



Jasoň Hampel¹

LOKOMOTIVA NA DŘEVOPLYN

Klíčová slova: generátor dřevoplynu, plynová turbína, plynový motor, parní turbína

Úvod

Není pochyb, že elektrifikace železnic byla významným přínosem pro životní prostředí. Ale ne všechny tratě je možné nebo účelné elektrifikovat². Na neelektrifikovaných tratích se používají k pohonu železničních vozidel téměř výhradně vznětové motory, které jsou sice ekologičtější než někdejší parní stroje, ale bezexhalační rozhodně nejsou. I když u nich bude minimalizována emise tuhých částic i oxidů dusíku a síry, budou životní prostředí narušovat. Nejenže zvyšují obsah CO₂ v atmosféře³, ale participují na čerpání omezených světových zásob ropy, jejíž cena samozřejmě roste a bude dále růst.

Bionafta to příliš nezlepší. Oxid uhličitý vznikající spálením bionafty je sice absorbován při růstu řepky olejné -suroviny k její výrobě, ale další oxid uhličitý je emitován při výrobních procesech a s nimi související dopravě, a ten takto kompenzován z větší části není. Příznivější po této stránce je výroba plynu z biomasy, zejména ze dřeva (jeho hořením za omezeného přístupu vzduchu).

Pohon takto vznikajícím plynem však nepřichází v úvahu u silničních vozidel z důvodů prostorových, hmotnostních i manipulačních⁴. Také se příliš nehodí pro velké energetické centrály, neboť jejich zdrojová oblast by byla příliš rozsáhlá s důsledkem vyšších dopravních nákladů.

Zajímavou aplikační možností je naproti tomu železnice. Lokomotivám tolik nevadí větší rozměry ani hmotnost příslušných zařízení, ta je využita adhezně. K liniově situovaným zásobníkům paliva dojedou v rámci normální jízdy a manipulaci s pevným palivem lze zmechanizovat nebo dokonce zautomatizovat.

Že pevné palivo nepředstavuje pro železnici zásadní problém, to dokládá použití parních lokomotiv v minulosti, kdy bylo navíc nutno zásobovat lokomotivy vodou a odstraňovat dost velké množství popela. Parní lokomotivy bylo také nutno před nasažením dost dlouho roztáčet, což bude u dřevoplynové lokomotivy minimalizováno (na 3 – 5 minut). Na rozdíl od uhlí nevytvářejí dřevěné špalíky mou a při sypání nepráší. Popele ze dřeva je málo a je využitelný jako hnojivo.

¹ Ing. Jasoň Hampel (nar. 1931) vystudoval Strojní fakultu ČVUT v Praze, specializace Motorová vozidla a spalovací motory. Pracuje v a.s. DEKRA Automobil Praha jako specialista ve zkušebně pasivní bezpečnosti.

² Např. v USA elektrifikace připadá jen těžko v úvahu na tratích s tunely kvůli zavedenému provozu nákladních vlaků převážejících kontejnery ve dvou vrstvách.

³ Jak známo, jde o jeden ze „skleníkových“ plynů důvodně podezřelých z globálního oteplování a jeho nepříznivých důsledků. Podle principu předběžné opatrnosti se zástupci členských států OSN dohodli na snížení emisí skleníkových plynů o 5,2 % v pětiletém období 2008-2012 (Kjótský protokol byl podepsán v r. 1997. V Evropské unii se do roku 2020 má podíl biopaliv na celkové spotřebě pohonných hmot zvýšit na 10 procent, tedy skoro na dvojnásobek hodnot z roku 2010 (5,75 %).

⁴ Samozřejmě je to realizovatelné v nouzi, jak tomu bylo za druhé světové války v Německu a v zemích jím okupovaných.

1 Biomasa a její energetické využití

Biomasa je souhrn substancí tvořících těla všech organismů, jak rostlin, bakterií, sinic a hub, tak i živočichů. Pro energetické využití přichází v úvahu mrtvá biomasa, zejména rostlinného původu. Možností je několik, viz následující tabulku 1.

Tab. 1: Energetické využití biomasy

Charakter přeměn	Technologie	Produkty	Energetické výstupy
Oxidace úplná	Spalování v ohništi	Nehořlavé horké spaliny	Teplo (i pro Rankinův cyklus)
Oxidace nedokonalá	Hoření v generátoru	CO, H ₂ , CH ₄ aj. (dřevoplyn)	Pohon spalovacích motorů u vozidel či energetických centrál, vytápění objektů
Chemické procesy vysokoteplotní	Suchá destilace Rychlá pyrolýza	generátorový plyn, dehet, oleje, čpavek, metanol	
Chemické procesy ve vodním prostředí	Esterifikace	Bionafta (metylester řepkového oleje)	Palivo vznětových motorů (zejména pro pohon vozidel)
Biologické procesy	Anaerobní vyhnívání	Bioplyn (hlavně CH ₄ – metan)	Palivo plynových motorů, teplo pro vytápění objektů
	Alkoholové kvašení	Etanol	Palivo zážehových motorů
	Kompostování	Hnojivo	Teplo (chlazením kompostu)

Zdroj: autor

1.1 Biopaliva

Jak je zřejmé z tabulky, představuje jedno z možných využití biomasy její spalování, jde tedy o biopalivo. Z hlediska životního prostředí je podstatné, že biopalivo je obnovitelným zdrojem energie, kterou rostliny čerpají ze slunečního záření a pak ji v chemické formě akumulují. Přitom odebírají ze vzduchu oxid uhličitý. Při hoření biopaliva se stejné množství tohoto plynu do atmosféry vrací, takže ten nepřispívá k růstu koncentrací skleníkových plynů - na rozdíl od CO₂ vzniklého hořením paliv fosilních.

Další výhody biopaliv:

- jde o regionální obnovitelný zdroj;
- v řadě případů jsou odpadním materiálem;
- využívání rozptýlených zdrojů biopaliv podporuje zaměstnanost na venkově (zejména méně kvalifikovaných pracovních sil, pro které zajistit práci je čím dál tím obtížnější);
- totéž se týká úpravy biopaliv (peletování, štěpkování) pro automatizované kotle;
- dočasnou výhodou jsou i dotace náhrady fosilních paliv biopalivy.

Biopaliva pokrývají 15 % celkové světové spotřeby energie, především v rozvojových zemích, kde slouží převážně k vaření a vytápění domácností, ale relativně vysoký podíl zaujímají biopaliva mezi energetickými zdroji i ve Švédsku a Finsku (17 % a 19 %).

1.1.1 Kapalná biopaliva

Jejich používání je motivováno snahou o ekologickou náhradu motorových paliv vyráběných z ropy. Pro zážehové motory se používají:

- **Bioetanol** C₂H₅OH. Jeho kvalita musí vyhovovat platné legislativě a technické normě (EN 15376, ČSN 65 6511). Na rozdíl od synteticky vyráběného etylalkoholu (katalytickou hydratací etylenu) jde o kvasný líh, vyrobený ze surovin rostlinného původu⁵ nebo z biologicky odbouratelného podílu odpadu. Je obsažen v palivu pro

⁵Při výrobě etanolu kvašením vzniká však oxid uhličitý - skleníkový plyn (C₆H₁₂O₆ → 2 C₂H₅OH + 2 CO₂). Původními surovinami jsou nejčastěji cukrová třtina (Brasílie), kukuřice, brambory a cukrová řepa. Evropská

zážehové motory **E85** (až 85 %, ale motory vykazují vysokou spotřebu vinou mnohem nižší výhřevnosti lihu, než jakou se vyznačuje benzín). Dalším palivem na bázi bioetanolu je **Bio-ETBE** (etyltributyleter).

- **Biometanol** CH_3OH , jinak také dřevný líh. Je velmi jedovatý stejně jako synteticky vyráběný metylalkohol (katalytickou hydrogenací oxidu uhelnatého). Díky vysokému oktánovému číslu byl používán pro závodní motory. Na bázi biometanolu se vyrábějí další kapalná paliva: **Bio-MTBE** (metyltributyleter) a **abiodimetyler**.

Pro vznětové motory se používá:

- **E95**- palivo pro vznětové motory obsahující až 95 objemových procent bionafty.
- **Bionafta**- metylester rostlinného nebo živočišného oleje (mastných kyselin), u nás je používán řepkový olej. Vzniká jeho reesterifikací metanolem. Odpovídá normě EN 14214. V zahraničí se pro bionaftu používá zkratka FAME, která pochází z anglického „Fatty acid methylesters“ – metylestery mastných kyselin.

Poznámka 1:

Průmyslová výroba bionafty vyžaduje energii a nemalé množství vody, není tedy ekologicky neutrální. Přechod na používání bionafty není bezproblémový ani pro palivové soustavy vznětových motorů. Bionafta je totiž silnějším rozpouštědlem než klasická motorová nafta, takže rozrušuje usazeniny v palivovém potrubí, které pak mohou působit potíže. Při kontaktu s vodou vznikají z bionafty mastné kyseliny, které působí na palivový systém korozivně. Liberální ekonomové jsou proti bionaftě, neboť vládní subvence pro pěstování řepky olejně deformují tržní prostředí.

1.1.2 Pevná biopaliva

Energeticky i cenově nejvýhodnější je jejich přímé spalování. To se u dopravních prostředků využívalo v éře parních strojů. Dnes je preferováno použití pevných biopaliv na výrobu paliv kapalných, pro dopravní prostředky vhodnějších díky snadnější manipulaci i skladování a menším přepravním nákladům.

V případě lokomotiv je však hmotnostně i prostorově přijatelné, aby si vezly s sebou zásobu pevných biopaliva vyráběly z nich plyn pro pohon. Je to efektivnější a levnější než transformace na kapalná paliva. Relevantní informace o tuhých biopalivech obsahuje tabulka 3 na následující stránce.

Dřevo jako biopalivo

Dřevo se stejně jako ostatní biopaliva nepodílí na vytváření skleníkového efektu. Při spálení jedné tuny dřevní hmoty se spotřebuje 1,2 tuny kyslíku a vyprodukuje 1,6 tuny oxidu uhličitého. Pro vzrůst jedné tuny dřevní hmoty se spotřebuje rovněž 1,6 tuny oxidu uhličitého. Při spalování dřeva vzniká méně plyných škodlivin než u klasických paliv:

Tab.2: Produkce SO_2 a NO_x [kg/GJ] při hoření nejrozšířenějších paliv

Palivo →		Hnědé uhlí	Černé uhlí	Zemní plyn	Dřevo
plynné → škodliviny	oxid siřičitý	1.0	0.4	0.0	0.0
	oxidy dusíku	0.219	0.25	0.1	0.027

Zdroj: <http://www.fao.org/docrep/t0512e/t0512e00.htm>

podpora produkce kapalných biopaliv byla kritizována Organizací pro hospodářskou spolupráci a rozvoj (OECD), zejména proto, že vede ke značnému růstu cen potravin. Při použití pouhých 10% světové sklizně cukru k výrobě etanolu by se údajně ceny cukru téměř zdvojnásobily. Kukuřičí něco podobného již potkalo v průběhu posledních let. S tím spojený růst cen základních potravin přispěl k potravinové krizi v rozvojových zemích.

Tab. 3: Vlastnosti pevných biopaliv z hlediska energetického využití

Druh biopaliva	Obsah vody %	Výhřevnost		volně ložené kg/m ³	Cena Kč/tunu	Poznámka
		MJ/kg	kWh/kg			
Měkké dřevo: polena nebo dřevní odpad	0	18,6	5,16	355		v syrovém stavu má vlhkost 50 %; v našich klimatických podmínkách vyschne pod střechou za rok na 20 % vlhkosti
	10	16,4	4,55	375		
	20	14,3	3,97	400		
	30	12,2	3,38	425	550	
	40	10,1	2,8	450		
	50	8,1	2,25	530		
Štěpka z měkkého dřeva	10	16,4	4,55	170		
	20	14,3	3,97	190		
	30	12,2	3,38	210	1000	
	40	10,1	2,8	225		
Štěpka z japon. topolů ⁶	20	18	5		2900 (i s DPH)	l na pelety, brikety
Brikety, pelety		16,2	4,5	400 - 650	2500 - 4500	i ze slámy a sena
Sláma obilovin	10	15,5	4,3		1000 - 1200	
Sláma kukuřice	10	14,4	4,0			
Lněné stonky	10	16,9	4,69			
Sláma řepky	10	16	4,44			

Zdroj: Ing. Koňas, Ph.D., Ústav nauky o dřevě, MZLU Brno

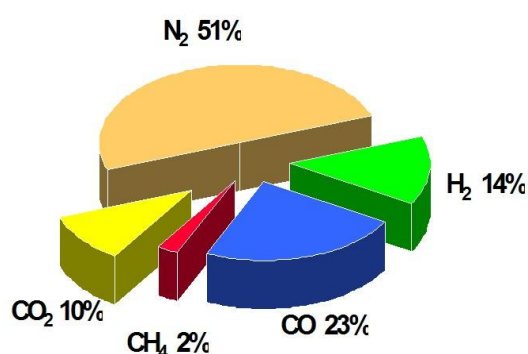
1.1.3 Plynná biopaliva

Mezi ně patří bioplyn, kalový plyn, skládkový plyn a dřevoplyn. Bioplyn vzniká mikrobiální fermentací z biomasy. Obsahuje hlavně CH₄. Podobné složení mají kalový a skládkový plyn. Při jejich čištění je odstraňován nehořlavý CO₂ a páchnoucí H₂S.

Dřevoplyn vzniká hořením dřeva za omezeného přístupu vzduchu. Zdrojem pro výrobu dřevoplynu mohou být odpady z lesního hospodářství a z dřevařského, celulózopapírenského, a nábytkářského průmyslu, a také rychle rostoucí dřeviny, zejména japonský topol.

Dřevoplyn obsahuje cca 40 % hořlavých plynů (hlavně vodík, oxid uhelnatý, metan, viz obr. 1 a tab. 4).

Obr. 1: Typické složení dřevoplynu

Tab. 4: Rozsah zastoupení jednotlivých složek v dřevoplynu (N₂, CO₂ a H₂O jsou nehořlavé)

složka	objemové %
oxid uhelnatý	16 – 28
vodík	9 – 18
metan	1 – 3
vyšší uhlovodíky	0,3 - 1
oxid uhličitý	7 - 11
dusík	41 - 54
vodní pára	1 - 10

Zdroj dat: <http://www.fao.org/docrep/t0512e/t0512e00.htm>

⁶ Cyklus sklizně japonského topolu je 2-4 roky podle možností pěstitele. Na vhodné lokalitě lze za uvedené období dosáhnout hektarového výnosu 60 - 100 tun surové štěpky (vlhkost 55%). Pomyslný ekvivalent trvalého výkonu plantáže s japonskými topoly je 5 kW/ha (předpokládá se výhřevnost štěpky o 30 % vlhkosti 12,5 MJ/kg). Průměrný výkon solárních článků umístěných na hektarovém pozemku je sice vyšší, ale chybí jim akumulací schopnost biopaliv.

Zápalná teplota dřevoplynu je cca 700 °C. Jeho hustota při 20°C je 1,14 kg/m³ (žádná z jeho složek není těžší než vzduch s výjimkou občas přítomného malého množství nehořlavého CO₂). Hlavní nehořlavou plynnou složkou je však dusík, kterého je v dřevoplynu plná polovina. Má-li být dřevoplyn použit jako palivo pro pístový spalovací motor, je třeba z něj odstranit vodní páru, popel, dehet a organické kyseliny. Přínos hořlavých složek v dřevoplynu shrnuje tabulka 5 (spalné teplo zahrnuje na rozdíl od výhřevnosti i kondenzační teplo vodní páry, která vznikla hořením)

Tab. 5: Hořlavé složky dřevoplynu a jejich vlastnosti

	Spalné teplo			Výhřevnost			Vzduch pro hoření ($\lambda=1$)	Teplota vznícení	Výbušnost ve vzduchu
	kJ/mol	MJ/m ³	MJ/kg	MJ/kg	MJ/m ³	kJ/mol			
H ₂	285,1	12,76	141,9	120,1	10,8	241,3	2,39 m ³ /m ³	585 °C	4,0 – 74 %
CH ₄	886,6	39,82	55,31	50,1	35,88	801,5	9,56m ³ /m ³	537 °C	4,4 – 17%
CO	283,66	12,66	10,13	10,13	12,66	283,66	2,39 m ³ /m ³	609 °C	?

Zdroj dat: <http://www.fao.org/docrep/t0512e/t0512e00.htm>

Výhřevnost dřevoplynu je dost nízká v důsledku již zmíněného velkého obsahu dusíku pocházejícího ze vzduchu přiváděného do dřevoplynového generátoru (vzduch jak známo obsahuje 78 %; kyslíku je 21 %).

Z dřeva přirozeně vyschlého (rok pod střechou), které má vlhkost cca 20 %, vzniká dřevoplyn o výhřevnosti 4,1 – 5,9 MJ/kg (4,7 – 6,8 MJ/m³). Výhřevnost dřevoplynu z uměle dosušeného dřeva může dosáhnout 7,4 MJ/kg (8,5 MJ/m³). Pokud by plyn vznikl suchou destilací za vnějšího přívodu tepla (jako při výrobě svítiplynu), dosáhla by jeho výhřevnost až cca 10,5 MJ/kg (12 MJ/m³). Pro srovnání: benzín má výhřevnost 46,4 MJ/kg.

Po zkondenzování vodní páry dosáhne stechiometrická směs dřevoplynu se vzduchem výhřevnosti cca 2,5 MJ/m³, což je asi tři čtvrtiny výhřevnosti stechiometrické směsi zemního plynu se vzduchem (3,4 MJ/m³). Rozptyl je způsoben různým zastoupením hořlavých složek. Pro výpočet lze podle zdroje (1) použít vztah:

$$H_{ig} = (12680 V_{CO} + 10800 V_{H_2} + 35900 V_{CH_4}) / (1 + 2,38 V_{CO} + 238 V_{H_2} + 9,52 V_{CH_4}) \quad [1]$$

kde značí:

H_{ig}výhřevnost stechiometrické směsi dřevoplynu se vzduchem[kJ/m³]

V_{CO} objemový podíl oxidu uhelnatého v dřevoplynu

V_{H_2} objemový podíl vodíku v dřevoplynu

V_{CH_4} ... objemový podíl metanu v dřevoplynu

Na rozdíl od zemního plynu je dřevoplyn jedovatý. Může za to v něm vždy přítomný oxid uhelnatý. Ten má asi 200krát větší afinitu k hemoglobinu než kyslík, takže blokuje transport kyslíku krví. CO je sice o 3,5 % lehčí než vzduch, takže uniká vzhůru, ale v nedostatečně větraném prostoru by mohl způsobit otravu. Následky jsou závislé na jeho koncentraci ve vzduchu, jak uvádí tabulka 6 na následující straně.

Při těžších otravách oxidem uhelnatým je nutno dostatečně dlouho vdechovat čistý kyslík, nejlépe v hyperbarické komoře, v krajním případě provést transfuzi. Švédské výzkumy na druhé straně naznačují, že dlouhodobé vdechování malých koncentrací oxidu uhelnatého nevede ke chronickým symptomům. Např. kuřákům dvaceti cigaret za den kolísá obsah karboxyhemoglobinu v krevním barvivo mezi 4 – 7 %, přičemž jejich zdravotní problémy vznikají spíše z dehtu obsaženého v tabákovém kouři než z oxidu uhelnatého.

Tab. 6: Toxické účinky oxidu uhelnatého v dřevoplynu

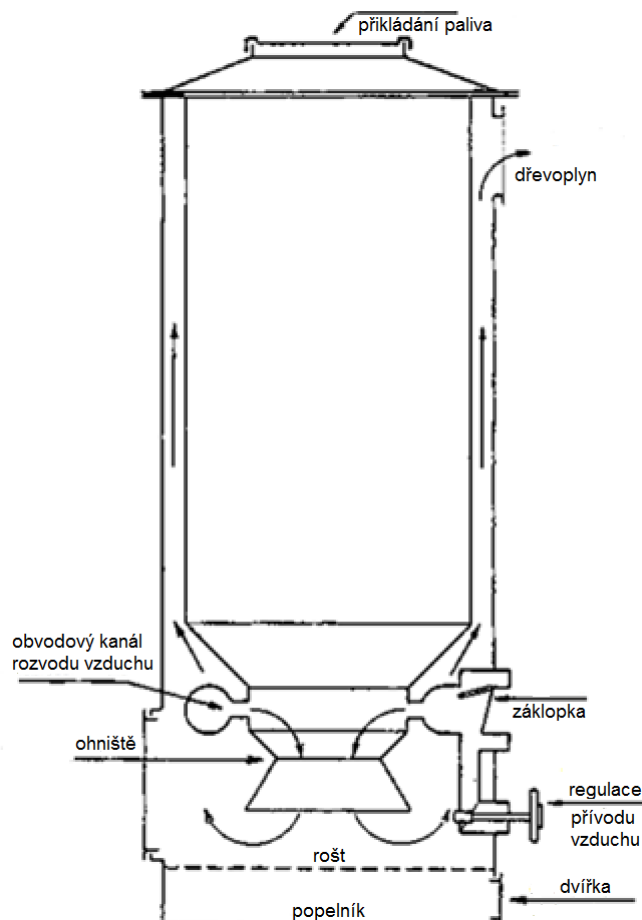
CO	Dřevoplyn	Toxické působení při uvedeném objemovém množství ve vzduchu
0,005 %	0,025 %	žádné zaznamatelné účinky
0,01 %	0,05 %	lehká bolest hlavy (čela) po 2 – 3 hodinách vdechování
0,02 %	0,1 %	bolest hlavy po 1,5 – 2,5 hodinách vdechování
0,04 %	0,2 %	po 1 – 2 hod bolest hlavy v týlu, po 2,5 – 3,5 h nauzea
0,08 %	0,4 %	bolest hlavy, nauzea a závrať po 45 min, kolaps a bezvědomí po 2 h (cca 20 % karboxyhemoglobinu v krevním barvivo)
0,16 %	0,8 %	bolest hlavy, nauzea, závrať po 20 min, kolaps, bezvědomí případně smrt po 2 h
0,32 %	1,6 %	bolest hlavy, závrať po 5 – 10 min, bezvědomí a riziko smrti po 30 min
0,64 %	3,2 %	bolest hlavy, závrať po 1 – 2 min, bezvědomí a riziko smrti po 10 – 15 min
1,28 %	6,4 %	okamžitý účinek, bezvědomí a riziko smrti po 1 – 3 min

Zdroj dat: <http://www.fao.org/docrep/t0512e/t0512e00.htm>

2. Dřevoplynové generátory

Na následujícím obrázku 2 je generátor IMBERT, hojně užívaný u nákladních automobilů a autobusů za druhé světové války. Je tzv. souproudeho typu (spalovací vzduch proudí shora dolů, stejně tak jako palivo). Vůči protiproudeho má zejména výhodu menšího obsahu dehtu v plynu. V generátoru roste směrem dolů teplota, takže klesající palivo postupně prochází navzájem odlišnými zónami:

Obr. 2: Dřevoplynový generátor IMBERT



Zdroj: lit. (1)

a) Horní zóna dosoušeného zásobního paliva.

Vodní pára vzniklá vysoušením dřeva proudí dolů, kde se připojuje k vodní páře vzniklé oxidací. (V redukční zóně se pak z části páry uvolní reakcí se žhnoucím dřevěným uhlím vodík; zbytek páry v dřevoplynu zůstane a vytváří jeho vlhkost, kterou je potřeba před vstupem do motoru zkondenzovat.)

b) Zóna pyrolýzy (pod dosoušecí vrstvou)

Tepelný rozklad paliva začíná při teplotách nad cca 250 °C. Velké molekuly celulózy (té je 50 %), hemicelulózy (25 %) a ligninu (25 %) se rozpadají na molekuly menší a současně vzniká dřevěné uhlí. Jak pyrolyzované složky klesají v generátoru dolů do oblasti vyšších teplot, rozklad pokračuje a vznikají látky s ještě menšími molekulami (vodík, metan, oxid uhelnatý, etan, etylén atd.) Jejich část pak v oxidační zóně shoří spolu se vzniklým dřevěným uhlím, část se stane součástí výstupního dřevoplynu.

Pokud však v dolní části pyrolyzované vrstvy není teplota dostatečně vysoká, nebo je-li čas pro rozpad na zplodiny s malými molekulami příliš krátký, dostanou se páry sloučenin se středně velkými molekulami do výstupního dřevoplynu a tvoří pak na chladnějších částech systému dehtovité a olejovité usazeniny.

Zóna oxidace

Ta začíná v místě, kde je do generátoru přiváděn spalovací vzduch, a pokračuje směrem dolů. Teplota tam vzrůstá na 1200 – 1500°C. Zde by měly shořet pokud možno všechny kondenzovatelné produkty pyrolýzy (dehty a olejovité sloučeniny). Je kvůli tomu potřeba optimalizovat tvar oxidační zóny i rychlost a teplotu spalovacího vzduchu.

Průnik spalovacího vzduchu palivem nesmí být totiž příliš dlouhý (nezbývalo by dost kyslíku k hoření vzdálenějšího paliva). K tomu vedlo zmenšení průřezu generátoru v oblasti přívodu vzduchu (vytvoření „hrdla“) a rozmístění vzduchových trysek po celém obvodu. To u velkých generátorů nestačí (pro motory nad cca 350 kW); je proto nutno přivádět vzduch dalšími výdechy dovnitř oxidační zóny. K tomu nejlépe poslouží trubky vedené roštem vzhůru a opatřené kónickými stříškami proti průniku kousků paliva („hrdlo“ pak není nutné).

V oxidační vrstvě generátoru převažuje dokonalý typ hoření:

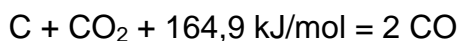


Vyskytuje se však i nedokonalé hoření:



d) Zóna redukce (vrstva dole na roštu)

V redukční zóně se spaliny za poklesu teploty obohacují o hořlavé plyny oxid uhelnatý a vodík na úkor oxidu uhličitého a vodní páry. Žhnoucí dřevěné uhlí v ní reaguje s vodní parou na oxid uhelnatý a vodík a s oxidem uhličitým na oxid uhelnatý. Oxid uhličitý reaguje též se vzniklým vodíkem na oxid uhelnatý a vodní páru. Teplota v této zóně klesá (na cca 950°C), neboť převažují zmíněné reakce endotermické, viz následující rovnice:



Vyskytuje se tam však i reakce exotermická: $CO + 3 H_2 = CH_4 + H_2O + 205,9 \text{ kJ/mol}$

a tepelně neutrální reakce $C + 2H_2 = CH_4$

Z kilogramu suchého dřeva se vyrobí asi 2,5 m³ dřevoplynu. Výstupní teplota dřevoplynu z přetlakového generátoru nebude patrně překračovat 1000 °C (u atmosférického generátoru je to výše uvedených 950 °C). Generátor začne dodávat hořlavý plyn po 3 – 5 minutách od podpalu.

Roštem pod redukční zónou propadáva popel a občas je vhodné tomu napomoci pohybem roštu, aby se zabránilo vzniku ztíženého odchodu dřevoplynu z generátoru. Tvorba strusky nehrozí. Ta se vyskytuje u paliv s obsahem popela nad 5 – 6 %, kdežto dřevo zanechává jen 0,75 – 2,5 % popela (ten je využitelný jako hnojivo).

Proudění pod velkoplošným roštem v popelníku je relativně pomalé, takže nestrhne s sebou větší částice popele. Ty se budou hromadit v popelníku a budou automaticky vysypávány do příslušného kontejneru při zavážení generátoru palivem. Množství plynem unášeného popele je cca 0,5 až 5 g/m³ (zjištěno u generátorů IMBERT). Jeho složení je strukturováno v tabulce 7 na následující straně.

Tab. 7: Velikostní zastoupení částic popele v dřevoplynu po výstupu z generátoru:

Velikost částic [μm]	přes 1000	1000 - 250	250 - 102	102 – 75	75 - 60	pod 60	neidentifikováno
Zastoupení [%]	1,7	24,7	23,7	7,1	8,3	30,3	4,2

Zdroj dat: <http://www.fao.org/docrep/t0512e/t0512e00.htm>

Popel je separován odstředivou silou v cyklonovém odlučovači, který jej zachytí 60 – 70 %. Jemnější popel je zachycen v elektrostatickém odlučovači s účinností cca 96 %. Zbytek (6 – 80 mg/m³) by dokázal prakticky odstranit textilní filtr, ale klasické textilie nesnášejí vysoké teploty.

Při nízkých teplotách by naopak kondenzovaly na filtru páry a vznikal by maz, který textilní filtry ucpává a navíc se obtížně odstraňuje. Řešení nabízí skleněná tkanina, která dobře snáší i teplotu 300 °C. To vyhovuje při použití pístového motoru, pro nějž se plyn za tímto filtrem ještě před vstupem do motoru dále ochlazuje. Opotřebením motoru je pak srovnatelné s použitím obvyklých kapalných paliv. Čištění zanešeného textilního filtru lze zajistit profukováním stlačeným vzduchem v obráceném směru. Potřebný interval je 150 – 200 h provozu, což je snesitelné, ale dokonalejší by bylo tento proces automatizovat. Pro neochlazený plyn z generátoru, který by mohl pohánět primární turbínu, není bohužel použitelný ani filtr se skleněnou tkaninou.

Velmi problematickou nečistotou dřevoplynu je dehet. Způsobuje obtížně odstranitelné usazeniny, narušující řádnou funkci pohonu. U generátorů IMBERT pro automobily kondenzovaly jeho páry spolu s vodní parou v chladiči plynu a pod ním. Nevzhledný a páchnoucí kondenzát byl tehdy běžně vypouštěn na silnici. To je samozřejmě ekologicky neúnosné. Pokud tedy dehtovité látky neshoří v generátoru, je potřeba je rozkládat ještě v plynné fázi, a to katalyticky. K tomuto účelu se hodí niklové katalyzátory používané průmyslově pro reforming ropných frakcí. Fungují v teplotním rozsahu cca 700-950 °C, což odpovídá teplotě dřevoplynu při výstupu z generátoru.

Klasický dřevoplynový generátor poskytuje vyhovující dřevoplyn v rozsahu 20 – 100 % svého plného výkonu. Jelikož lokomotiva bude mít generátory dva, rozšíří se tento rozsah (směrem k menšímu výkonu) vyřazením jednoho generátoru na 10 %. Pro výkon ještě menší lze generátor upravit dalším níže umístěným vyústěním vzduchu, na který bude přívod vzduchu přepnut z horního vyústění.

3. Lokomotiva – vhodný adept pro pohon dřevoplynem

Na první pohled by se zdálo, že optimálním využitелеm energetického obsahu biomasy budou stacionární zařízení, kde se nemusí tolik šetřit hmotností a prostorem jako u dopravních prostředků. Ukazuje se však, že biomasa by kvůli své objemnosti a malé výhřevnosti neměla být energeticky využívána příliš daleko od místa svého vzniku, aby se dopravní náklady udržely v rozumné výši. Tedy rozptýleným zdrojům biomasy by nejlépe odpovídala její rozptýlená spotřeba, např. pro domácnosti a auta. To bohužel naráží na prakticky prohibivní problémy manipulační a u aut i hmotnostní a prostorové.

Tepelná elektrárna na biopalivo z výše uvedeného důvodu není příliš vhodným řešením. Nemá sice problém ani s rozměrností, ani s hmotností příslušných zařízení na zpracování biopaliva a manipulaci s ním, ale v zájmu účinnosti je navrhována s co největším výkonem, takže vyžaduje vydatný přísun paliva. Kvůli jeho rozptýleným zdrojům je nutno dopravovat je do takové centralizované elektrárny z větších vzdáleností, v praxi více než stokilometrových, což zvyšuje náklady a zatěžuje životní prostředí.

V případě lokomotivy se jedná o menší výkon a tedy i menší množství potřebného paliva, které navíc nemusí být dopravováno do jednoho centra, ale lze je skladovat na řadě míst podél trati, takže dopravní vzdálenosti se zkrátí a cena paliva tím není příliš navyšována. Je tedy železnice jako liniový konzument biopaliv optimálním kompromisem, výhodnějším než spotřebitelé rozptýlení i spotřebitel centralizovaný.

3.1 Zdroj dřevoplynu pro lokomotivu

Budou použity dva dřevoplynové generátory válcového tvaru. Při požadavku na plný výkon budou ve funkci oba, při sníženém výkonu bude stačit jeden. Jeden bude samozřejmě ve funkci sám při zavážení druhého palivem.

Generátory budou v oblasti hoření dvouplášťové. Vnější plášť musí odolávat vnitřnímu přetlaku, neboť vzduch je do generátoru hnán dmychadlem. Před vysokou teplotou je vnější plášť chráněn vnitřním pláštěm odolným teplotně (ale nikoliv mechanicky) a také vzduchem proudícím v meziplášťové mezeře. Vnější plášť je tepelně izolován vůči vnějšímu prostředí.

Průměr generátorů bude odvozen od požadovaného výkonu pohonu. V lokomotivě bez uličky může mít generátor průměr maximálně 3 m. Pak by celková plocha obou ohnišť mohla být až 14 m². V nich bylo možno generovat tepelný výkon až 16 MW. V případě turbínového paroplynového pohonu by bylo možno počítat s účinností 25 % (obdobná stacionární zařízení dosahují účinnosti 30 %). Maximální mechanický výkon by pak dosahoval hodnoty 4 MW. Příslušná spotřeba paliva by byla cca 10 m³ špalíků z měkkého dřeva o 20 % vlhkosti za hodinu, což je cca polovina obsahu jednoho generátoru.

Méně mohutné dimenzování generátorů se bude týkat jejich kombinace s pístovým motorem, neboť nemá-li hmotnost klasicky koncipovaného motoru přesahovat únosnou míru, bude jeho výkon výrazně nižší. Byl-li by v lokomotivě instalován např. dřevoplynový zážehový motor Jenbacher JMS 620 GS-S.L o výkonu 2025 kW, klesla by spotřeba dřevěných špalíků na cca 3 m³/h (nejen kvůli menšímu výkonu, ale i kvůli téměř dvojnásobné účinnosti).

Při zavážení generátoru palivem je nutno uzavřít potrubí vedoucí k němu i od něj a uvolnit přetlak (zřejmě vpuštěním do sání dmychadla pro sousední generátor). Pak uvolnit poklop a dopravit do generátoru palivo. Poklop pak uzavřít a zmíněná potrubí otevřít. To vše lze mechanizovat, resp. automatizovat. Palivo v zásobníku bude dosušeno průnikem vzduchu ohřátého v kondenzátoru přidavného parního okruhu.

K zapálení paliva lze použít elektrický ohřev dmýchaného vzduchu, a to nad zápalnou teplotu dřeva. energii k tomu potřebnou dodá přidavný alternátor poháněný automobilovým vznětovým motorem. Ten bude používán pro start hlavního pohonu, případně i pro manipulační pojíždění lokomotivy (předpokládá se standardní elektrický střídavý přenos výkonu na hnací nápravy).

3.2 Oblasti vhodné k provozu lokomotiv na dřevoplyn

I bez podrobné analýzy je zřejmé, že přednostní zájemci o dřevoplynové lokomotivy by se měli vyskytovat v zemích s málo elektrifikovanou železniční sítí. Netýká se to tedy Evropy (včetně ČR, neboť z jejích 9496 km tratí je elektrifikováno 3041 km - údaj z roku 2008). Přesto by se zde dřevoplynové lokomotivy mohly perspektivně uplatnit, a to jako ekologičtější náhrada vyřazovaných lokomotiv s dieselovými motory.

Na českém území byl dřevoplyn pro pohon železničních vozidel již použit, a to v době Protektorátu. Šlo o motorové vozy řady M 133.0 (tovární označení Škoda 15Mo), které byly vyrobeny v letech 1941 až 1943 v počtu šesti kusů pro Českomoravské

dráhy ve Škodě Plzeň. Byly určeny pro místní tratě. M 133.0 byly dvounápravové s jednou hnací nápravou. Hnací agregát byl tvořen spalovacím dvanáctiválcovým motorem Škoda 12 V.G, který byl upraven pro pohon dřevoplynem a dosahoval výkonu 99 kW. Byl vybaven čtyřstupňovou mechanickou převodovkou Škoda. Maximální rychlost tohoto motorového vozu byla 65 km/h.

V Německu používala za druhé světové války Deutsche Reichsbahn posunovací lokomotivy upravené na pohon dřevoplynem.

Pro použití dřevoplynových lokomotiv přicházejí zřejmě v úvahu země s rozsáhlou těžbou a zpracováním dřeva (Kanada, Finsko, Rusko, Brazílie?), některé země rozvojové a poněkud překvapivě i Čína. Tam totiž ještě funguje infrastruktura pro zásobování parních lokomotiv palivem, takže přechod na dřevo by byl spíše zjednodušením. Bez zajímavosti by nemusely být ani USA, kde převažuje nezávislá trakce, což je dáno tradičně nízkou cenou nafty v kombinaci se značnými vzdálenostmi a nevýraznou osobní dopravou.

3.3 *Varianty dřevoplynového pohonu pro lokomotivy*

3.3.1 *Spalovací turbína*

Kombinace dřevoplynového generátoru s plynovou turbínou vypadá na první pohled velmi lákavě. Na rozdíl od pístového motoru, pro který je nutno horký plyn z generátoru (> 900 °C) co nejvíce ochladit, mohla by primární turbína značnou část jeho tepelné energie změnit na mechanickou práci. Další výhodou se nabízí v podstatně nižší hmotnosti turbín oproti pístovému motoru; lehčí by byl i vysokotáčkový alternátor v případě elektrického přenosu výkonu na hnací nápravy lokomotivy. Turbinová lokomotiva by ostatně nebyla na železnici žádnou novinkou.

3.3.2. *Příklady turbínových lokomotiv*

V roce 1958 vyjela zkušebně na trať česká turbinová lokomotiva TL 659.001 s dvoustupňovou převodovkou a s mechanickou transmisí. Jako palivo byl použit letecký petrolej. Maximální výkon na háku byl 1463 kW při rychlosti 42 km/h (na hřídeli turbíny byl 1803 kW). Do praktického provozu nebyla nasazena kvůli provozním problémům, např. nešlo řadit „nahoru“, neboť otáčky turbíny klesaly pomaleji než rychlost vlaku. Účinnost turbíny byla jen 17,5 % a spotřeba paliva při volnoběhu činila 30 % spotřeby při plném výkonu. Také hlučnost byla příliš vysoká.

V USA provozovala turboelektrické lokomotivy dráha Union Pacific vyrobené v letech 1958-1961. Výkon dosahoval až 7457 kW při spotřebě paliva 3000 l za hodinu (letecký petrolej byl tenkrát levný). Tažná síla při rozjezdu činila až 945 kN, což bylo oceňováno zejména při tažení těžkých vlaků přes Skalisté hory.

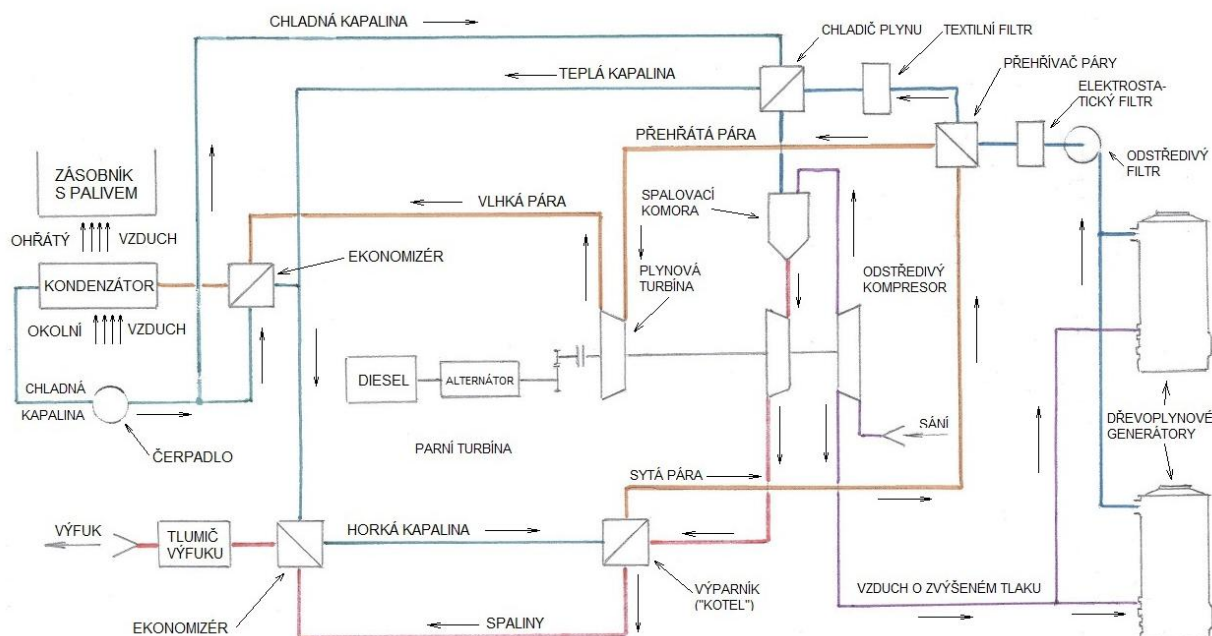
Novodobou záležitostí je turboelektrická lokomotiva Jet Train 2200F firmy Bombardier Transportation. Pohání ji spalovací turbína Pratt & Whitney PW150 o výkonu 3730 kW. Ta má hmotnost necelých 550 kg, zatímco hmotnost vznětového motoru srovnatelného výkonu by byla cca 18 tun. Trakční motory jsou třífázové asynchronní. Při zkouškách byla dosažena nejvyšší rychlost 251 km/h.

Ruská turbinová lokomotiva GT1-001 sestává ze dvou nedělitelných částí. V jedné je s alternátorem umístěna turbína NK-361 na zkapalněný zemní plyn (LNG) o výkonu 8,3 MW, ve druhé je zbylá trakční výzbroj. Emise údajně dosahují jedné dvacetiny hodnot u současných konvenčních dieselelektrických lokomotiv. Hmotnost lokomotivy je 300 tun, zásoba paliva je 17 tun (musí být udržováno v podchlazeném stavu).

3.3.3. Turbínový pohon lokomotivy na dřevoplyn

Jeden z možných ideových konceptů takého pohonu je schematicky znázorněn na následujícím obr. 3. Naznačeny jsou dva dřevoplynové generátory, aby i při doplňování jednoho z nich zajišťoval ten druhý aspoň poloviční výkon. Předpokládán je elektrický přenos výkonu na hnací kola.

Obr. 3: Schéma turbínového pohonu na dřevoplyn s přídatnou parní turbínou



Zdroj: autor

Elektrickou energii pro pohon vyrábí rychloběžný alternátor. Jeho rotor je na společném hřídeli s rotory plynové turbíny, parní turbíny a kompresoru (nebo je s nimi spojen přes reduktor). Přes třecí spojku je k soustrojí dále zařazen vznětový motor využívaný pro rozběh soustrojí a také pro manipulační jízdu nízkou rychlostí.

Kompresor spalovacího vzduchu by byl zřejmě centrifugální, plynová turbína naopak centripetální s naklápěcími statorovými lopatkami. Kompresor žene vzduch jak do spalovací komory, tak do ohniště generátoru. V něm se spaluje dřevo a vzniká tak horký hořlavý plyn. Ten se zbavuje hrubších částic popílku v cyklovém odlučovači a jemnějších v elektrostatickém odlučovači. Mohl by pak konat práci v primární turbíně, ale zbývající prach by ji poškozoval.

Proto je veden k přehříváči, kde zvyšuje teplotu a suchost páry pro parní turbínu, čímž se ochlazuje (účinnost parního okruhu je bohužel nižší a hmotnost vyšší než v případě primární plynové turbíny). Za přehříváčem páry je jemný filtr s textilní vložkou ze skelných vláken. Následně je plyn přiváděn do spalovací komory, kde se mísí se vzduchem a hoří. Spaliny pohánějí plynovou turbínu a pak předávají část zbytkového tepla v „kotel“ vyrábějícím páru vedenou přes zmíněný přehříváč do parní turbíny.

Výkon celého soustrojí se reguluje naklápěním statorových lopatek turbíny a výhybkou v proudu vzduchu z kompresoru. Při sníženém výkonu totiž odkloní výhybka část vzduchového proudu a připojí jej k proudu spalin pohánějících turbínu. Jeho energie se tím zčásti využije. Zrychlení proudu spalin způsobené naklápěním statorových lopatek centrifugální turbíny sníží průtočné množství plynů, aniž by se příliš zmenšil tlakový spád. V důsledku toho neklesne při sníženém výkonu termodynamická účinnost tolik.

U turbínového pohonu na dřevoplyn by zřejmě nebyl problém dodržet emisní limity. Vzhledem k přebytku kyslíku je emise CO i HC minimální a kvůli nižším teplotám hoření je i vznik NO_x omezený.

Turbínový pohon na dřevoplyn by však vykazoval také dosti závažná negativa:

- Termodynamická účinnost turbínového pohonu je o dost nižší než účinnost pístového motoru, zejména při částečném zatížení.
- Popílek nelze z horkého dřevoplynu odstranit úplně (používán cyklonový a následně elektrostatický odlučovač). Kvůli vysoké teplotě plynu nejsou totiž použitelné textilní filtry, a to ani ty ze skleněných vláken. Plynovým turbínám přitom popílek škodí obdobně jako pístovým motorům, zejména za vysokých teplot. Kromě toho působí na turbínové lopatky korozivně alkalické výpary (Na, K, Ca), které jsou ve velmi malých množstvích v plynech z biomasy přítomny. Nelze tedy primární turbínou využít teplo dřevoplynu proudícího z generátoru (s nižší účinností a s vyšší hmotností je to možné za použití doplňkového parního okruhu).
- Turbínový pohon je značně hlučný (kvůli vysoké rychlosti plynů odcházejících výfukem?) Např. u výše zmíněné lokomotivy GT1-001 byl naměřen Hluk 120 dB!

3.3.4 Pístový motor na dřevoplyn

Ve srovnání s turbínovým pohonem má pístový spalovací motor výrazně vyšší termodynamickou účinnost, zejména při částečném zatížení. Vyžaduje menší energii pro start a rychleji reaguje na změny zatížení. Na druhé straně je mnohem těžší a při chodu generuje vibrace. Pokud spaluje dřevoplyn, je nutno počítat s výkonem téměř o třetinu nižším, než při použití kapalných uhlovodíkových paliv, a to navzdory vyšší účinnosti v důsledku vyššího stupně komprese umožněného vysokým oktánovým číslem dřevoplynu. Vyšší kompresní tlak vyžaduje zvýšené napětí na elektrodách zapalovacích svíček a dřevoplyn potřebuje kvůli velkému obsahu nehořlavých složek i větší zápalnou energii.

Poznámka2:

Některé velké plynové motory, které spalují kvůli minimalizaci škodlivých exhalací chudou směs, mají zapalovací svíčku v odděleném prostoru, kde je směs bohatá. Její plamen zažehne i směs chudou. Jakousi obdobou je zapalování vstříkem nafty. Ta se vznítí vlivem vysoké teploty na konci kompresního zdvihu (stupeň komprese je podobný jako u vznětových motorů). Takový motor by mohl být spouštěn jako vznětový.

Dřevoplyn pro spalovací motory by měl mít výhřevnost aspoň 4,2 MJ/m³. Kvůli volumetrické účinnosti by měl být co nejchladnější. V jednom kubickém metru by neměl obsahovat víc popílku než 50 mg⁷. Obsah dehtu by neměl překračovat 500 mg/m³ a obsah kyselých složek znehodnocujících olejovou náplň by měl být nižší než 50 mg/m³.

Plynové pístové motory pro energetické centrály vykazují účinnost přes 40 % (např. 9,5 MW centrála s motorem Jenbacher J920 spalujícím zemní plyn⁸ má na svorkách alternátoru účinnost dokonce 48,7 %). U lokomotivního motoru na dřevoplyn bude účinnost pochopitelně nižší, ale nikoliv podstatně. Podle nepříliš optimistického odhadu by se měla celková účinnost kombinace dřevoplynového motoru s parní turbínou využívající jeho odpadní teplo i teplo horkého dřevoplynu z generátoru blížit hodnotě 50 %. Lze pak očekávat specifickou spotřebu dřeva cca 550 kg/MWh a tedy přibližně 1,4 m³ špalíků na 1000 kWh.

⁷ Při používání plynu s obsahem popílku 5 mg/m³ se už opotřebením motoru nelze odlišit od opotřebením motoru na kapalná paliva.

⁸ Jeho odpadní teplo je kromě toho využíváno k vytápění.

Poznámka3:

U automobilních motorů na dřevoplyn z druhé světové války byla specifická spotřeba dřeva zhruba dvojnásobná. V praktickém provozu byl 1 litr benzínu (energetický obsah 34,3 MJ) nahraditelný třemi kg suchého dřeva (energetický obsah $3 \times 14,3 = 42,9$ MJ). To bylo vlastně příznivé, uvážíme-li, že bylo značné množství tepla zmařeno chlazením dřevoplynu před vstupem do sání motorů⁹.

Pokud jde o škodliviny ve výfukových plynech, byla v r. 2008 jejich přípustná emise pro železniční motory určena Směrnicí EU 2004/26/EC. Ta požadovala pro výkon vznětového motoru přes 2000 kW nepřekročit následující hodnoty: CO 3,5 g/kWh, HC 0,4 g/kWh, 7,4 g/kWh a pro tuhé částice 0,2 g/kWh. Od 31.12.2011 platí limity UIC IIIB: CO 3,5 g/kWh, HC+NO_x 4g/kWh a částice 0,025 g/kWh. Jelikož plynové motory na rozdíl od vznětových nekouří, zřejmě splní uvedený limit pro částice bez filtrace spalin, ale emise ostatních škodlivin, byť je jich málo, bude asi nutno omezit.

Moderní motor na dřevoplyn musí být vybaven zpětnovazebním řízením směšovacího poměru (plynu a vzduchu) se sondou λ , neboť složení dřevoplynu může významně kolísat. Tento systém současně slouží pro katalytické snižování emisí za stechiometrického poměru plynu a vzduchu (dochází i k redukci NO_x).

Při částečném zatížení motoru je směs ochuzována, což totiž nezhoršuje účinnost tolik jako škrcení přívodu směsi. Při $\lambda > 1$ funguje katalyzátor jako oxidační a tedy neodstraňuje oxidy dusíku. Těch je při spalování chudé směsi méně, ale pokud by předepsaný limit nebyl splněn, odstraňují se z výfukových plynů jako u vznětových motorů metodou SCR. Jde o vstříkávání vodního roztoku močoviny (32,5 %) pod názvem AdBlue do výfuku, kde reakcí uvolněného NH₃ vzniká na katalyzátoru dusík a vodní pára. Bude zapotřebí zhruba 10 litrů roztoku na tunu dřeva.

Níže popsaný motor dvoudobý bude produkovat zřejmě tak málo NO_x, že následné omezování jejich obsahu nebude patrně nutné (ve válci zůstává část výfukových plynů, což je obdoba jejich recirkulace).

4. Parní turbína využívající teplo spalin primárního pohonu

Tepelné elektrárny, které používají jako palivo zemní plyn, využívají tepelnou energii spalin z plynové turbíny obvykle k vytápění, ale někdy také k výrobě páry pro pohon parní turbíny, která pak významně pomáhá plynové turbíně (až polovinou jejího výkonu) a zlepšuje celkovou účinnost takového paroplynového pohonu (udává se až 55 %). Už to bylo realizováno i pro energetické centrály na dřevoplyn, byť ne s tak vysokou účinností.

U vozidel je toto řešení problematictější jednak kvůli významnému vzrůstu hmotnosti i potřebného prostoru, jednak kvůli nestacionárnímu provozu s častými změnami zatížení včetně volnoběhu, kde efektivita přídatného parního okruhu rychle klesá.

Poznámka

To potvrdil např. pokusný provoz osobního automobilu BMW Turbosteamer. Jeho čtyřválcový zážehový motor 1800 cm³ byl doplněn „kotle“ vtápěným výfukovými plyny a dvoustupňovou parní turbínou. Hmotnost vozu se tím zvýšila o 100 kg. Při plném výkonu zvýšil parní okruh celkovou účinnost z 33 % na 48 % (tedy na 45 % účinnosti samotného motoru; bylo využito 65 % odpadního tepla). Při částečném zatížení byl však přínos minimální. Právě částečné zatížení však u osobního automobilu převažuje.

⁹ Tuto relativně příznivou spotřebu způsobil zřejmě zvýšený stupeň komprese spolu s nutností jezdit kvůli sníženému výkonu motor víceméně stále na „plný plyn“, takže se minimalizovaly ztráty škrcením. Při rekonstrukci vznětových motorů na pohon dřevoplynem nebyla náhrada nafty dřevem už zdaleka tak příznivá.

Lokomotivy nejsou tak proměnlivě zatěžovány jako auta, a s prostorem i hmotností to u nich není zdaleka tak napjaté, takže přídatný parní pohon by mohl být přínosem. Pro následné úvahy se předpokládá dosažení celkové účinnosti při plném výkonu na 125 % účinnosti samotného motoru (opatrný odhad).

4.1 Příklady paroplynových centrál na pevná biopaliva

Dosud největší elektrárnu na biopaliva (25 MW) postavila firma Siemens v holandském městě Cuijk (40 km severovýchodně od Eindhovenu). Spálí ročně zhruba 250 tisíc tun dřevěného odpadu s účinností 30 % (na svorkách generátoru). Odpadní teplo je použito k vytápění. V Německu byla první dřevoplynová energetická centrála vybudována ve dvacetitisícovém městě Senden poblíž Ulmu. Kromě zásobování celého města teplem vyrábí elektrickou energii pro 12 tisíc domácností s účinností až 33 %. Spaluje dřevní odpad z pil, z nábytkářského průmyslu a stavebnictví, jakož i větve či části kmenů nevhodné pro další zpracování. Zdrojem dřeva je oblast do vzdálenosti cca 100 km od Ulmu.

4.2 Nekonvenční parní cykly

Doplňkový parní pohon na zbytkovou tepelnou energii primárního dřevoplynového pohonu je pochopitelně tím účinnější, čím vyšší je teplota páry pohánějící turbínu a čím nižší je teplota její kondenzace. U turbínového pohonu na dřevoplyn mají spaliny po výstupu z turbíny ještě dost vysokou teplotu, aby vyráběná vodní pára měla ještě relativně příznivé parametry.

Pokud je však primárním dřevoplynovým pohonem pístový zážehový motor, je teplota výfukových plynů o dost nižší a teplota chladicí kapaliny ještě nižší, takže klasický Rankine-Clausiovův cyklus by byl s vodní parou problematický. Možná by byl použitelný, pokud by se zkondenzovaná voda ohřívala chlazením bloku a hlavy motoru, následně odpařovala teplem výfukových plynů a nakonec přehřívala horkým dřevoplynem z generátoru ($> 900\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Pro menší teplotní spády byly však navrženy v zájmu vyšší účinnosti odlišné parní cykly: Kalinův cyklus, Ueharův cyklus a tzv. organický Rankinův cyklus (ORC). Ten poslední je již běžně využíván u menších stacionárních jednotek.

4.2.1 ORC

Hlavním rozdílem mezi ním a klasickým Rankine-Clausiovým cyklem je pracovní látka. U ORC je vodní pára nahrazena kapalinou s nižší teplotou bodu varu, např. vhodným silikonovým olejem. Ten se kromě toho udrží při ohřevu v kapalném stavu při nižším tlaku než voda.

Jako výhody ORC přicházejí v úvahu:

- příznivá účinnost při nižších teplotních spádech
- nižší otáčky turbíny při stejném výkonu (větší molekulová hmotnost páry)
- nižší tlak a teplota v celém oběhu,
- pracovní médium je nekorozivní a nemrzne.

Nevýhody ORC:

- pracovní média jsou vesměs hořlavá,
- při úniku média nepříznivý vliv na životní prostředí.
- a proto vysoké nároky na těsnost systému,

4.2.2 Kalinův cyklus

využívá jako pracovní látku směs vody a amoniaku. Ke kondenzaci dochází při nízkém tlaku a malé koncentraci amoniaku (45%) za vyšší teploty, zatímco

odpařování směsi s vysokou koncentrací amoniaku (70%) může probíhat za nižších teplot než u vody. Kalinův cyklus je nevhodnější pro zdroje s teplotním rozmezím mezi 100 až 200°C.

4.2.3 Ueharův cyklus

je podobný cyklu Kalinovu. Má však turbínu navíc a snižuje zatížení kondenzátoru odčerpáním páry z první turbíny. Stejně jako Kalinův cyklus je vhodný pro malé teplotní spády, např. pro energetické využití geotermálních zdrojů, kdy hlavním produktem je teplo pro vytápění. Termodynamická účinnost je samozřejmě nízká.

Z uvedených nekonvenčních parních cyklů by byl pro dřevoplynovou lokomotivu zřejmě použitelný ORC, který je navíc komerčně dostupný.

5. Využití existujícího motoru pro pohon lokomotivy dřevoplynem

Velké motory na plynná paliva vyrábí řada firem, např. MAN, Caterpillar Inc., MWM, Cummins, Perkins Engines, Kawasaki Heavy Industries, Rolls-Royce & Bergen-Engines, MTU Friedrichshafen, Jenbacher, Deutz, MTU, Wärtsilä, Dresser-Waukesha, Guascor, Doosan, Yanmar. Automobilové motory upravuje na plyn řada dalších firem.

Palivem velkých stacionárních motorů je většinou zemní plyn, ale jsou nabízeny i pro bioplyn, kalový plyn či skládkový plyn. Dřevoplyn se od těchto plynů s minimálním obsahem nehořlavých složek liší vysokým obsahem dusíku (cca 50 %) a tedy nižší výhřevností. Většina výrobců proto s tímto palivem nepočítá. Výjimkou je rakouský Jenbacher GmbH. Ten vybavil svými agregáty na dřevoplyn několik energetických centrál. Pracují s dřevoplynem střední kvality, viz následující tabulku.

Tab. 8: Dřevoplyn pro kogenerační jednotky s motory Jenbacher

↓ Lokalita ↓	H ₂ [%]	CO [%]	Výhřevnost
Harboore (Dánsko)	15 - 18	25 - 28	6,8 MJ/m ³
Siez (Švýcarsko)	12 - 15	18 - 20	5,4 MJ/m ³
Kokemäki (Finsko)	15 - 18	18 - 20	6,1 MJ/m ³
Skive (Dánsko)	15 - 18	18 - 20	6,1 MJ/m ³

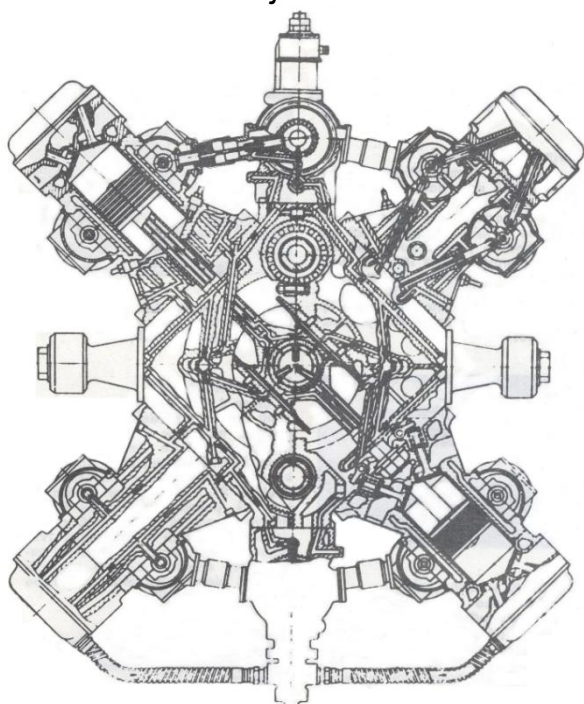
Zdroj dat: [www.idgte.ca/.../GE Jenbacher %20 Presentation](http://www.idgte.ca/.../GE%20Jenbacher%20Presentation)

V tabulce není uvedena centrála v Güssingu (Rakousko), kde je nainstalován agregát Jenbacher JMS 620 GS-S.L, který má dvacetiválcový zážehový motor na dřevoplyn. Tento motor, pracující v Millerově cyklu, má zdvihový objem 124,75 litrů (ø190 x 220) a poměrně vysoké otáčky (1500/min), takže střední pístová rychlost je 11 m/s. Jeho maximální výkon je 2025 kW (výkon na svorkách el. generátoru je 1964kW a kromě toho poskytuje tepelný výkon 2490 kW). Měrný výkon na hřídeli motoru je 16,2 kW/litr a je o třetinu nižší než na zemní plyn.

Pro lokomotivu přiměřenějším se však zdá být šestnáctiválcový motor z téže řady: JMS 616 GS. Jeho výkon na dřevoplyn by byl 1620 kW. Předpokládáme, že po doplnění parní turbínou by se jeho výkon zvýšil o necelou čtvrtinu, tedy na cca 2000 kW (u paroplynových centrál bývá výkon parní turbíny poloviční proti turbíně spalovací). Hmotnost šestnáctiválcového motoru je 12 tun a celého agregátu 22,4 tun (bez doplňujícího parního pohonu; ten by mohl vážit cca 4 tuny). Délka agregátu je 8,3 m, šířka 2,5 m a výška 2,8 m. Lokomotiva jím vybavená by představovala svým výkonem docela slušný průměr.

6. Nekonenční koncepce plynového motoru

Obr. 4: Motor s bezojničním mechanismem



Zdroj: Automobil 5/1987 str. 32 – 35

Princip funkce jeho bezojničního klikového mechanismu znázorňuje sousední schéma. Odvaluje-li se ozubené kolo X po dvojnásobném vnitřním průměru ozubeného věnce Y, pohybují se body A i B přímočaře. Pokud spojnice bodů A, B bude procházet bodem C, lze ozubené soukolí X, Y vynechat. Ložiska C, C' jsou na vzájemně nezávislých ramenech klikového hřídele Z, Z'. Aby se obě tato ramena otáčela stejně, jsou spojena s předlohovým hřídelem pomocí dvou párů ozubených kol (nenakresleno). Výkon je odebrán z předlohového hřídele.

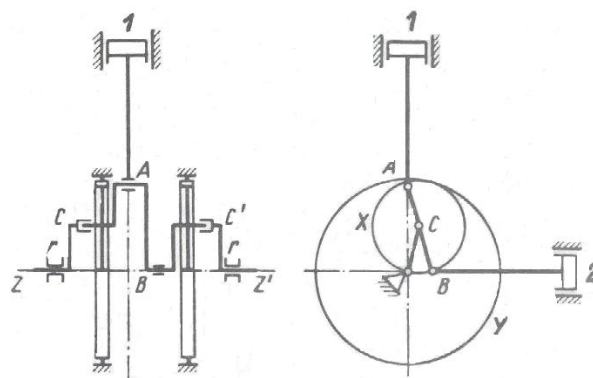
Pro letecký motor byl u zmíněných ozubených kol zvolen převod do pomala, neboť je třeba, aby otáčky vrtule byly nižší než otáčky motoru. U pohonu trakčního alternátoru může naopak v zájmu úspory hmotnosti jít o převod do rychla.

Zajímavou výhodou uvedeného motoru je značný rozsah kompenzace setrvačných sil od pístové skupiny silami od tlaku ve válci při kompresním a expanzním zdvihu: Při pohybu k úvrati napomáhá ke zpomalování pístové skupiny rostoucí tlak v tom válci, ve kterém probíhá komprese. Při pohybu od úvrati je setrvačnost pístové skupiny přemáhána silou expanzního zdvihu.

U klasického čtyřdobého motoru k takové kompenzaci nedochází v těch válcích, kde probíhá sání či výfuk, zatímco u motoru OM-127 PH jdou proti sobě síly od tlaku ve válci a síly setrvačné při každém zdvihu. Navíc je síla od expanze využívána pro

Nutnost umístit na lokomotivě dost rozměrné i hmotné dřevoplynové generátory a pokud možno i docela objemný zásobník s palivem vytváří tlak na minimalizaci rozměrů i hmotnosti hnacího agregátu. Byl-li by klasický řadový nebo vidlicový motor nahrazen motorem hvězdicovým, ušetřilo by se především na stavební délce. Snížila by se i hmotnost (kratší kliková hřídel i skříň). Další redukci hmotnosti nabízí motor s bezojničním mechanismem (4). Příklad jeho aplikace u sovětského leteckého motoru OM-127 PH je na sousedním obrázku. Jde o osmiválcový kapalinou chlazený zážehový motor (druhá čtyřválcová hvězdice je v zákrytu). De facto jde však o šestnáctiválec, neboť všechny válce jsou dvojitě (pracovní prostor je i pod spodní stranou pístu). Písty jsou chlazeny olejem. V hlavě každého válce jsou čtyři ventily. U spodních spalovacích prostorů je velmi špatný přístup pro seřizování vůle ventilů a také k zapalovacím svíčkám přes spleť sacího, výfukového a olejového potrubí. Proto se motor nedostal do sériové výroby.

Obr. 5: Schéma bezojničního klikového mechanismu



Zdroj: Ing. Julius Mackerle (4)

kompresi v jiném pracovním prostoru pouze prostřednictvím pístnice a nikoliv přes čepy a ložiska klikového mechanismu jako u klasického motoru. Další předností jsou mnohem menší boční síly na písty. To vše snižuje mechanické ztráty.

Významnou předností je i velmi dobré vyvážení tohoto motoru. Setrvačné síly dvou pístů spojených pístnicí se skládají se setrvačnými silami obdobné skupiny (pootočené o 90°) tak, že dohromady vytvářejí konstantní sílu rotující otáčkami klikového hřídele. Tu lze kompenzovat protizávažím na klikovém hřídeli. Na rozdíl od ojnicního mechanismu zde neexistují vyšší harmonické složky nevyváženosti. Zbývá prakticky zanedbatelná nevyváženost momentová, neboť rovina jedné dvojice válců je od roviny druhé dvojice vzdálena jen o průměr pístnice (i tuto velmi malou nevyváženost lze snadno kompenzovat).

6.1. Plynový dvoutakt?

Bude-li popsán bezojnicní mechanismus použit pro dvoudobý motor, bude jeho konstrukce mnohem jednodušší. Odpadnou spodní hlavy válců (jimiž procházejí pístnice) včetně příslušných ventilů, vačkových mechanismů, potrubí a zapalovacích svíček. Přitom zůstane zmíněná kompenzace tlakových a setrvačných sil zachována a nezmění se ani rovnoměrnost chodu (počet expanzních zdvihů na otáčku). Takové uspořádání by bylo vhodné pro dvoudobý vznětový motor vyznačující se mj. sníženou produkcí NO_x v důsledku smíšení části výfukových plynů s čerstvou náplní válce.

V případě zážehového motoru je dvoudobý cyklus problematický kvůli vyplachování válce. Pokud ten je vyplachován směsí, odchází část paliva výfukem, což se projeví na jeho spotřebě a na vysoké emisi nespálených uhlovodíků. Je-li vyplachován vzduchem, a benzín je vstřikován až po zavření výfukových kanálů za komprese, není dost času na jeho odpar. Tento problém u plynu odpadá, takže pak jde jen o to, aby se vefouknutý plyn rychle smísil se vzduchem, a pokud se nestačí vytvořit homogenní směs ještě před zážehem, aby bohatší směs byla u zapalovací svíčky.

Předpokládá to konfiguraci válce s výfukovými kanály otevíranými pístem a přívod vyplachovacího vzduchu otevřením ventilů v hlavě. Po zavření výfukových kanálů se otevřou v hlavě jiné ventily, kterými vnikne do válce plyn. Tato konfigurace se vyznačuje stejnoměrnějším tepelným zatížením válce a možností vyššího stupně komprese než obrácená konfigurace s plnicími kanály a výfukovými ventily (ty svou vysokou teplotou vytvářejí oblasti s rizikem předzápalů a detonačního průběhu hoření směsi).

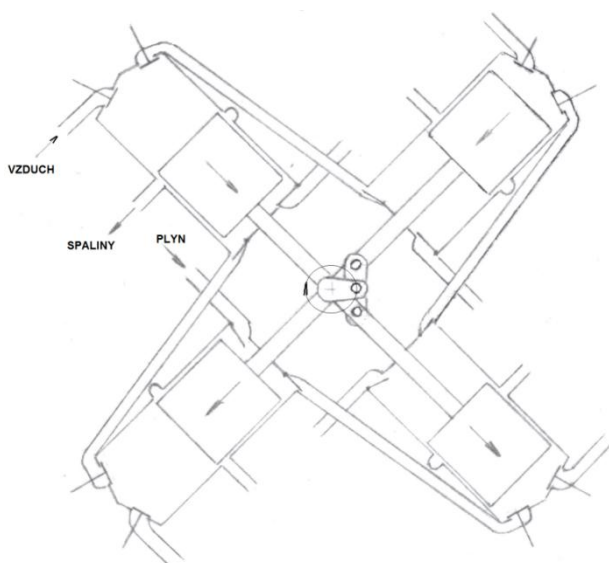
Vyplachovací vzduch i vefukovaný plyn mají svá vlastní dmychadla, plyn dokonce dvě v sérii. Jeho primární čerpadlo tlačí vzduch do generátoru a přes výměník tepla, filtry a chladič do sekundárního dmychadla, které lze u motoru s uvedeným bezojnicním mechanismem realizovat za použití spodní strany pístu, viz následující obr. 6.

Objem dřevoplynu potřebný pro vytvoření stechiometrické směsi je přibližně 80 % objemu vzduchu, což zhruba odpovídá poměru velikostí prostorů pod pístem a nad ním. Pružiny ventilů budou možná muset být silnější, aby se neotevřely předčasně působením tlaku v potrubí.

Poznámka 4:

Bylo by také možno odvádět dřevoplyn stlačovaný spodními stranami pístů do společného zásobníku a z něj teprve plyn přivádět k příslušným ventilům ve hlavách válců. Pak by se např. při brzdění motorem mohla vytvářet zásoba dřevoplynu využitelná třeba pro start generátoru. Ale s ohledem na nízkou výhřevnost dřevoplynu a jeho jedovatost se to nezdá být slibným řešením. Kromě toho by vznikl problém s řízením aktuálního množství plynu pro motor.

Obr. 6: Schéma dvoudobého motoru s vefukováním paliva po zavření výfukových kanálů



Zdroj: autor

Přímočaře se pohybující pístnici lze snadno utěsnit, takže dmyhadlo tvořené spodní stranou pístu se vyznačuje malým škodlivým prostorem a tedy dobrou volumetrickou účinností. Funguje tedy jako běžný pístový kompresor vybavený standardními samočinnými ventily (sacím a výtlačným). Je plněn dřevoplynem o zvýšeném tlaku vedeném přes filtry a tepelný výměník z generátoru. Výtlačné potrubí je vedeno ke hlavě toho válce, který v pořadí zážehů bezprostředně následuje. Jeho ventily pro vpouštění plynu do válce se otevrou, až píst zavře výfukové kanály a zahájí kompresi. V té době už je plyn v prostoru pod pístem předchozího válce dostatečně stlačen, aby jeho rychlé proudění vyvolalo intenzivní vír potřebný k promísení plynu se vzduchem.

Výkon motoru je ovládán dodávkou plynu i vzduchu do motoru tak, že je regulován výkon odstředivých dmyhadel. Je to energeticky efektivnější než regulace škrtkové klapkou. Takto se reguluje i bohatost směsi na základě signálu ze sondy λ . Pro pohon odstředivých dmyhadel je zřejmě optimálním řešením systém AERISTECH FE^{TT}. U něj nejsou dmyhadla poháněna výfukovou turbínou, nýbrž vysoce účinnými synchronními motory s permanentně magnetizovanými rotory. Jsou napájeny přes frekvenční měnič z trakční sítě. Výfuková turbína pohání místo dmyhadla vysokorychlostní alternátor s permanentně magnetizovaným rotorem. Ten svým elektrickým výkonem přispívá do trakční sítě. Systém AERISTECH umožňuje řádnou funkci plynového motoru v celém rozsahu otáček i zatížení a v režimu s velkým výkonem výfukové turbíny funguje jako turbokompaundní systém.

V zájmu zachování dobré účinnosti i při částečném zatížení jsou použity dva hlavní motory, každý na jiné straně trakčního alternátoru. Při sníženém zatížení jeden z nich nepracuje a je od trakčního alternátoru odpojen třecí spojkou. Zůstává však propojeno kapalinové chlazení obou motorů. Zastavení jednoho motoru je účinnější než známé vypínání válců, při kterém pohyb pístů pokračuje. Za sníženého požadavku na výkon je dřevoplyn odebírán jen z jednoho generátoru (druhý může být v té době doplňován palivem).

Pro spouštění motorů je použit trakční alternátor (napájený z frekvenčního měniče používaného za jízdy pro napájení trakčních motorů). Jako zdroj elektrického proudu pro spouštění je použit nezávislý agregát poháněný automobilovým vznětovým motorem. Slouží také pro roztápění plynových generátorů vhnáním vzduchu ohřátého elektrickými topnými články nad zápalnou teplotu dřeva. Je také doplňkovým zdrojem energie pro pohon kompresoru brzdové soustavy. Výkon tohoto agregátu stačí i pro manipulační pojíždění lokomotivy.

Dřevoplynový motor uvedené bezojniční koncepce umožní díky úspoře hmotnosti dosáhnout u lokomotivy srovnatelného výkonu s turbínovým pohonem, a to při nižší

spotřebě paliva. Hmotnost lokomotivy bude přece jen vyšší, takže se počítá s uspořádáním pojezdu Co'Co', zatímco turbínové lokomotivě by měl stačit Bo'Bo'.

Jak bylo zmíněno výše, působí u bezojniční koncepce setrvačné síly pístové skupiny proti silám od kompresních či spalovacích tlaků, takže je namáhání klikového mechanismu výrazně nižší než u koncepce klasické. Proto lze zvýšit střední pístovou rychlost prodloužením zdvihu pístů (a při zachování poměru *zdvih/vrtání* i jejich průměr). Motor se dostane do vyšší výkonové kategorie. Jeho parametry se získají extrapolací parametrů dřevoplynového motoru JMS 620 GS-S.L.:

Tab. 9: Očekávané parametry dvoudobého motoru s bezojničním mechanismem

Parametr	JMS 620 GS-S.L	Bezojniční koncepce	Důvod zlepšení
Střední pístová rychlost	11 m/s	15 m/s	nižší namáhání (setrvačné síly a tlak jdou proti sobě)
Jmenovité otáčky	1500/min	1500/min	
Vrtání x zdvih [mm]	Ø 190 x 220	Ø 260 x 300	
Zdvihový objem válce	6,2375dm ³	18,378 dm ³	
Měrný výkon [kW/dm ³]	16,23	22,7	2násobek prac. zdvihů/ot.
Výkon/válec [kW]	101,25	417	
Celkový výkon [kW]	1620 (16válec)	6672 (dva osmiválce)	

Zdroj: autor

Na rozdíl od plynových motorů v energetických centrálách, které pracují s výrazně chudou směsí, bude u tohoto motoru používána směs stechiometrická, což je dalším důvodem vyššího litrového výkonu (vedle použitého dvoudobého cyklu). Kvůli dost nízké rychlosti šíření plamene ve směsi dřevoplynu se vzduchem se počítá se čtyřmi zapalovacími svíčkami na válec, což umožní ještě zvýšit stupeň komprese oddálením rizika detonačního průběhu hoření.

Odhad hmotnosti motoru vychází z předpokladu, že připadne 70 kg na litr zdvihového objemu. Je to aritmetický střed mezi cca 120 kg/litr u velkých stacionárních motorů a 20 kg/litr u největších leteckých pístových motorů. Takže celková hmotnost obou osmiválců by měla být cca 23 tun. Jak bylo uvedeno výše, jsou otáčky výstupního (předlohového) hřídele vyšší než otáčky klikového hřídele, takže trakční alternátor je rychloběžný a tedy relativně lehký. Při předpokládaných otáčkách 6000/min by při porovnání s alternátorem agregátu Jenbacher JMS 620 GS NL měl mít hmotnost méně než 7 tun.

Pokud bude použita parní turbína pro využití jinak ztraceného zbytkového tepla, lze odhadnout hmotnost parního okruhu na cca 8 tun. Při plném zatížení plynového motoru by turbína doplnila jeho výkon o cca 1,6 MW.

Lokomotiva by při maximálním výkonu spotřebovala přibližně 4,5 tuny přirozeně vysušeného dřeva (11 m³ volně sypaných špalíků) za hodinu. Náplň dvou generátorů by tedy měla vydržet aspoň 3 hodiny jízdy plným výkonem. Dokonce by bylo možno rezignovat na separátní zásobník paliva a tím i na automatizaci doplňování paliva do generátorů z tohoto zásobníku.

Příklad řešení dřevoplynového pohonu lokomotivy s výše uvedeným motorem představuje extrém – ve skutečnosti zřejmě tak výkonné lokomotivy nebudou požadovány. Je kromě toho možné, že některé odhady i převzaté údaje byly příliš optimistické, takže reálně dosažitelný výkon bude nižší, nicméně bohatě vyhovující. Záměrem této poslední partie bylo naznačit, že při použití nekonvenční koncepce motoru by bylo možné nahradit pohon na motorovou naftu ekologičtějším a pravděpodobně i hospodárnějším pohonem na dřevoplyn.

Závěr

Výše uvedený text se snažil naznačit, že použití dřevoplynu pro pohon lokomotiv je ekologicky přínosné, technicky realizovatelné a možná i ekonomicky výhodné, což se snad do jisté míry podařilo. Bylo by proto účelné zabývat se touto problematikou hlouběji a také komplexněji. Zejména by bylo zapotřebí vyčíslit všechny dílčí náklady (palivo je levnější, ale pohonný systém dražší než u dieselelektrických lokomotiv). Tento text se také vůbec nedotkl mechanizace doplňování paliva do generátorů ani odstraňování popele či kondenzátů. Autor je však přesvědčen, že nejde o problémy, které by byly zvláště obtížně řešitelné.

Literatura

1. *Woodgas as enginefuel* [online]. Mechanical Wood Products Branch, Forest Industries Division, FAO Forestry Department. [cit. 2012-11-28]
Dostupné z <http://www.fao.org/docrep/t0512e/t0512e00.htm>
2. ELSENBRUCH, T. Latest Developments in the Use of Wood Gas in Gas Engines, IDGTE Toronto, Canada; 12. June 2008 [cit. 2012-11-29]
Dostupné z www.idgte.ca/.../GEJenbacher%20Presentation
3. KADRNOŽKA, J.: Termodynamické zhodnocení Kalinova cyklu a vícetlakového Rankinova-Clausiova cyklu se zaměřením na paroplynové elektrárny. *Energetika 2000 č. 1, str. 14 – 19*
4. MACKERLE, J.: Je klikový mechanismus nahraditelný? *Automobil 5/1987 str. 32 – 35*
5. HAMPL, J., VÍTEK, J. A New Concept of Infinitely Variable Transmission for Mechanically Powered Gyrobuses. *Journal of Middle European Construction and Design of Cars No. 1+2 July 2009, ISSN 1214-0821*

Anotace česky:

Pohon lokomotivy dřevoplynem je ekologicky neutrální a ekonomicky příznivý, zejména je-li použit paroplynový systém. Tento pohon je technicky realizovatelný i pro velké výkony. Zmíněno je použití jak plynové a parní turbíny, tak plynového pístového motoru, a to ve standardním provedení i v nekonvenčních řešeních.

Annotation in English:

The wood gas propulsion for the locomotive drive is ecologically neutral and economically advantageous, especially if the combined cycle is used. That propulsion is technically feasible for high capacities, too. Gas and steam turbines using is mentioned; so are the gas engines, respectively in the standard version and also in unconventional solutions.