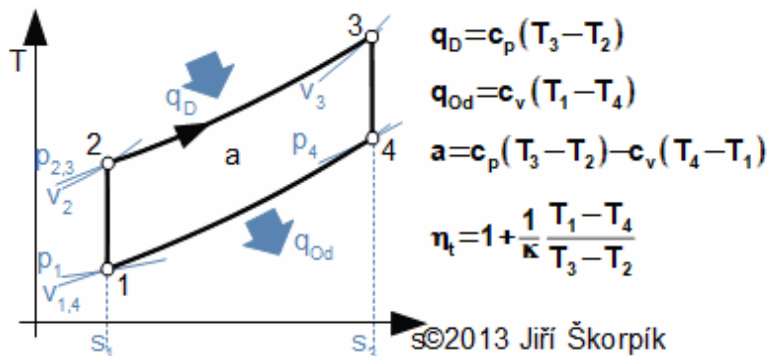
Vznětový oběh (též rovnotlakový) je rozdělen do čtyř dob podobně jako oběh zážehový, s tím rozdílem, že dosahuje mnohem většího stlačení, aby se palivo ve válci samo vznítilo nebo mělo k vznícení velmi blízko. Uvolňování tepla z paliva probíhá ideálně izobaricky a palivo je vstříkováno přímo do válce, *Obrázky 978, 979.*

978 *p-v diagram vznětového (Dieselova) oběhu*



Oběh začíná sáním vzduchu pohybem pístu k dolní úvrati při otevřeném sacím ventilu i_v (stav 1). Po uzavření sacího ventilu dojde k izotropické kompresi vzduchu ze stavu 1 do stavu 2. Kompresní poměr se pohybuje od 14 do 23 (čísla pro reálný oběh). Stav 2 musí odpovídat tlaku a teplotě samovznícení směsi vzduchu a paliva, které se do válce vstříkuje tryskou i_p na konci komprese vzduchu. Rychlost pohybu pístu k dolní úvrati musí být taková, aby spalování směsi probíhalo izobaricky až do stavu 3. Mezi stavy 3-4 probíhá izotropická expanze a píst se pohybuje k dolní úvrati. V dolní úvrati (stav 4) se otevře výfukový ventil a většina spalin je vyfouknuta přetlakem z válce do výfuku. Výfuk se děje izochoricky – píst se nepohybuje do chvíle, než tlak poklesne na tlak p_1 . Modře je vyznačen přibližný průběh reálného vznětového oběhu.

979 *T-s diagram vznětového oběhu a základní rovnice*



Při odvození základních rovnic ze vychází z rovnic Prvního zákona termodynamiky pro uzavřený systém, protože v ideální případě se termodynamické změny realizují v uzavřeném válci. Odvození rovnic energetické bilance vznětového oběhu je uvedeno v *Příloze 979, s. 25.*

Rozdíly oproti ideálu

I u vznětových motorů je pohyb pístu realizován klikovým mechanismem s plynulým otáčením, takže nelze realizovat izochorickou změnu 4-1, a ani další vratné změny.

Porovnání se zážehovým motorem

Vznětové motory vykazují větší tepelnou účinnost než motory zážehové, protože hoření směsi probíhá při vyšší teplotě. Naproti tomu důsledkem vyšší teploty hoření je vznik mnohem většího množství škodlivých sloučenin NO_x ⁷ a tuhých zbytků po hoření.

Dvoudobá varianta vznětového motoru

Existují i zjednodušené motory, u kterých je počet dob redukován na dvě, podle stejného principu jako je využíváno u zážehového motoru. Dvoutaktní motor je jednodušší, má větší výkon při stejných otáčkách, ale horší účinnost ve větší části provozních parametrů.

Nutnost zapálení směsi u paliv malých výhřevností

V případě chudé palivové směsi nebo paliva s vyššími teplotami vznícení se motory vybavují žhavicí svíčkou umístěnou těsně před vstřikem paliva do válce. V případě paliv s velmi nízkou výhřevností (například bioplyn³) je motor vybaven i zapalovací svíčkou.

Přepřňování spalovacích motorů

Cílem je zvýšit tlak vzduchu na sání pomocí dmyhadla

Spalovací motory bývají pro zvýšení výkonu vybavovány tzv. přepřňováním – zvýšení obsahu kyslíku a paliva ve válci zvýšením tlaku vzduchu na sání. K přepřňování se nejčastěji používá turbodmychadlo²³ poháněné výfukovými spalinami. Alternativou jsou dmyhadla poháněné přes mechanický převod hřídelem motoru nebo rezonanční sací potrubí aj. [2], [7, s. 134 až 141].

Lze stlačovat i palivovou směs

V případě kapalných paliv se komprimuje před válcem motoru pouze vzduch, ale u plyných paliv je nutné komprimovat už směs paliva a vzduchu (tzn. palivo a vzduch je nutné smíchat již před stlačením). Za přepřňovacím orgánem je obvykle ještě chlazení, aby se zvýšila hustota vzduchu. Toto chlazení je také nutné u paliv s nízkou teplotou vznícení, aby nedocházelo k samozápalu paliva.

Přepřňování snižuje opotřebenění motoru

Přepřňování pomocí turbodmyhadla nebo rezonancí zvyšuje nejen výkon ale i účinnost motoru tím, že s přepřňováním je dosaženo stejného kroutícího momentu na hřídeli při nižších otáčkách a tedy i ztráty třením²⁴ v ložiscích jsou menší. Navíc se za určitých podmínek zlepšují i spalování. Naopak při mechanickém pohonu dmyhadla účinnost motoru klesá [2, s. 82]. Výkony turbodmychadel odpovídají asi 5 až 15 % výkonu motoru.

Podmínky pro použití přepřňování

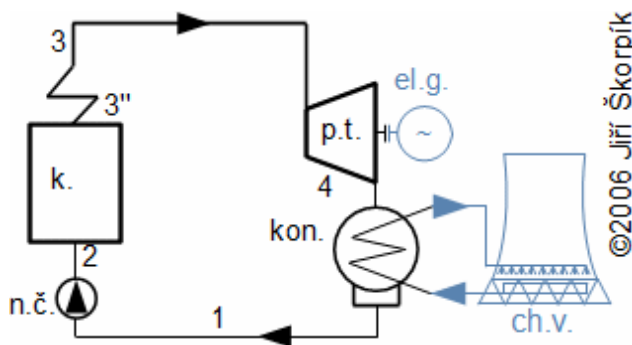
Přepřňování se používá především u vznětových motorů, u kterých nevedí větší tlak na vstupu. U zážehových oběhů má přepřňování smysl při použití paliv s vyšší zápalnou teplotou (např. letecký benzín) [2, s. 82], protože komprese palivové směsi musí končit před dosažením teploty samovznícení směsi nebo při nasávání vzduchu chudého na kyslík např. ve velkých výškách. Přepřňování lze ale také použít u zážehových motorů s malým kompresním poměrem válců, čímž zvýšíme jejich výkon bez nutnosti zvětšit jejich objem.

Rankine-Clausiusův oběh (parní oběh)

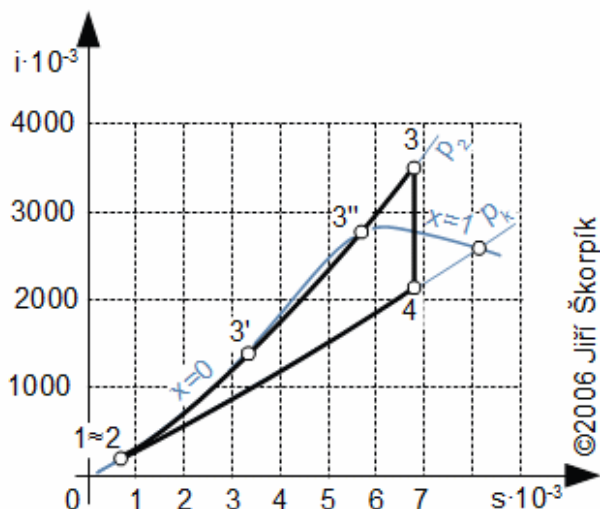
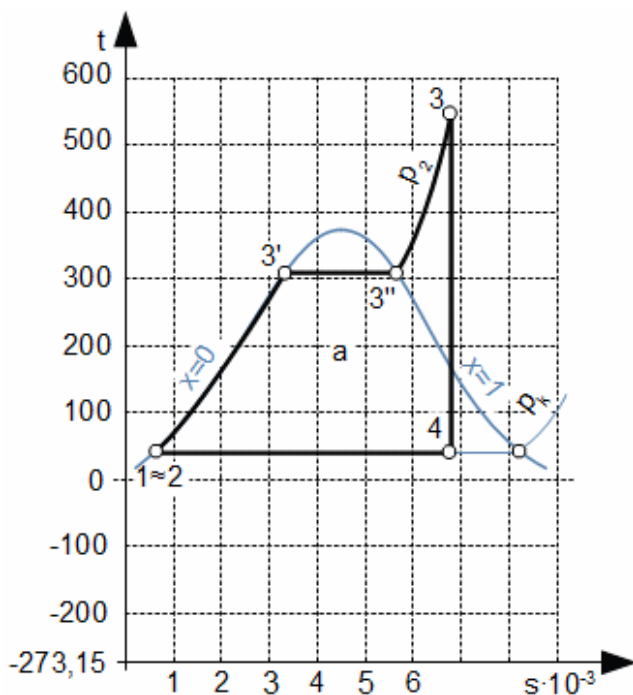
Parní oběh se realizuje v několika vzájemně propojených zařízeních

Jedná se o nejrozšířenější tepelný oběh v energetice. Parní oběh je zároveň nejdéle využívaný tepelný oběh. Pracovní látkou v tomto oběhu je voda, ale používají se i alternativní pracovní látky²⁵. Parní oběh se začal používat nejdříve pro transformaci tepla na práci pomocí pístových parních motorů¹, v současnosti je parní stroj nahrazen parními turbínami¹, ale princip oběhu to nemění, i když parní turbína je lopatkový stroj¹¹ a pístový parní motor je stroj objemový. Na rozdíl od oběhů spalovacích motorů se schéma parního oběhu skládá z několika vzájemně propojených zařízení, *Obrázek 621*, v T-s a i-s diagramech se zakreslují stavy pracovní látky na vstupech a výstupech zařízení (*Obrázek 55*).

621 Základní schéma zařízení pro realizaci parního oběhu



k. parní kotel¹ (parogenerátor⁹ v případě jaderných elektráren⁹; **p.t.** parní turbína popřípadě i jiný typ parního motoru; **el.g.** elektrický točivý generátor; **kon.** kondenzátor (uvnitř kondenzuje vodní pára); **ch.v.** chladicí věž pro chlazení vody zvyšováním relativní vlhkosti vzduchu⁴³; **n.č.** napájecí čerpadlo (zvyšuje tlak proudící vody do kotle).



55 Příklad parního oběhu v T-s a i-s diagramu vody a vodní páry

Stav páry v bodě 3 je 9,4 MPa, 550 °C, tlak kondenzace 9 kPa. **i** [J·kg⁻¹] měrná entalpie⁴³; **t** [°C] teplota; **x** [-] suchost páry (poměr hmotnosti páry ve vzorku k celkové hmotnosti vzorku).

Čerpání vody do vyššího tlaku

Na počátku transformace tepla na práci v parním oběhu se nejprve zvýší tlak vody pomocí čerpadla z nízkého tlaku p_1 na tlak p_2 . Na obrázku při tomto procesu projde voda úsekem 1-2.

Výroba páry v kotli

V parní kotli je nejdříve voda o tlaku p_2 ohřívána až na mez sytosti kapaliny (na obrázku projde úsekem 2-3'), a až v navazující části kotle dochází k varu vody na stav syté páry (úsek 3'-3''). Ve většině případů je vzniklá pára ještě tzv. přehřívána v části kotle zvané přehřívák (úsek 3'-3).

Expanze páry v turbíně

V parní turbíně probíhá v ideálním případě izoentropická expanze (úsek 3-4), při které se energie obsažená v páře transformuje na práci. Práce turbíny bývá nejčastěji využita k výrobě elektrické energie.

Kondenzace páry a kondenzátor

Na turbínu navazuje kondenzátor, ve kterém pára kondenzuje (z kondenzované voda se shromažďuje v nádrži s pojene s dnem kondenzátoru pro další využití), úsek 4-1. Tím je oběh uzavřen, protože voda se nachází opět ve stavu 1. Kondenzátor je nejčastěji nádoba protkána chladícím potrubím, na jehož povrchu pára kondenzuje. Chladící vodu lze ochlazovat např. v chladících věžích, ale existují i jiné konstrukční varianty kondenzátorů a způsobů jeho chlazení.

Výhody oběhu s vnějším přestupem tepla

Parní oběh je oběh s vnějším přestupem tepla, takže není odkázán jen na použití čistých fosilních paliv⁷, ale lze jako zdroj tepla použít i biomasu³, sluneční energii², jadernou energii² atd).

Schéma zařízení s parním oběhem bývá mnohem složitější

Reálné schéma zařízení pro realizaci parního oběhu nevypadá tak jednoduše jako na *Obrázku 621, s. 7*. Kvůli zvyšování výkonu a účinnosti se provádí regenerace tepla²⁵, pro výtopenké a jiné účely se odebírá v různých částech oběhu pára včetně odběrů páry v parní turbíně²³, viz také kapitola Úvod do parních turbín²³.

Výpočet parního oběhu

Teplo je pracovní látce dodáváno pouze v kotli, odváděno v kondenzátoru. Práce se koná v turbíně. Naopak napájecí čerpadlo práci spotřebovává a o tuto práci je výsledná práce oběhu menší. Odtud lze odvodit rovnice energetické bilance parního oběhu, *Rovnice 622*.

622 Rovnice energetická bilance parního oběhu

$$q_D = i_{3c} - i_{2c}; \quad q_{Od} = i_{1c} - i_{4c}; \quad a = (i_{3c} - i_{2c}) + (i_{1c} - i_{4c}); \quad \eta_t = 1 + \frac{i_{1c} - i_{4c}}{i_{3c} - i_{2c}}$$

$$a_T = i_{3c} - i_{4c}; \quad a_c = i_{1c} - i_{2c}$$

i_c [J·kg⁻¹] měrná celková entalpie; a_T [J·kg⁻¹] měrná vnitřní práce turbíny; a_c [J·kg⁻¹] měrná vnitřní práce čerpadla. Termodynamické změny oběhu probíhají v několika vzájemně propojených zařízeních, proto se provádí energetická bilance pro každé zvlášť pomocí rovnice Prvního zákona termodynamiky pro otevřený systém (viz kapitola Práce průtočných strojů a oběhy, ve kterých pracují⁴³). Rovnice jsou odvozeny při zanedbání změny potenciální energie pracovní látky v *Příloze 622, s. 19*.

623 Úloha

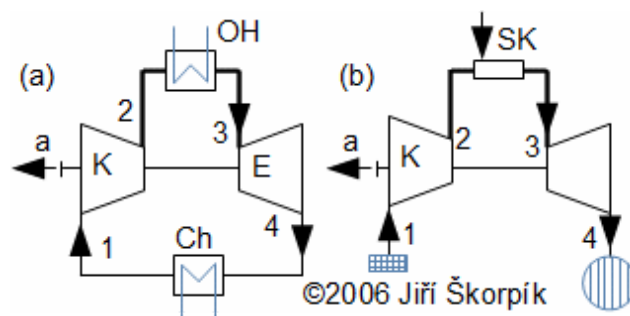
Vypočítejte měrnou práci turbíny, suchost páry na konci expanze v turbíně, teplotu vody v kondenzátoru, tepelnou účinnost parního oběhu a porovnejte práci napájecího čerpadla s prací turbíny pro následující parametry: teplota páry na výstupu z kotle 450 °C, tlak páry 3,5 MPa, tlak v kondenzátoru 3 kPa. Řešení úlohy je uvedeno v *Příloze 623, s. 21*.

Braytonův oběh (Jouleho oběh)

Soustrojí se spalovací komorou, turbokompresorem a turbínou – spalovací turbína

Původním myšlenkou George Braytona¹ bylo vylepšení spalovacích motorů rozdělením komprese a expanze do dvou vzájemně propojených pístových strojů, přičemž spalování hořlavé směsi by probíhalo před expanzním strojem ve speciální komoře. V současné době se místo pístových strojů používají lopatkové stroje tj. turbokompresor¹ a turbína, proto se také takovému soustrojí dnes říká spalovací turbína¹. Existují i verze soustrojí s vnějším přestupem tepla, kde místo spalovací komory je výměník tepla, ve kterém se ohřívá pracovní plyn, *Obrázek 624*.

624 Schéma zařízení Braytonova oběhu



(a) uzavřený oběh; **(b)** otevřený oběh (tzv. spalovací turbína a další otevřené aplikace). **K** kompresní část soustrojí; **OH** ohřívák pracovního plynu; **E** expanzní část soustrojí (turbína); **ch.** chladič; **SK** spalovací komora s přívodem paliva.

B. oběh je složen ze čtyř termodynamických změn

V jednotlivých částech soustrojí v ideálním případě probíhají následující termodynamické změny: **1.** izoentropická komprese; **2.** izobarický ohřev; **3.** izoentropická expanze; **4.** izobarické ochlazení. Všechny změny jsou zakresleny v T-s digramu Braytonova oběhu na *Obrázku 58, s. 10*, rovnice pro výpočet viz *Rovnice 59, s. 10*.

Komprese v kompresoru 1-2

1/4. Před kompresí se nachází pracovní plyn ve stavu *1*. V kompresní části probíhá izoentropická komprese pracovního plynu ze stavu *1* do stavu *2*. V případě otevřeného oběhu se jedná o nasávaný vzduch.

Ohřev ve spalovací komoře 2-3

2/4. Pracovní plyn o vysokém tlaku je za konstantního tlaku (izobaricky) ohříván z teploty T_2 na teplotu T_3 , buď v ohříváku *OH*, nebo spalovací komoře *SK* pomocí paliva – úsek 2-3.

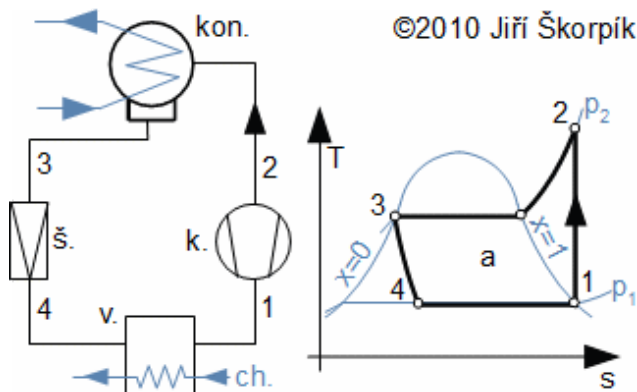
Expanze v turbíně 3-4

3/4. Pracovní plyn o vysoké teplotě a tlaku izoentropicky expanduje v expanzní části ze stavu *3* do stavu *4*, přitom pracovní plyn koná práci, která je odváděna ve formě otáčejícího se hřídele. Obvykle expanzní část přímo pohání přes společnou hřídel turbokompresor, který spotřebovává větší část práce turbíny. Zbytek práce může být využit například k pohonu el. generátoru, tato přebytečná práce je prací oběhu *a*.

Ochlazení 4-1 v atmosféře, nebo chladiči

4/4. V chladiči probíhá izobarické ochlazení pracovního plynu na teplotu T_1 a celý oběh se může opakovat. V případě otevřeného oběhu jsou výsledné spaliny vyfukovány přes výfuk do atmosféry.

628 Schéma zařízení chladicího oběhu a jeho T-s diagram



k kompresor; **š.** škrtící orgán; **v.** výparník (uvnitř dochází k odpařování pracovní látky); **ch.** ochlazovaná tekutina. Pracovní látkou nebývá voda (vysoká teplota tuhnutí), ale například směs par vody a čpavku, respektive roztok vody a čpavku. Vlastnosti takových směsí se blíží látce, která je v ní více zastoupena a naopak [1, s. 26], [4, s. 508]. V případě směsí se tedy tvar oběhu v T-s diagramu bude od uvedeného lišit (i schéma zařízení oběhu), ale základní princip zůstává stejný.

Oběh s kompresorem je složen se čtyř termodynamických změn

V jednotlivých zařízení chladicího oběhu s kompresorem v ideálním případě probíhají následující termodynamické změny: **1.** komprese; **2.** kondenzace; **3.** škrcení; **4.** var pracovní tekutiny při nízké teplotě.

Komprese v kompresoru 1-2

1/4. Na počátku oběhu disponuje sytou párou pracovní tekutiny o tlaku p_1 . Tato pára je stlačována v kompresoru izonetropicky na tlak p_2 do stavu 2, ve kterém má nejen vyšší tlak, ale i teplotu.

Kondenzace v kondenzátoru 2-3

2/4. Pára o vysokém tlaku p_2 je ochlazována v kondenzátoru, tak aby dosáhla stavu syté kapaliny.

Škrcení 3-4

3/4. Na výstupu z kondenzátoru je pracovní tekutina odvedena přes speciální škrtící³⁷ ventil do výparníku – během škrcení dojde k takovému snížení tlaku, že část tekutiny se odpaří už při škrcení.

Odpar 4-1

4/4. Ve výparníku je dodáváno pracovní látce teplo a ta se odpařuje na stav sytosti. Na výstupu z výparníku je tedy ve stavu 1.

Užití chladicího oběhu

Účelem takového oběhu je ochlazovat chladicí látku procházející výparníkem a ohřívat chladicí látku procházející kondenzátorem. Například u ledničky je chladicí látkou procházející výparníkem vzduch v ledničce a teplem z kondenzátoru je ohříván okolní vzduch ledničky.

Výpočet chladicího oběhu

Tento oběh práci nekoná, ale spotřebovává, jak plyne z Rovnic 629 popisující energetickou bilanci chladicího oběhu.

629 Rovnice energetické bilance chladicího oběhu

$$q_D = i_{1c} - i_{c4}; \quad q_{Od} = i_{3c} - i_{2c}; \quad a = i_{1c} - i_{2c} = a_k$$

$$\epsilon_R = \frac{q_{Od}}{a}$$

ϵ_R [-] chladicí faktor (slouží jako ukazatel efektivnosti chladicího oběhu, čím je vyšší, tím je práce efektivněji využita k převodu tepla z jedné teplotní hladiny na vyšší). Rovnice chladicího oběhu jsou odvozeny bez započítání vlivu gravitace v Příloze 629, s. 23.

Carnotizace porovnávacího tepelného oběhu – zvyšování tepelné účinnosti

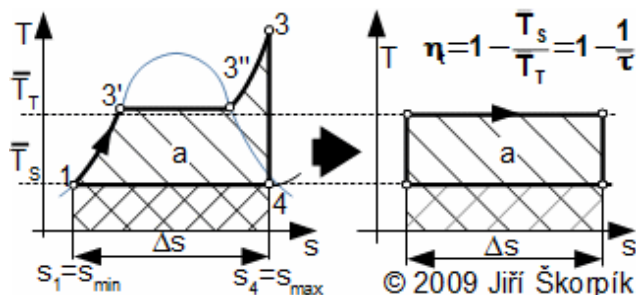
Optimalizovat tepelný oběh lze změnou jeho parametrů i způsobem realizace

Klíčové jsou střední teploty přívodu a odvodu tepla z oběhu a nikoliv jeho nejnižší a nejvyšší teplota

Tepelnou účinnost vyšetřovaného porovnávacího oběhu ovlivňují jeho konkrétní parametry v jeho různých částech (teploty, tlaky..., případně zapojení). Tyto parametry lze optimalizovat tak, aby pro danou aplikaci dosahoval oběh maximální možné tepelné účinnosti. Změny provedené u porovnávacího oběhu lze převést na reálný oběh a zvýšit i jeho tepelnou účinnost.

Podstatou, v této kapitole popsané metody zvyšování tepelné účinnosti, je znalost Carnotova oběhu⁴³, který dosahuje maximální tepelné účinnosti, jaká je fyzikálně možná pro danou střední teplotu přívodu i odvodu tepla oběhu definované v podkapitole Účinnost transformace energie⁴³. O těchto teplotách víme, že čím je jejich podíl větší, tím bude i tepelná účinnost největší a nikoliv poměr nejvyšší a nejnižší teploty oběhu. Cílem je tedy u vyšetřovaného tepelného oběhu nejprve definovat uvedené střední teploty (viz příklad parního oběhu na *Obrázku 125*) a následně podat návrhy jakými způsoby by tyto střední teploty by bylo možno zvýšit – o tom například kapitola Zvyšování účinnosti bloku a Carnotizace parního oběhu²⁵. Tento proces se nazývá Carnotizace.

125 Příklad určení střední teploty přívodu a odvodu tepla oběhu na parním oběhu



τ [-] teplotní poměr středních teplot; T_T^- , T_s^- [K] střední teplota přívodu, respektive odvodu tepla oběhu. Střední teplota přívodu tepla do oběhu je mezi teplotami T_2 a T_3 . Střední teplota odvodu tepla z oběhu je rovna kondenzační teplotě T_1 , protože teplo se odvádí z oběhu pouze při kondenzaci.

Tepelné stroje a podobné pojmy

Termín

Obecně můžeme za tepelný stroj považovat jakékoliv zařízení, ve kterém zpracováváme teplo. V užším smyslu se jedná o zařízení, ve kterém dochází k transformaci vnitřní tepelné energie⁴³ a tlakové energie⁴³ neboli entalpie pracovní látky na práci či naopak.

Tepelná elektrárna a její účinnost

Definice, typy tepelných elektráren

Obvykle se tak nazývá komplex budov a zařízení postavených za účelem výroby elektrické energie pomocí tepelného oběhu. U tepelných elektráren se používají často názvy podle druhu paliva nebo principu funkce, například uhelná elektrárna,

geotermální elektrárna⁸; jaderná elektrárna; solární elektrárna²... Tepelné elektrárny se budují v blízkosti zdroje paliva nebo z důvodů jiných provozních výhod – v blízkosti zdroje vody (řeka, nádrž), vedení VVN apod.

Účinnost transformace tepla na elektřinu

Účinnost transformace tepla na elektřinu v tepelné elektrárně se nazývá účinnost tepelné elektrárny (nebo také tepelná účinnost) a je definovaná jako poměr elektrického výkonu na prahu elektrárny ku disponibilnímu teplu v palivu dodané do elektrárny, viz *Vzorec 1091*.

1091 *Účinnost tepelné elektrárny*

$$\eta = \frac{P_E}{P_{pal}}$$

η [-] účinnost tepelné elektrárny; P_E [W] elektrický výkon elektrárny na prahu elektrárny; P_{pal} [W] dodávaný disponibilní výkon v palivu do elektrárny.

Teplárna – kombinovaná výroba tepla a elektřiny

Synonyma KVET i kogenerace

Obvykle se tak nazývá komplex budov a zařízení postavených za účelem výroby elektrické energie a tepla pomocí nějakého tepelného oběhu (takový proces se nazývá kombinovaná výroba elektřiny a tepla zkráceně KVET nebo kogenerace), proto se místo názvu teplárna je používán i název kogenerační zdroj či kogenerační jednotka.

Kde a proč stavět

Výkon teplárny s parní turbínou (viz podkapitola Schéma zařízení teplárny²⁵) obvykle odpovídá celkové spotřebě připojených spotřebičů tepla a páry. Teplárny se budují v blízkosti spotřebiče tepla či páry a někdy jsou přímo součástí průmyslového komplexu s velkou spotřebou tepla, páry nebo elektřiny.

Teplárnu, nebo elektrárnu?

V současné době se před budováním tepelných elektráren velmi zvažuje, zda by ji nebylo možné nahradit teplárnou. Při transformaci tepla na práci, respektive elektřiny se velká část tepla musí z oběhu odvést. Je přirozeně hospodárnější toto odvedené teplo také využít (pokud to dovolí okolnosti – blízkost teplovodu či parovodu..., které přivádí teplo ke spotřebiči tepla, který může být i několik desítek kilometrů vzdálený). Na druhou stranu teplárna je složitější, protože prioritním úkolem teplárny je dodávka tepla, jsou teplárny konstruovány tak, aby zajistily dodávku tepla i v případě výpadku technologie pro výrobu elektřiny. Navíc musí obsahovat technologie pro sdílení a rozvod tepla.

Účinnost výroby elektřiny versus účinnost teplárny

Teplárny mívají také menší tepelnou účinnost oběhu, protože teplota pracovních látek v teplovodech a parovodech musí být na určité výši (pro vytápění a výrobu teplé užitkové vody aspoň 80 °C až 90 °C, pro průmyslové účely i vyšší), což u některých typů tepelných oběhů znamená zvýšit střední teplotu odvodu tepla z oběhu a tedy i snížit tepelnou účinnost oběhu. Nicméně tím, že odvedené teplo z oběhu je využito, tak celkové využití energie v palivu, neboli účinnost teplárny, je výrazně větší než elektrárny se stejnou technologií výroby elektřiny, viz *Vzorec 479, s. 14*.

Teplárenský modul

Teplárny tedy produkují část energie ve formě elektřiny a část ve formě tepla podíl těchto dvou výkonů nazýváme teplárenským modulem (*Vzorec 479*). Teplárenský modul je především funkcí typu tepelného stroje, například teplárenský modul tepláren s parním oběhem bývá od 0,15 do 0,4, tepláren s Braytonovým oběhem od 0,4 do 0,7, tepláren se spalovacími motory vyšších výkonů od 0,6 do 0,8 a tepláren s paroplynovým oběhem²³ od 0,6 do 0,8 – teplárenské moduly dalších technologií jsou uvedeny v kapitole Kombinovaná výroba elektřiny a tepla v domácnostech¹⁰.

479 Účinnost teplárny a její teplárenský modul

$$\eta^{\text{tep}} = \frac{P_e + P_T}{P_{\text{pal}}}$$

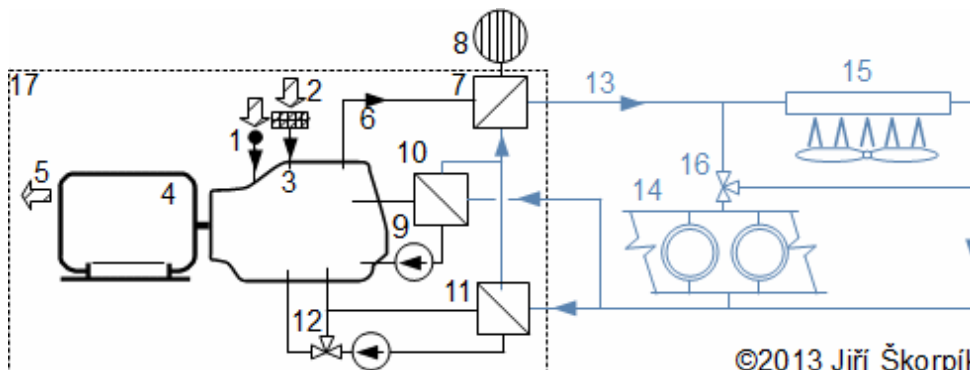
$$e = \frac{P_e}{P_T}$$

η^{tep} [-] celková účinnost využití tepla v palivu v teplárně; e [-] teplárenský modul teplárny. P_T [W] tepelný výkon teplárny na prahu teplárny (dodávané množství tepla do rozvodů tepla).

Rozdělení podle typu oběhu

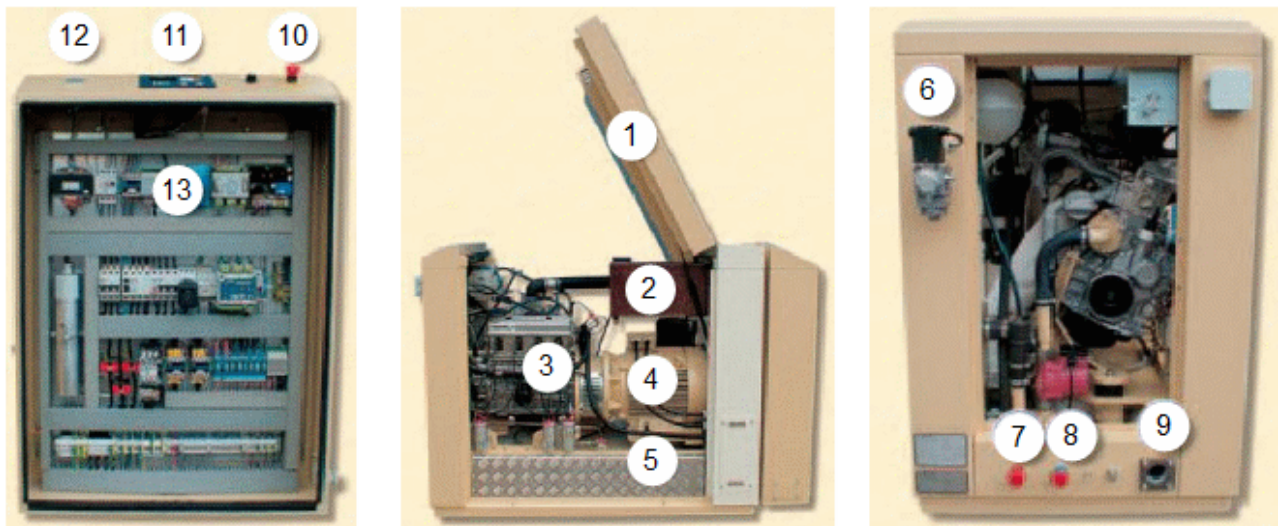
V České republice jsou běžné teplárny s parními turbínami, teplárny s paroplynovým oběhem²³ (společné využití parního a Braytonova oběhu) a teplárny se spalovacími motory (viz *Obrázek 208 a 209*).

208 Schéma zařízení kogenerační jednotky se spalovacím motorem



©2013 Jiří Škorpík

1 přívod paliva; 2 přívod spalovacího vzduchu přes filtr; 3 spalovací motor; 4 elektrický generátor; 5 odvod el. energie; 6 odvod horkých spalin z motoru; 7 tepelný výměník spaliny-voda (výměník může být nahrazen parogenerátorem na požadavek zákazníka); 8 komín; 9 okruh chladicí vody motoru s cirkulačním čerpadlem¹¹; 10 tepelný výměník chladící voda-voda; 11 tepelný výměník olej-voda; 12 regulace průtoku a teploty oleje; 13 vývod teplé vody z kogenerační jednotky; 14 spotřebiče teplé vody (například ústřední vytápění); 15 chladič (pro případ, že spotřebiče tepla 14 mají sníženou spotřebu nebo jsou mimo provoz); 16 regulace teploty a množství teplé vody ke spotřebičům; 17 hranice kogenerační jednotky.



209 Kogenerační jednotka se spalovacím motorem o výkonu 20 kW

1 víko protihlukového krytu; 2 nádrž na doplnění oleje; 3 spalovací motor; 4 generátor; 5 spalinový výměník a tlumiče hluku; 6 přívod plynu (paliva); 7 výstup topné vody; 8 vstup vratné vody; 9 výstup spalin; 10 hlavní vypínač; 11 řídicí systém; 12 počítadlo motohodin; 13 rozvaděč. Pohledy nejsou ve stejném měřítku. Zdroj [6]. Malé kogenerační jednotky se dodávají v kompaktním provedení (v kontejneru,), ale u větších výkonů je nutná stavba speciální strojovny a infrastruktury.

Odkazy

- [1] HOCH, Václav. *Chladicí technika*, 1992. Vydání první. Brno: VUT v Brně, ISBN 80-214-0412-4.
- [2] KOŽOUŠEK, Josef. *Výpočet a konstrukce spalovacích motorů I*, 1978. Vydání první. Praha: SNTL, 368 stran, 333 obrázků, 12 tabulek.
- [3] HLOUŠEK, Jiří. *Termomechanika*, 1992. 1. vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, ISBN 80-214-0387-X.
- [4] SHAVIT, Arthur, GUTFINGER, Chaim. *Thermodynamics from concepts to applications*, 2009. Second edition. New York: CRC Press, Taylor&Francis Group, ISBN 978-1-4200-7368-3.
- [5] ZLATAREVA, Veneta. *Tepelná čerpadla*, 2001. Praha: ČEA-česká energetická agentura, [on-line]. Dostupné dostupné z <http://www.mpo-efekt.cz/cz/ekis/publikace/953>, [cit. 2012].
- [6] *Tedom, a.s.*, výroba kogeneračních jednotek a spalovacích motorů. Adresa: Hrotovická – průmyslová zóna 160, 674 01 Třebíč, web: <http://tedom.com>. [cit. 2013-08]
- [7] JAN, Zdeněk, ŽDÁNSKÝ, Bronislav. *Automobily-Motory*, 2010. 6. vydání. Brno: Avid, spol. s.r.o., ISBN 978-80-87143-15-5.
- [8] RAŽNJEVIĆ, Kuzman. *Termodynamické tabulky*, 1984. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 2 sv. Edícia energetickej literatúry (Alfa).
- [9] ŠIFNER, Oldřich, KLOFMAR, Jaroslav. *Mezinárodní standardy termofyzikálních vlastností vody a vodní páry*. Zkrácené parní tabulky do 1000 °C a 1000 MPa, 1996. Vydání 1. Praha: Academia, ISBN 80-200-0596-X.

Bibliografická citace článku

ŠKORPÍK, Jiří. Tepelné oběhy a jejich realizace, *Transformační technologie*, 2006-11, [last updated 2020-11-05]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <https://www.transformacni-technologie.cz/06.html>. English version: Heat cycles and their realizations. Web: https://www.transformacni-technologie.cz/en_06.html.