kombinovaná výroba elektřiny a tepla

EKIS ČEA

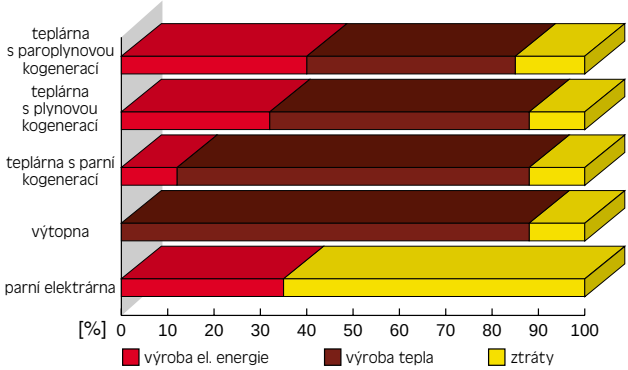
BioWATT

KOMBINOVANÁ VÝROBA ELEKTŘINY A TEPLA

Kombinovaná výroba tepla a elektrické energie (neboli **"kogenerace"** z anglického "co-generation"), představuje velmi zajímavou aplikaci moderních technologií na známé principy. Ve starší české technické literatuře se pro kogeneraci používá termín **"teplárenský cyklus výroby energie"**.

V porovnání s oddělenou výrobou tepla ve výtopnách, případně s výrobou elektřiny v kondenzačních elektrárnách, je při stejném množství užitečné energie spotřeba neobnovitelných fosilních paliv **nižší**. Tomu odpovídá i snížení emisí škodlivin ze zdrojů energie v globálním měřítku. **Energetické využití paliva** je u kombinované výroby elektřiny a tepla podstatně **vyšší**.

Porovnání oddělené a kombinované výroby tepla a elektrické energie



Obrázek 1: Rozdělení tepla přivedeného v palivu (na výrobu elektřiny, tepla a tepelné ztráty) v jednotlivých typech kombinované výroby elektřiny a tepla a porovnání s oddělenou výrobou tepla.

e	(-)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Δq_{pv}	(%)	9	19	25	30	34
e	(-)	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5
Δq_{pv}	(%)	37	41	44	47	49

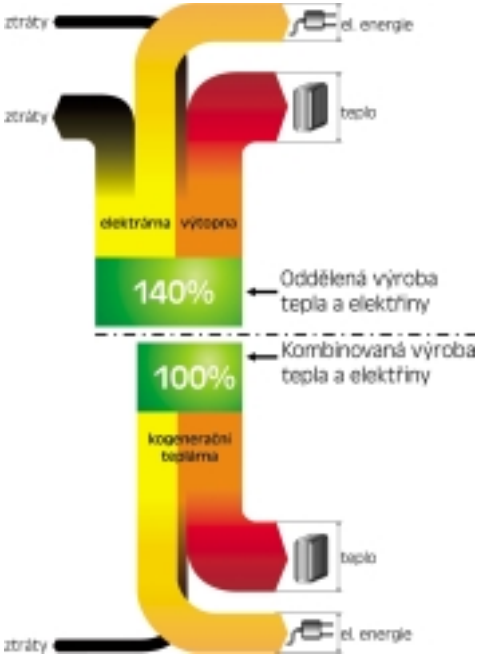
Tabulka 1: Vliv poměru výroby el. energie a tepla ($e = Q_{EL}/Q_{TEP}$) na měrnou úsporu paliva Δq_{pv} při kombinované výrobě tepla a elektřiny oproti oddělené výrobě tepla a elektřiny.

možnosti využití

Základní podmínkou pro použití kombinované výroby elektřiny a tepla je možnost využití tepla. Tím se výrazně zvyšuje energetická účinnost celého zařízení. Přehled základních parametrů jednotlivých typů těchto zařízení ukazuje následující tabulka:

Typ teplárny	Podíl výroby elektřiny a tepla Q_{EL}/Q_{TEP}	Účinnost elektrická	Účinnost tepelná	Účinnost celková	El. výkon teplárny
	(-)	(%)	(%)	(%)	(MW)
S parním strojem	0,16 - 0,25	8 - 12	60 - 67	68 - 87	0,1 - 2
S parními turbínami	0,24 - 0,34	12 - 15	6 - 8	72 - 80	0,15 - 100
Se spalovacími motory	0,7 - 1	32 - 41	44 - 53	82 - 90	0,1 - 10
Se spalovacími turbínami	0,5 - 0,8	23 - 38	36 - 50	68 - 85	2 - 100
Paroplynové	0,5 - 1,5	35 - 44	32 - 50	78 - 87	5 - 200 a více

Tabulka 2: Základní parametry jednotlivých typů kombinované výroby elektřiny a tepla.



Obrázek 2: Porovnání účinnosti výroby energie (Sankeyův diagram).

S tím ostře kontrastuje skutečnost, že se při výrobě elektřiny ve velkých elektrárnách využije 30 % (u starých) a až 42 % (u moderních) energie obsažené v palivu; zbytek se bez užitku odvádí do vzduchu chladicími věžemi. Kromě významného faktoru decentralizace výroby elektřiny vede použití kombinované výroby elektřiny a tepla ke snížení ztrát v elektrorozvodné síti.

Běžné kogenerační jednotky mají obvykle relativně malý výkon, desítky až stovky kW elektrického výkonu. S většími zařízeními se můžeme setkat v průmyslových podnicích a městských teplárnách (odtud český termín pro kogeneraci), kde je odpadní teplo využíváno pro technologické procesy či vytápění a přípravu teplé užitkové vody pro sídliště. Takovéto agregáty jsou známy například z nemocnic, kde tvoří záložní zdroj pro případ výpadku elektřiny ze sítě.

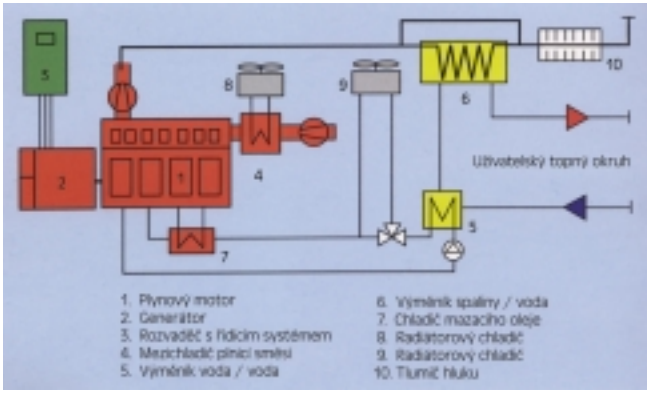
základní části a přehled zařízení

Kogenerační jednotku tvoří generátor na výrobu elektřiny, poháněný nejčastěji **spalovacím motorem** (plynová kogenerace) nebo **parní turbínou** (tzv. parní nebo paroplynová kogenerace). Zvláštní případ tvoří tzv. **palivové články**. Výše uvedená zařízení se liší způsobem i stupněm přeměny primárního paliva na obě sledované složky (elektrická energie a teplo).

Obrázek 3: Kogenerační jednotka se spalovacím motorem ČOV Ústí n. Labem. (Zdroj: Motorgas, s r.o.)

Plynová kombinovaná výroba elektřiny a tepla se provádí přímým spalováním plynu (zemního, bioplynu nebo procesního - např. koksárenského) ve **spalovacím motoru** nebo **spalovací turbíně** pohánějící generátor elektřiny. Využívá se teplo z chlazení motoru a ze spalin za motorem nebo plynovou turbínou.

Kogenerační jednotka se **spalovacím motorem** se skládá ze zážehového spalovacího motoru pohánějícího přímo alternátor vyrábějící elektřinu a výměníků pro využití odpadního tepla z motoru. Odpadní teplo z motoru je odváděno pomocí dvou výměníků na dvou teplotních úrovních. První výměník odvádí teplo z bloku motoru a z oleje na úrovni cca 80 - 90 °C. Druhý výměník odvádí teplo z odcházejících výfukových spalin o teplotě cca 400 - 500 °C. Výměníky jsou z hlediska průtoku teplonosného média zapojeny do série. Obvykle jsou kogenerační jednotky koncipovány pro dodávku tepla do teplovodního systému 90/70 °C, méně již do systému 110/85 °C resp. 130/90 °C. **Kogenerační jednotky se zážehovými spalovacími motory** se dodávají o el. výkonech v rozsahu od cca 20 kW do 5000 kW.



Obrázek 4: Blokové schéma kogenerační jednotky.

Kogenerační jednotka se **spalovací turbínou** se skládá ze soustrojí **spalovací turbína-alternátor** vyrábějícího elektřinu a **spalinového kotle**. Zemní plyn pro pohon turbíny je nutno přivádět pod tlakem cca 1,5 - 2,5 MPa dle kompresního poměru turbíny. Spaliny z turbíny jsou přiváděny do spalinového kotle k výrobě tepla ve formě **páry** nebo **horké** resp. **teplé vody**. Při požadavku na zvýšení tepelného výkonu spalinového kotle je instalován tzv. **dohořívací (přihřívací) hořák** na zemní plyn (hořák používající jako okysličovadlo spaliny ze spalovací turbíny). Ten je vřazen do spalin proudících z turbíny do kotle a zvyšuje teplotu spalin přicházejících z turbíny (cca 450 - 600 °C) na maximální teplotu 900 °C. Hlavní výhodou kogeneračních jednotek se spalovacími turbínami proti kogeneračním jednotkám se spalovacími motory je možnost volby média, kterým je odváděno teplo ze spalinového kotle. Kogenerační jednotky se **spalovacími turbínami** se dodávají o elektrickém výkonu v rozsahu od cca 1 MW do 200 MW.

Stupeň konverze energie obsažené v primárním palivu na elektřinu je oproti parní kogeneraci podstatně vyšší cca 23 - 41 %, účinnost výroby tepla je cca 35 - 57 %. Celková účinnost využití energie v palivu činí cca 68 - 90 %. Cenou za vyšší podíl vyráběné el. energie je ale nutnost spalování plynného paliva, tzn. ve většině případů drahý zemní plyn. Jako alternativní plynné palivo je možno použít i bioplyn nebo jiný odpadní plyn. Nízká výhřevnost těchto plynů však vyžaduje konstrukční úpravy motoru či turbíny a navíc se projevuje nižší elektrickou účinností.

Parní kombinovaná výroba elektřiny a tepla se provádí prostřednictvím páry vyrobené v parním kotli pomocí fosilních či nefosilních paliv (např. hnědé uhlí, biomasa). Pára se přivádí do **parního motoru, protitlaké** nebo **kondenzační odběrové** parní turbíny, kterými se pohání generátor elektrické energie. Teplo ve formě páry, jejíž tlak odpovídá konstrukci stroje nebo požadované teplotní úrovni tepelné energie, se odebírá z výfuku parního stroje, z protitlaku (odběru) parní turbíny.

Pro nižší elektrické výkony (cca 50 kW - 15 MW) jsou dodávána soustrojí s protitlakými turbínami **axiálními** nebo **radiálními** (pro vyšší výkony pouze s turbínami axiálními), které pohání přes

převodovku alternátor. Z hlediska dosahované termodynamické účinnosti jsou výhodné moderní rychloběžné radiální turbíny jednostupňové nebo dvoustupňové s malou měrnou hmotností a krátkou dobou najíždění. Turbíny axiální i radiální jsou v uvedeném výkonovém rozsahu konstruované pro vstupní/výstupní tlak páry 0,9 - 6,5/0,1 - 0,7 MPa a teplotu páry 200 - 450 °C. Regulace elektrického výkonu soustrojí je zajištěna regulačním ventilem na přívodu páry do turbíny, případně navíc natáčivými statorovými lopatkami.

Celková účinnost využití energie obsažené v primárním palivu je cca 77 - 87 %, přičemž dominantní je účinnost výroby tepla (v závislosti na tlaku před a za turbínou cca 62 - 76 %). Účinnost výroby elektřiny se pohybuje mezi 8 - 20 %. Stupeň zhodnocení primárního paliva na elektřinu je tedy nízký. Oproti plynové kombinované výrobě elektřiny a tepla je však výhodou možnost spalování levného paliva (uhlí) nebo obnovitelného paliva - biomasy.

Paroplynová kombinovaná výroba elektřiny a tepla je snahou o maximální podíl výroby elektřiny, což je zajištěno kombinací dvou turbosoustrojí se spalovací a parní turbínou.

Pára, která se vyrábí ve spalinovém kotli odpadním teplem ze spalovací turbíny, pohání soustrojí s parní turbínou. Někdy se část vyrobené páry vstřikuje do spalovací komory spalovací turbíny. Teplo se získává ze spalin spalovací turbíny a z protitlaku (odběru) parní turbíny. Ojediněle se vyskytuje i kombinace parní turbíny se spalovacím motorem.

Jinými slovy pára vyrobená v kotli využitím tepla spalin ze spalovací turbíny pohání **ještě** parní turbínu. Poměrem dodávky paliva do spalovací komory turbíny a spalinového kotle je potom dán poměr výkonu spalovací a parní turbíny. U větších instalací se obvykle používá dvoutlakového spalinového kotle a tomu odpovídající dvoutlakové parní turbíny. Poměr elektrických výkonů turbosoustrojí se spalovací a parní turbínou je většinou přibližně 3:1 až 4:1.

Podstatou tohoto typu kombinované výroby tepla a elektrické energie je dosažení maximálního podílu výroby elektrické energie, který může přesáhnout až 44 % z přivedeného tepla v palivu. Jinak v paroplynovém cyklu platí stejné možnosti a omezení jako u cyklu plynového.

Kombinovaná výroba elektřiny a tepla palivovými články je založena na principu chemické reakce plynu s okysličovadlem v tzv. **palivovém článku** tvořeném vhodnými elektrodami a elektrolytem. Nejobvyklejším palivem je vodík nebo zemní plyn, okysličovadlem vzduch. Zde dochází k přímé přeměně **chemicky vázané energie** v plynu na elektřinu a využitelné teplo.

Produktem reakce je **voda**, neboť se jedná se o proces inverzní k elektrolýze vody. V palivovém článku je vyráběn **stejnosměrný** elektrický proud, pro dodávku vyrobené elektřiny do sítě je tedy nutnou součástí **střídač**.

Elektrický generátor je u typových zařízení přizpůsoben ke snadnému připojení k veřejné elektrické síti. Při tzv. **ostrovním provozu**, kdy generátor dodává proud pouze pro vlastní potřebu bez připojení na síť, vzrůstají náklady na regulaci.

Obrázek 5: Kogenerační jednotka se spalovacím motorem, teplárna Studénka v Nové Pace. (Zdroj: Motorgas, s r.o.)

výběr vhodných lokalit a zásady pro dimenzování

Při rozhodování o typu a instalovaném výkonu kogenerační jednotky je nutno brát do úvahy všechna výše uvedená hlediska. Zejména je nutné přihlížet k provozním podmínkám investora či provozovatele kombinované výroby elektřiny a tepla:

- denní a roční **harmonogram spotřeby tepla a elektřiny** (u komunálních zdrojů jen tepla, elektřina je dodávána do sítě),
- druh požadovaného **teplonosného média**,
- **dostupnost** jednotlivých paliv,
- stávající **instalovaný výkon** kotlů a jejich teplotní a tlakové parametry.

Příklad: Do daného subjektu je teplo dodáváno z parních kotlů o vyšším tlaku a teplotě. Je spalováno **levné palivo** (uhlí, těžký topný olej). Pak je přes redukční stanici při instalaci **parní kogenerace** (paralelně k redukční stanici) zajištěna relativně dobrá návratnost investičních prostředků. Pokud však takový subjekt má **vyšší spotřebu elektřiny vůči spotřebě tepla**, není efekt výroby elektrické energie v parní kogeneraci výrazný.

Naopak **kogenerační jednotky se spalovacími motory** (s podstatně vyšší výrobou elektřiny vůči teplu) je možno instalovat jen v těch případech, kdy je možno využít vyrobené teplo ve formě teplé (90/70 °C) nebo horké vody (110/85 °C) a daný subjekt je plynofikován s dostatečnou kapacitou dodávky plynu.

V průmyslových závodech, kde je odběr tepla vázán na dodávku páry, je možno instalovat pouze **kogenerační jednotku se spalovací turbínou nebo paroplynovou jednotku**.

Kogenerační jednotky se spalovacími turbínami nebo jednotky paroplynové je ekonomicky opodstatněné instalovat pouze do průmyslových nebo komunálních objektů (s výměníky pára/voda) a jen s vysokými instalovanými výkony (řádově desítky MW).

Vhodným ukazatelem investiční náročnosti kombinované výroby tepla a elektřiny je měrná investiční náročnost instalovaného elektrického výkonu (Kč/kW_e). Tato hodnota se

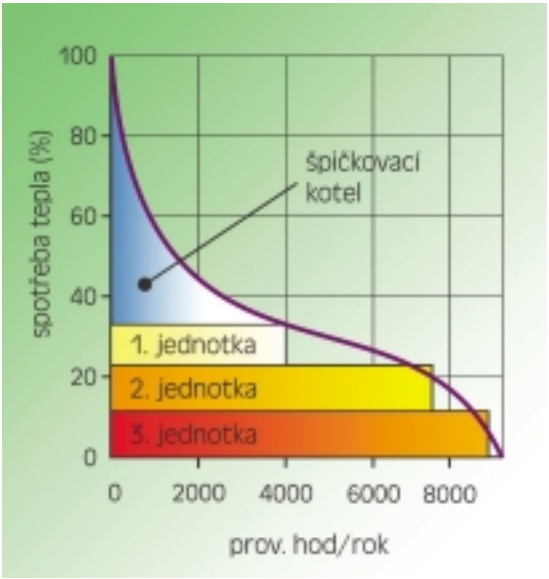
pohybuje v rozmezí cca 10 - 40 000 Kč/kW$_e$ a obecně klesá s rostoucím instalovaným výkonem (bez stavebních nákladů a nákladů na vyvedení elektrického a tepelného výkonu jednotky). Nejnižší investiční náročnost je u parních kogenerací a nejvyšší u paroplynových jednotek.

Ukazatel provozní náročnosti jednotky je cena provozu bez paliva vztažená na 1 kWh vyrobené elektrické energie (Kč/kWh). Např. pro prvních 40 až 55 tisíc hodin provozu kogenerační jednotky s plynovým motorem se tato položka pohybuje dle údajů výrobců v rozsahu 0,16 až 0,35 Kč/kWh.

Rozhodnutí o instalaci kogenerační jednotky však musí předcházet pečlivý ekonomický rozbor jejího provozu. Vhodnými ekonomickými ukazateli pro tyto případy jsou zejména **čistá současná hodnota**, NPV (Net Present Value), čili **diskontovaný tok hotovosti**, DCF (Discount Cash Flow) a **minimální cena produkce energie** c_{PEmin}, která se z pohledu investora vypočítá z podmínky NPV = 0.

Jednotku je třeba provozovat tak, aby kromě vyrobené elektřiny bylo maximálně využito i vyrobené teplo. Pro splnění uvedených podmínek je tedy nutné výkon kogenerační jednotky vhodně dimenzovat ve vztahu k průběhu denního i ročního diagramu odběru elektřiny a tepla a k ceně, za kterou lze vyrobenou elektřinu a teplo zhodnotit.

Velikost kogenerační jednotky se tedy odvozuje od spotřeby tepla v daném subjektu. Kogenerační jednotka může pokrývat základní spotřebu tepla, špičky pak pokrývá jiný zdroj, např. plynový kotel. Častější však je volba výkonnější jednotky v kombinaci s akumulací tepla. Pak se kogenerační jednotka uvádí do provozu tak, aby dodávala proud v době, kdy je nejvýhodnější tarif výkupních cen elektřiny.



Obrázek 6: Pokrytí roční spotřeby tepla třemi kogeneračními jednotkami a špičkovacím kotlem.

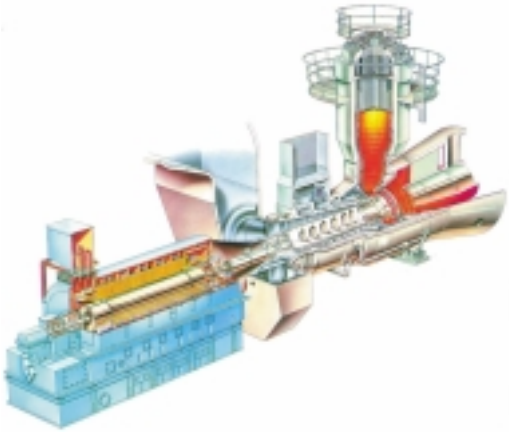
Při rozhodování o investici do kogenerace záleží zejména na ceně tepla, které spotřebováváme, resp. na ceně, za kterou můžeme toto teplo získat jiným způsobem, a na výkupních cenách energie. Zejména druhý faktor bývá rozhodující a závisí na dohodě s příslušným elektrorozvodným podnikem. V neposlední řadě závisí možnost použití i na způsobu financování stavby (výše úvěru, úroků, doba splatnosti).

legislativa a povolovací řízení

Ačkoli podle platného energetického zákona je možno prodávat jak vyrobené teplo tak elektřinu, v praxi je velmi obtížné splnit technické požadavky správce tepelné sítě. Proto se kogenerační jednotka navrhuje tak, aby veškeré teplo spotřeboval provozovatel. Elektřinu pak může podle potřeby buď spotřebovat sám, nebo ji prodávat do sítě.

Komerčně dostupné kogenerační jednotky splňují příslušné bezpečnostní a emisní parametry, takže jejich instalace je z tohoto hlediska bez problémů. Vzhledem k poněkud hlučnějšímu provozu je třeba při stavebním řízení prokázat, že okolí nebude obtěžováno nadměrným hlukem. Podle hygienických předpisů MZ ČR, vyhláška č. 13/1977 Sb., je nejvyšší přípustná hladina hluku ve venkovním prostoru na obytném území příměstském u menších sídelních útvarů ve dne 50 dB a v noci 40 dB. Tyto hodnoty lze při instalaci kogenerační jednotky s protihlukovým krytem dodržet.

Obrázek 7: Pohled zhora na kogenerační jednotku s plynovým motorem. (Zdroj: Motorgas, s r.o.)



Obrázek 8: Schéma kogenerační jednotky s plynovou turbínou. (Zdroj: firma ABB.)

použitá a doporučená literatura

[1] Hrdlička, F., Dlouhý, T., Kolovratník, M.: Průmyslová energetika. ČVUT, Praha, 2000.

[2] Kol. autorů: Katalog firem 2002 - 2003, obnovitelné zdroje energie. EkoWATT, Praha, 2002.

Vydal:
EkoWATT, středisko pro obnovitelné zdroje a úspory energie
Bubenská 6, 170 00 Praha 7
tel.: +420 266 710 247
fax: +420 266 710 248
e-mail: ekowatt@ekowatt.cz
http://www.ekowatt.cz, www.energetika.cz

Autoři textů: Jiří Beranovský, Karel Srdečný, Jan Truxa
Spolupráce: Radim Bařinka, František Hrdlička, Evžen Přibyl, Libor Šamánek, Jiří Vašíček, Jaroslav Knápek
Grafický návrh: Irena a Saša Mandić
Realizace: Helvetica & Tempora, spol. s r. o., Pod Kaštany 8, Praha 6

© EkoWATT, 2002

Podrobnější informace lze získat také v celostátní síti Energetických informačních a konzultačních středisek České energetické agentury (EKIS ČEA), jejichž seznamy jsou uveřejněny např. na internetové adrese http://www.ceacr.cz.

Publikace je určena pro poradenskou činnost a byla zpracována v rámci Státního programu na podporu úspor energie a využití obnovitelných zdrojů energie pro rok 2002 - část A. Byla vydána díky laskavé podpoře České energetické agentury a Nadace Partnerství.