

SBORNÍK TECHNICKÝCH ŘEŠENÍ ZDROJŮ S KOMBINOVANOU VÝROBOU ELEKTŘINY A TEPLA



ORTEP, s.r.o.
Ing. Josef Karafiát, CSc. a kolektiv

Praha, říjen 2006

SBORNÍK TECHNICKÝCH ŘEŠENÍ ZDROJŮ S KOMBINOVANOU VÝROBOU ELEKTŘINY A TEPLA

ORTEP, s.r.o.

Ing. Josef Karafiát, CSc. a kolektiv

Publikace

Publikace je určena pro poradenskou činnost a byla zpracována v rámci Státního programu na podporu úspor energie a využití obnovitelných zdrojů energie pro rok 2006 – část A.

Anotace

Cílem sborníku je seznámit nejširší laickou i odbornou veřejnost s problematikou kombinované výroby elektřiny a tepla, zvýšit tím celkové povědomí o této problematice a tím přispět k proklamovanému rozvoji KVET při eliminaci četných omylů a chyb, kterých se investoři často dopouštějí. V úvodní části sborníku jsou podány základní definice a výklady pojmů souvisejících se zdroji KVET a systémy CZT, následují popisy jednotlivých technologií, jejich technických a provozních parametrů, zásad dimenzování atd. V závěru sborníku jsou nastíněny budoucí perspektivy zdrojů KVET a zdůrazněno, že tento sborník je pomocníkem při hledání optimálních technických řešení, nikoli návodem jak zajistit ekonomickou efektivnost projektů na instalaci zařízení s KVET.

Určení

Publikace je určena především potenciálním investorům a zájemcům o instalaci a provoz zařízení s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla. Publikace je také určena široké odborné veřejnosti jako základní vzdělávací literatura, rovněž tak může být využita jako studijní materiál pro střední a vysoké školy s odborným zaměřením na problematiku energetiky.

Rozsah

Publikace je rozdělena do 7 kapitol, klíčovou kapitolou celé publikace je kapitola 5. popisující nejčastěji používané skupiny technologií KVET. Celkový rozsah publikace je 66 stran textu, obsahuje i řadu dokumentačních obrázků, tabulek a diagramů.

Obsah

	Str.
1. ÚVOD	4
2. PRINCIPY KVET A JEJÍ EFEKTY	5
3. CHARAKTERISTICKÉ UKAZATELE ZDROJŮ KVET	7
3.1 Teplárenský modul	7
3.2 Účinnost zdrojů KVET	8
3.3 Doba provozu a doba využití maxima	8
3.4 Teplárenský součinitel	9
4. PODMÍNKY PRO UPLATNĚNÍ ZDROJŮ KVET	10
5. TECHNOLOGIE ZDROJŮ KVET	15
5.1 Parní protitlakové turbíny (PPT)	15
5.1.1 Popis zařízení a princip funkce PPT	15
5.1.2 Základní technické parametry PPT	16
5.1.3 Základní provozní a technologické vlastnosti PPT	17
5.1.4 Zásady dimenzování a způsobu provozu PPT	18
5.1.5 Souhrn hlavních výhod a nevýhod PPT	20
5.2 Parní odběrové turbíny (POT)	22
5.2.1 Popis zařízení a princip funkce POT	22
5.2.2 Základní technické parametry POT	23
5.2.3 Základní provozní a technologické vlastnosti POT	24
5.2.4 Zásady dimenzování a způsobu provozu POT	25
5.2.5 Souhrn hlavních výhod a nevýhod POT	27
5.3 Plynové turbíny s rekuperací tepla (GTRT)	28
5.3.1 Popis zařízení a princip funkce GTRT	28
5.3.2 Základní technické parametry GTRT	29
5.3.3 Základní provozní a technologické vlastnosti GTRT	30
5.3.4 Zásady dimenzování a způsobu provozu GTRT	31
5.3.5 Souhrn hlavních výhod a nevýhod GTRT	34
5.4 Paroplynové cykly (PPC)	35
5.4.1 Popis zařízení a princip funkce PPC	35
5.4.2 Základní technické parametry PPC	36
5.4.3 Základní provozní a technologické vlastnosti PPC	37
5.4.4 Zásady dimenzování a způsobu provozu PPC	38
5.4.5 Souhrn hlavních výhod a nevýhod PPC	40

	Str.
5.5 Spalovací pístové motory (PM)	42
5.5.1 Popis zařízení a princip funkce PM	42
5.5.2 Základní technické parametry PM	43
5.5.3 Základní provozní a technologické vlastnosti PM	44
5.5.4 Zásady dimenzování a způsobu provozu PPT	45
5.5.5 Souhrn hlavních výhod a nevýhod PM	48
5.6 Další technologie KVET	49
5.6.1 Mikroturbína	49
5.6.2 Stirlingův motor	51
5.6.3 Palivový článek	53
5.6.4 Parní stroj	55
5.6.5 Organický Rankinův cyklus	57
6. PERSPEKTIVY ZDROJŮ KVET	59
6.1 Velké teplotenské zdroje	59
6.2 Malé a střední zdroje KVET	60
6.3 Celkový potenciál pro uplatnění zdrojů KVET	61
7. ZÁVĚR	63
SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ	64
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	66

1. ÚVOD

Kombinovaná výroba elektřiny a tepla (KVET) se stala obecně uznávaným prostředkem vedoucím k úsporám ve spotřebě primární energie a ke snížení zatížení životního prostředí.

Potřeby elektrické energie a užitného tepla v moderní době jsou neoddiskutovatelné. Obě formy energie lze vyrábět buď odděleně, potom je zpravidla výroba elektrické energie zatížena značnými energetickými ztrátami, a nebo za vhodných podmínek i sdruženě (kombinovaně), kdy lze užitečně využít menší či větší část odpadního tepla z výroby elektřiny.

Kombinovanou výrobou elektřiny a tepla (KVET) se tedy rozumí přeměna primární energie na energii elektrickou a užitečné teplo ve společném současně probíhajícím procesu v jednom výrobním zařízení.

Podpora rozvoji kombinované výroby elektřiny a tepla je deklarována ve Státní energetické koncepci, ve Státní politice životního prostředí a je zakotvena v energetickém zákoně č. 458/2000 Sb.

Kombinovaná výroba elektřiny a tepla našla svoji oporu i v evropské legislativě, a to v podobě přijaté Směrnice Evropského parlamentu a Rady EU 2004/8/ES o podpoře KVET. Za hlavní důvody přijetí této směrnice lze považovat potřeby zvýšení bezpečnosti zásobování energiemi (diverzifikace zdrojů), dosažení úspor paliv (jako součást Kjótského protokolu), prevenci v omezování emisí znečišťujících látek do ovzduší a snižování celkové energetické náročnosti ve výrobě, distribuci a spotřebě energií.

Předmětem tohoto sborníku je seznámit nejširší laickou i odbornou veřejnost s principy funkce zdrojů KVET, s jejich základními technickými parametry, provozními a technologickými omezeními a s podmínkami pro jejich efektivní uplatnění.

Cílem je podpořit rozvoj KVET v reálných podmínkách provozu veřejných, závodových či areálových energetických zdrojích tak, aby tyto plnily základní funkce energeticky úsporného a provozně efektivního zdroje a předešlo se tak případným nedorozuměním nebo zklamáním z nenaplněných očekávání.

2. PRINCIPY KVET A JEJÍ EFEKTY

Významným příspěvkem k racionalizaci procesu výroby užitečných forem energií je tzv. kombinovaná výroba elektřiny a tepla (dále KVET).

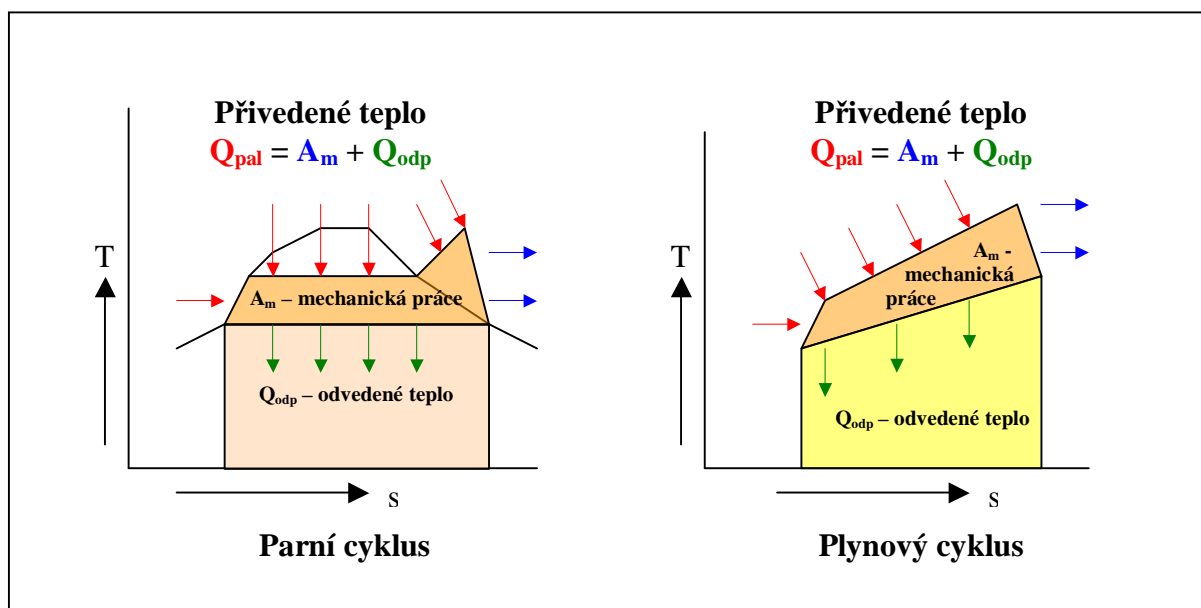
U energie jako takové je třeba kromě kvantity (energetického obsahu) brát v úvahu i její kvalitu, tj. schopnost transformace na jiné formy (tzv. exergii). Energie se totiž vyskytuje v řadě forem, od mechanické, kterou lze snadno transformovat na ostatní formy energie, přes elektrickou až po vysokopotenciální teplo, které lze na jiné formy energie transformovat pouze částečně, či nízkopotenciální teplo, které dále transformovat již v podstatě nelze.

Nejvyšší společenská poptávka je pochopitelně po té formě energie, která je nejlépe distribuovatelná a nejlépe transformovatelná na ostatní formy. Takovouto formou je energie elektrická. Elektrickou energii můžeme vyrobit (transformovat) např. z chemické nebo solární energie, nejčastěji však z energie mechanické (mechanické práce).

Mechanickou práci lze získat z potenciální energie vody, z kinetické energie větru, a pokud je těchto nedostatek, což je v našich zeměpisných a klimatických podmínkách běžné, také prostřednictvím parních, nebo plynových termodynamických cyklů.

V parních nebo plynových cyklech využíváme tepla uvolňovaného spalováním paliva (vysokopotenciální teplo), které však má, jak již bylo řečeno, omezenou transformovatelnost na mechanickou práci, což vyjadřuje druhý termodynamický zákon.

Omezenou transformovatelnost tepelné energie na mechanickou práci lze graficky znázornit na T-s diagramech parního cyklu, nebo plynového cyklu (kde nedochází ke změně skupenství pracovní látky), jak je uvedeno na obrázku č. 2.1.



Obrázek č. 2.1 Znázornění parního a plynového cyklu v T-s diagramech

Jak je patrné z uvedeného obrázku, maximální účinnosti cyklů dosáhneme při maximálních rozdílech horních a dolních pracovních teplot cyklů. Horní teplotní úroveň je limitována zpravidla mechanickými vlastnostmi konstrukčních materiálů či pracovní látky daného stroje, spodní teplotní úroveň pak možnostmi odvézt teplo do okolí, tedy zpravidla teplotou venkovního vzduchu nebo chladicí vody (u parních cyklů).

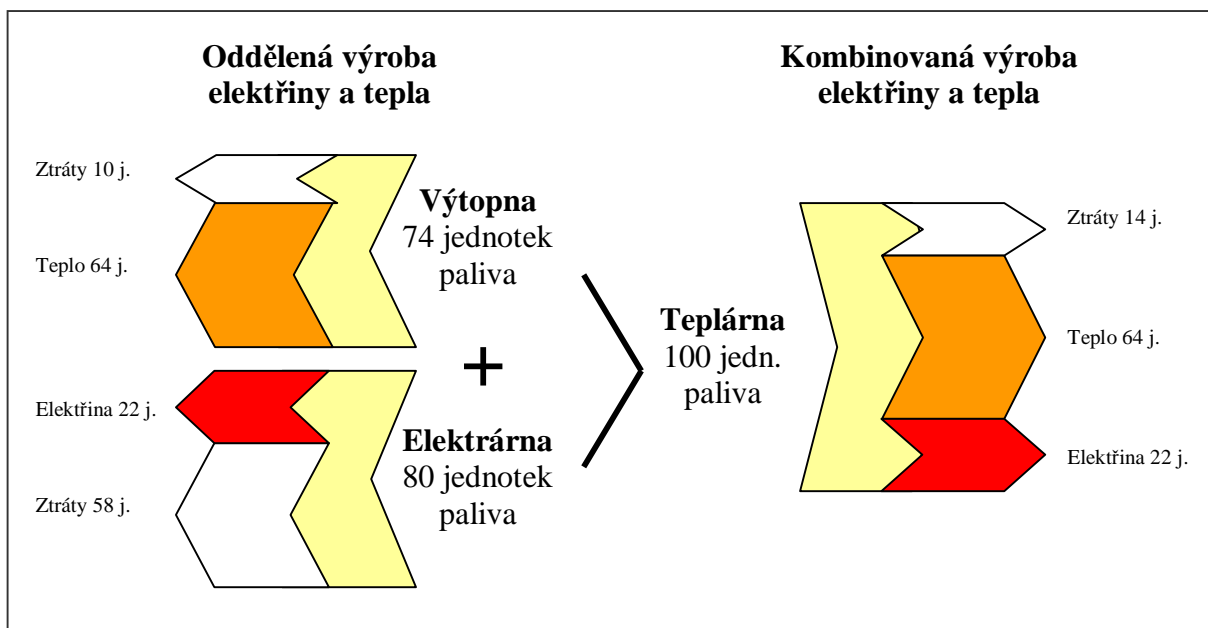
Snahou procesu KVET je kromě získané mechanické (elektrické) práce efektivně využít i co největší část tzv. „odpadního“ tepla, byť za cenu mírného snížení podílu získané mechanické (elektrické) práce vlivem zvýšení spodní teplotní úrovně cyklu na hodnoty využitelné pro topné, nebo technologické účely.

Myšlenka využití části odpadního tepla z parního, nebo plynového cyklu není zdaleka nic nového, koneckonců první energetické zdroje – závodové elektrárny (teplárny) budované na přelomu 19. a 20. století v takovémto režimu pracovaly.

S rozvojem industrializace země však potřeby „nové“ elektrické energie rostly výrazně rychleji, než potřeby „tradičního“ tepla. Byly tak budovány elektrárny o větších jednotkových výkonech, tyto byly díky snadnému přenosu elektřiny, ale i z ekologických důvodů, lokalizovány mimo městské aglomerace, zpravidla blíže zdrojům paliva.

Výsledkem industriální epochy 20. století je dominující pozice velkých elektráren, produkujících ohromná kvanta odpadního tepla, pro které nemáme v ekonomických vzdálenostech dostatečný odbyt. Vznikla tak dvě samostatná odvětví – elektrárenství, řídicí se principem co nejbližší k palivu, co nejdále od měst a výtopenství, řídicí se principem co nejjednodušší řešení co nejbližší k odběratelům.

Důsledkem „odtržení“ elektrárenství a výtopenství jsou celkově vyšší spotřeby paliva v obou odvětvích, než by tomu bylo v případě jediného odvětví – teplárenství, tedy v případě kombinované výroby elektřiny a tepla. Výše popsany efekt je graficky znázorněn na obrázku č. 2.2.



Obrázek č. 2.2 Znárodnění efektu kombinované výroby elektřiny a tepla

3. CHARAKTERISTICKÉ UKAZATELE ZDROJŮ KVET

Při technickém popisu a provozním hodnocení jednotlivých technologií KVET se používá celá řada ukazatelů, zejména se jedná o :

- Teplárenský modul
- Účinnost výroby el. energie ve zdroji KVET
- Účinnost výroby tepla ve zdroji KVET
- Celková účinnost zdroje KVET
- Celková roční doba provozu zdroje KVET
- Doba využití maximálního výkonu zdroje KVET
- Výkonový teplárenský součinitel
- Roční teplárenský součinitel

Objasnění a výkladu výše uvedených pojmů budou věnovány následující odstavce :

3.1 Teplárenský modul

σ – Teplárenský modul KVET je definován jako podíl výroby elektřiny k výrobě užitečného tepla v zařízení KVET za určité časové období. Ačkoli se pro teplárenský modul používají různé názvy, různé symboly, a ne zcela shodné definice, podstata (význam) tohoto „ukazatele“ je zřejmá i z pohledu na jednoduchý výpočtový vztah :

$$\sigma = E_{KVET} / Q_{KVET} \quad [-]$$

kde : σ – Teplárenský modul [-]
 E_{KVET} – Elektřina vyrobená v procesu KVET [GJ, MWh]
 Q_{KVET} – Teplo vyrobené v procesu KVET [GJ, MWh]

Hodnoty σ jsou dány konstrukcí a typem příslušné technologie KVET, ovlivňovány jsou pak způsobem provozu (u většiny technologií se při změně zatížení mění i poměr okamžitého elektrického a tepelného výkonu) a parametry odebíraného tepla (teplotní, v případě turbín i tlakovou úrovní).

Poznámka : Název „teplárenský modul“ a symbol „ σ “ jsou tradiční název a tradiční symbol používané v české odborné literatuře. Současná česká legislativa používá namísto názvu teplárenský modul výraz „směrné číslo vyjadřující poměr výroby elektřiny v zařízení KVET“ a namísto symbolu σ symbol „ y “. Současná evropská legislativa používá název „poměr vyráběné elektřiny a tepla v procesu KVET“ a symbol „ C “. Manuál pro určení KVET dle CEN/CENELEC používá název „poměr elektřiny k teplu“ a symbol „ σ_{CHP} “.

3.2 Účinnosti zdrojů KVET

η_{KVET}^{el} - Účinnost výroby elektrické energie ve zdroji KVET představuje podíl elektřiny vyráběné formou KVET ku celkové spotřebě tepla v palivu ve zdroji KVET (tj. tepla v palivu pro výrobu elektřiny i tepla ve zdroji KVET). Vypočte se podle vztahu :

$$\eta_{KVET}^{el} = (E_{KVET} / Q_{pal-KVET}) \cdot 100 \quad [\%]$$

Kde : E_{KVET} - elektřina vyráběná ve zdroji KVET [GJ, MWh]
 $Q_{pal-KVET}$ - spotřeba tepla v palivu ve zdroji KVET [GJ, MWh]

η_{KVET}^q - Účinnost výroby užitečného tepla ve zdroji KVET představuje podíl užitečného tepla vyráběného formou KVET ku celkové spotřebě tepla v palivu ve zdroji KVET (tj. tepla v palivu pro výrobu tepla i elektřiny ve zdroji KVET). Vypočte se podle vztahu :

$$\eta_{KVET}^q = (Q_{už-KVET} / Q_{pal-KVET}) \cdot 100 \quad [\%]$$

Kde : $Q_{už-KVET}$ - užitečné teplo vyráběné ve zdroji KVET [GJ, MWh]
 $Q_{pal-KVET}$ - spotřeba tepla v palivu ve zdroji KVET [GJ, MWh]

η_{KVET}^{celk} - Celková účinnost zdroje KVET představuje podíl celkové elektřiny a užitečného tepla vyráběného formou KVET ku celkové spotřebě tepla v palivu ve zdroji KVET. Vypočte se podle vztahu :

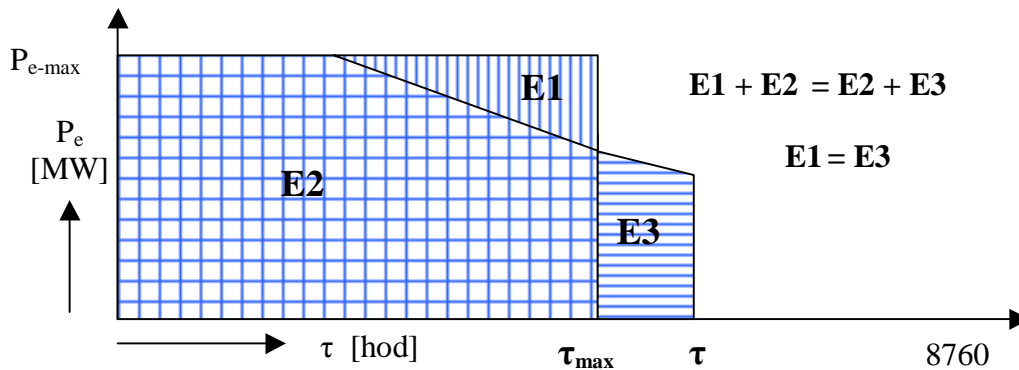
$$\eta_{KVET}^{celk} = [(E_{KVET} + Q_{už-KVET}) / Q_{pal-KVET}] \cdot 100 = \eta_{KVET}^{el} + \eta_{KVET}^q \quad [\%]$$

3.3 Doba provozu a doba využití maxima

τ - Celková doba provozu zdroje KVET představuje součet všech hodin provozu v průběhu celého roku bez rozlišení, zda se jednalo o provoz na částečný výkon nebo na trvalý výkon, zda se jednalo o provoz nepřetržitý v jednom časovém úseku, nebo přerušovaný, atd. Celková doba provozu se uvádí v hodinách. Počty provozních hodin jsou obvykle u každého zdroje KVET evidovány a u některých typů zdrojů jsou směrodatné pro určení doby provedení oprav, běžné údržby či jiné servisní činnosti.

τ_{max} - Doba využití maxima (maximálního výkonu) je fiktivní doba, za kterou by bylo při stálém maximálním výkonu vyrobeno (dodáno) stejné množství energie, jako je tomu při reálném provozu zdroje v průběhu celého roku.

Doba využití maxima zdroje KVET se obvykle vztahuje na elektrický výkon, způsob jejího stanovení je zřejmý z obrázku č. 3.3.1, na kterého je rovněž patrný rozdíl mezi celkovou roční dobou provozu τ a dobou využití maxima τ_{\max} .



Obrázek č. 3.3.1 Znárodnění významu doby využití maxima elektrického výkonu zdroje KVET

3.4 Teplárenské součinitele

α - Výkonovým teplárenským součinitelem se rozumí poměr maximálního tepelného výkonu zdroje KVET ku maximálnímu tepelnému příkonu soustavy CZT. Vypočte se podle vztahu :

$$\alpha = P_{\max-KVET} / P_{\max-CZT} \quad [-]$$

Kde : $P_{\max-KVET}$ - Maximální dosahovaný tepelný výkon zdroje KVET [MW]
 $P_{\max-CZT}$ - Maximální tepelný příkon soustavy CZT [MW]

α_r - Roční teplárenský součinitel je definován jako podíl ročních dodávek tepla do soustavy CZT ze zdroje KVET ku celkovým potřebám tepla v soustavě CZT. Vypočte se podle vztahu:

$$\alpha_r = Q_{KVET} / Q_{CZT} \quad [-]$$

Kde : Q_{KVET} - Roční dodávky tepla do soustavy CZT ze zdroje KVET [GJ, TJ]
 Q_{CZT} - Roční potřeby tepla soustavy CZT [GJ, TJ]

4. PODMÍNKY PRO UPLATNĚNÍ ZDROJŮ KVET

Základní podmínkou pro uplatnění zdrojů KVET je existence dostatečného odbytu (potřeb) tepla v ekonomické vzdálenosti od místa lokalizace zdroje.

Zatímco elektrizační soustava (ES) se z pohledu zdroje KVET jeví jako globální systém, tzn. je schopna absorbovat celoročně prakticky libovolný elektrický výkon zdroje KVET (samozřejmě po příslušných úpravách na straně vyvedení elektrického výkonu), tepelná soustava, ať již se jedná o topný systém jednoho objektu nebo o rozsáhlý systém CZT, bude mít vždy lokální charakter, tzn. je schopna absorbovat pouze omezený tepelný výkon, a to navíc značně rozdílný v zimním a v letním období.

Právě velikost a charakter odbytu tepla jsou jedním z hlavních určujících faktorů pro volbu typu a výkonu příslušné technologie KVET. Dalšími faktory jsou dostupnost paliv v místě zdroje a požadované parametry dodávky tepla.

Mohou se však také vyskytnout případy, a často se také vyskytují např. u průmyslových podniků – odběratelů elektrické energie a spotřebitelů tepla, kdy hlavním kritériem pro volbu technologie a jejího výkonového vyložení bude pokrytí vlastní spotřeby elektrické energie.

Na distribuční síť elektřiny za předacím místem (např. trafostanicí vvn/vn, nebo i vn/nn) může být v těchto případech nahlíženo jako na lokální systém z vlastním zdrojem, který pouze dokupuje chybějící výkon z ES. I v těchto případech je však pro zachování vysoké účinnosti zdroje a efektivitu jeho provozu nezbytnou podmínkou existence trvalého odbytu užitečného tepla (zpravidla se jedná o technologickou spotřebu).

Užitečnou spotřebu tepla zpravidla tvoří teplo určené pro :

- Otop – potřeby závisí na venkovní teplotě a topném režimu daného objektu (např. noční útlumy topení v objektech občanské vybavenosti)
- Přípravu TUV – potřeby závisí na počtu osob a využití objektu (např. malá spotřeba pouze pro mytí rukou na úřadech a velká ve sportovních zařízeních se sprchami)
- Technologie – potřeby závisí na charakteru technologie a směnnosti provozu (např. teplo pro sušení, ohřevy lázní, zpracování a konzervaci potravin, atd.)

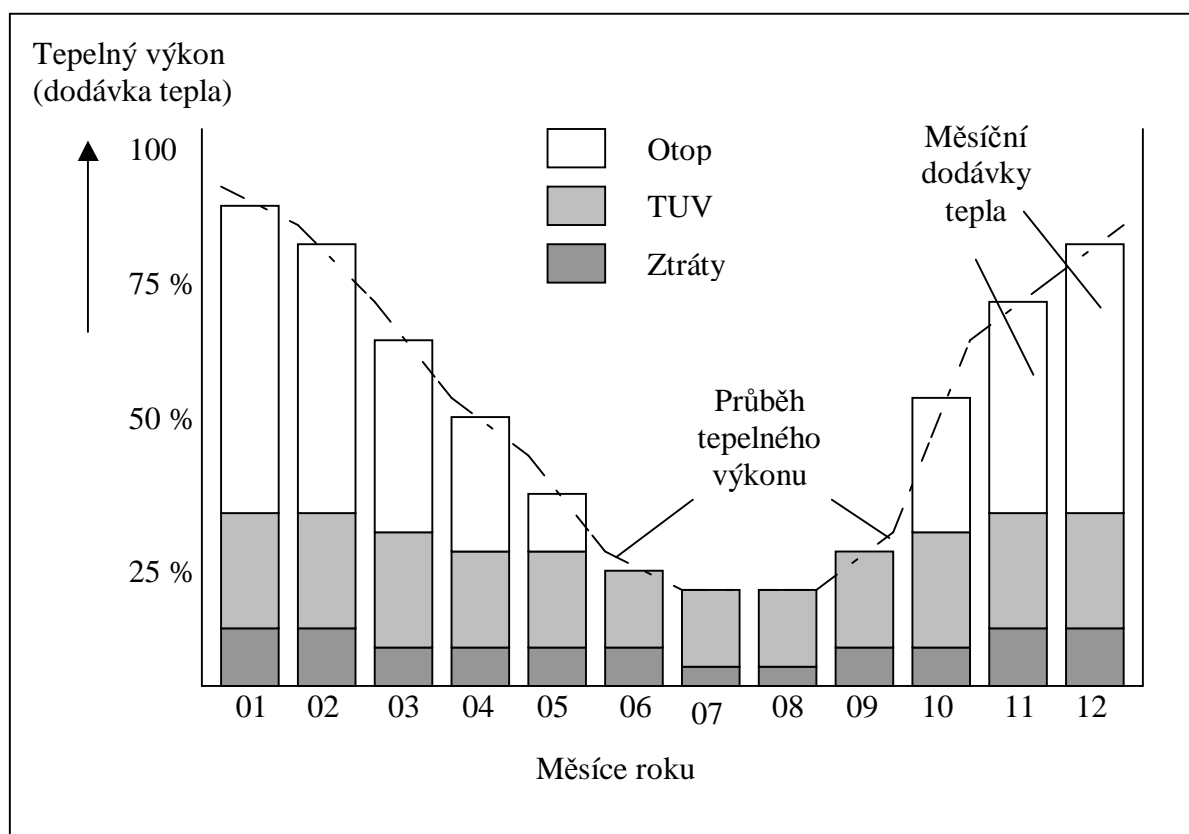
Z hlediska zdroje je třeba kromě potřeb užitečného tepla počítat i ze ztrátami v rozvodech tepla a v předávacích stanicích (jsou-li v systému instalovány). Ztráty tepla jsou způsobeny :

- Prostupem tepla - závisí především na vnitřní teplotě teplotnosného média, tloušťce a kvalitě tepelné izolace
- Únikem teplotnosného média - závisí na těsnosti potrubí, respektive na těsnosti kompenzátorů a armatur, na těsnosti ucpávek čerpadel, návratnosti kondenzátu u parních soustav, atd.

Celkové roční průběhy potřeb tepla lze znázornit buď ve formě týdenních či měsíčních diagramů průměrných potřeb tepla, nebo ve formě diagramů doby trvání tepelného výkonu.

Týdenní, nebo měsíční diagramy průměrných potřeb tepla jsou časově sousledně vynesené naměřené hodnoty (týdenní nebo měsíční odečty) výroby nebo dodávek tepla.

Typický měsíční diagram potřeb tepla s rozlišením účelů spotřeby (bez technologií) je uveden na obrázku č. 4.1.

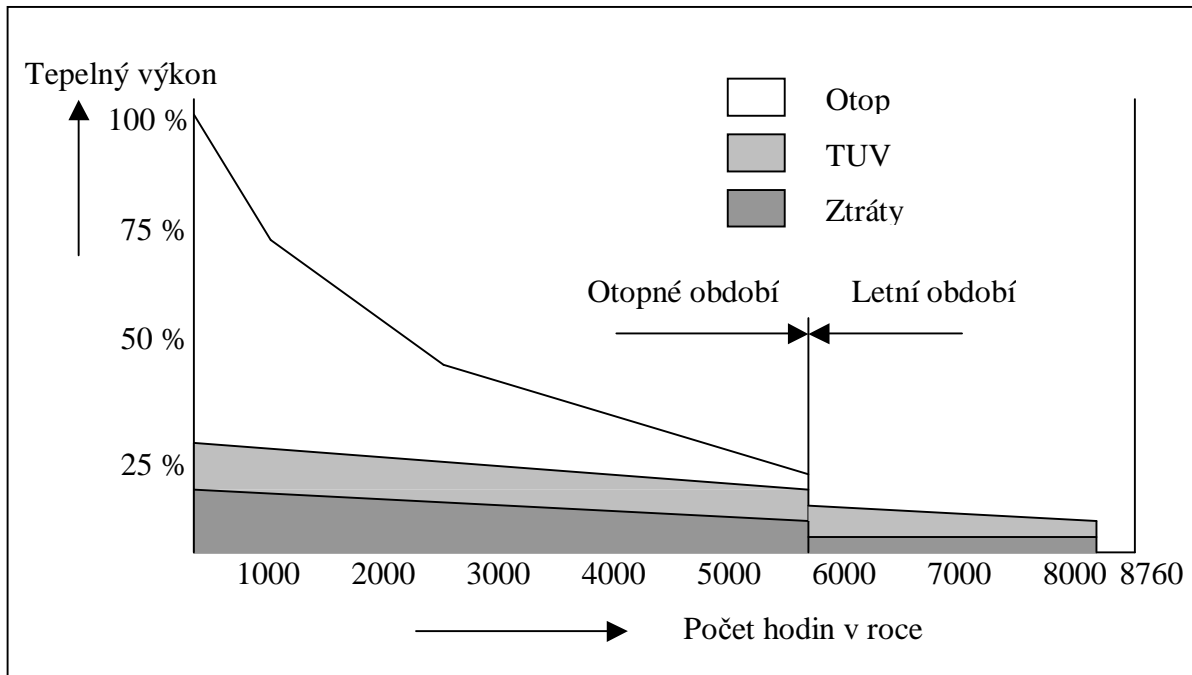


Obrázek č. 4.1 Typický měsíční diagram potřeb tepla s rozlišením účelů spotřeby

Diagramy doby trvání tepelného výkonu představují sestupně seřazené hodnoty okamžitých (hodinových) výkonových zatížení soustavy v průběhu celého roku.

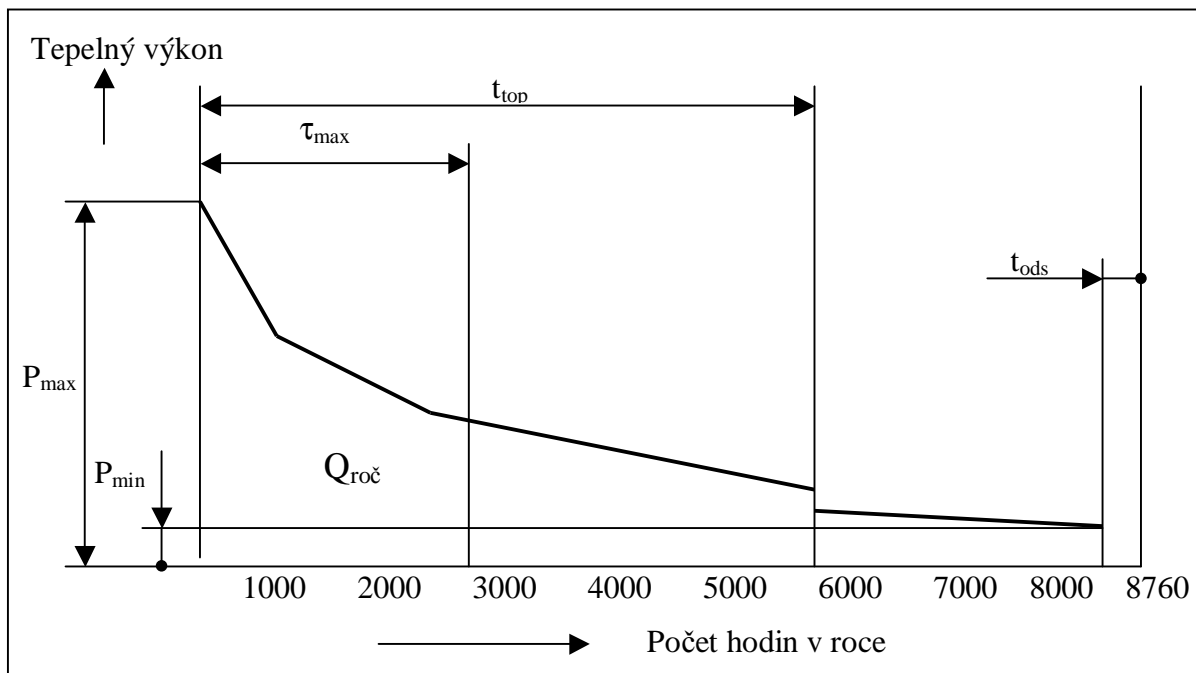
Tyto diagramy umožňují odečítat, kolik hodin bylo, je, nebo pravděpodobně bude zatížení soustavy vyšší, než výkon v příslušném časovém bodě.

Typický diagram doby trvání tepelného výkonu horkovodní SCZT včetně rozlišení spotřeby pro příslušné účely užití tepla (opět bez spotřeb pro technologie) je znázorněn na obrázku číslo 4.2.



Obrázek č. 4.2 Typický diagram doby trvání tepelného výkonu horkovodní SCZT

Na diagramu doby trvání potřeb tepla lze demonstrovat některé typické základní ukazatele teplárenských soustav, jak je uvedeno na následujícím obrázku č. 4.3.



Obrázek č. 4.3 Typické základní ukazatele teplárenských soustav

kde : $Q_{ro\check{c}}$ - roční celková dodávka tepla do SCZT (tvoří ji dodávka tepla pro otop, pro přípravu TUV, pro krytí ztrát v rozvodech a případně i pro technologické účely)

P_{max} - maximální výkonové zatížení teplárenské soustavy (zpravidla nastává při nejchladnějších pracovních dnech v roce v době ranních odběrových špiček)

P_{min} - minimální výkonové zatížení teplárenské soustavy (nastává v letním období, zpravidla ve volných dnech a v době dovolených v nočních hodinách)

t_{max} - doba využití maximálního tepelného výkonu (udává dobu, za kterou by byla realizována celková roční dodávka tepla $Q_{ro\check{c}}$ při max. zatížení teplárenské soustavy P_{max} .

t_{top} - doba trvání topné sezóny (tj. doba, po kterou je v zásobovaných objektech teplo využíváno pro otop)

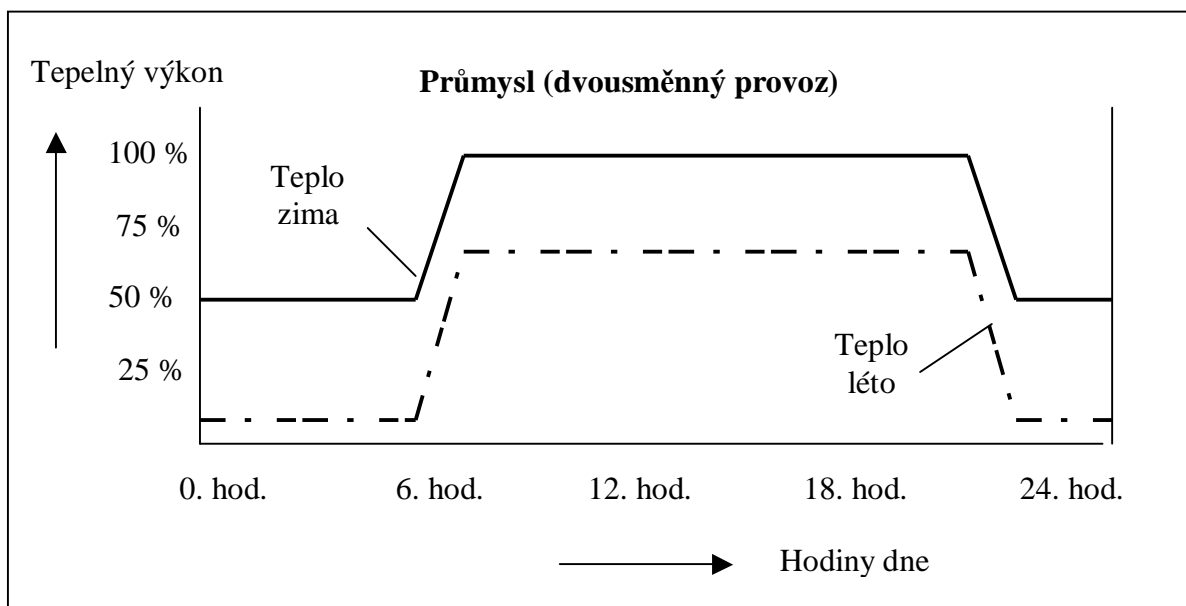
t_{ods} - doba odstávky v letním období (tj. doba, po kterou jsou dodávky tepla přerušeny z důvodu plánovaných oprav, nebo revizí zařízení).

Přehled o obvyklých hodnotách výše uvedených ukazatelů charakterizujících průběhy dodávek tepla je uveden na tabulce č. 4.1.

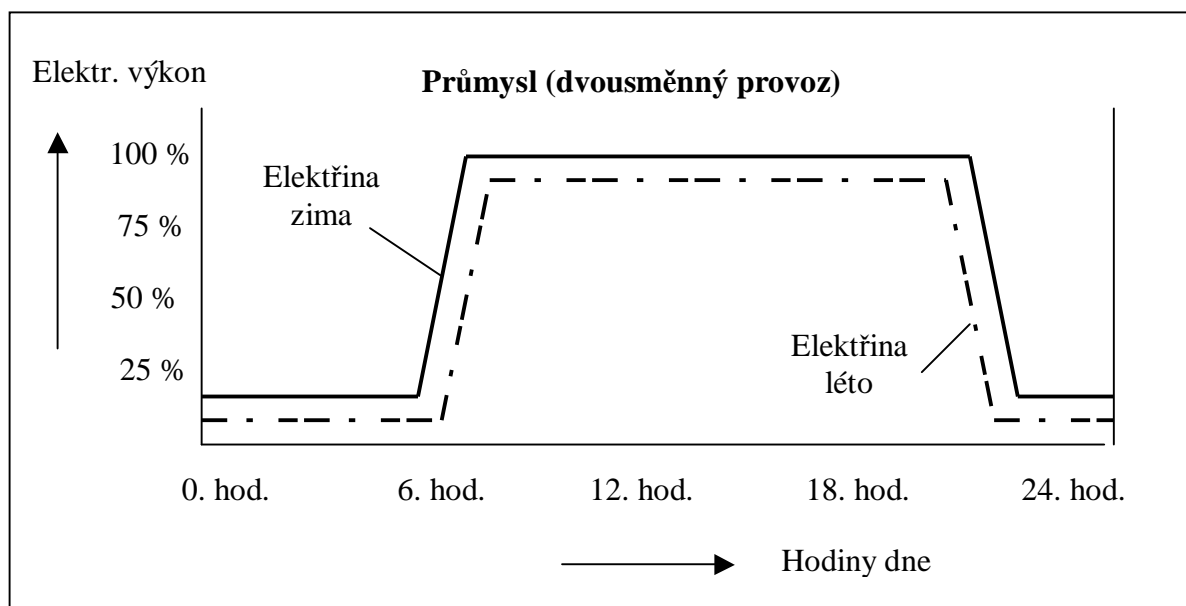
Tabulka č. 4.1 Obvyklé hodnoty základních ukazatelů charakt. průběhy dodávek tepla

		Větší průmyslová parní SCZT	Rozsáhlá městská parní SCZT	Rozsáhlá městská horkovodní SCZT	Menší okrsková horkovodní SCZT	Menší sídlištní teplovodní SCZT
$Q_{ro\check{c}}$ v tom	celkem	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	otop	17 %	36 %	66 %	68 %	69 %
	TUV	5 %	12 %	22 %	24 %	25 %
	technol.	60 %	30 %	-	-	-
	ztráty	18 %	22 %	12 %	8 %	6 %
P_{max} v tom	celkem	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
	otop	36 %	59 %	84 %	84 %	83 %
	TUV	7 %	10 %	11 %	13 %	15 %
	technol.	45 %	20 %	-	-	-
	ztráty	12 %	11 %	5 %	3 %	2 %
t_{max}	průměr.	4 500 hod.	3 200 hod.	2 500 hod.	2 300 hod.	2 100 hod.
t_{top}	max.	270 dnů	265 dnů	260 dnů	265 dnů	270 dnů
	průměr.	255 dnů	255 dnů	250 dnů	250 dnů	250 dnů
	min.	225 dnů	230 dnů	230 dnů	225 dnů	220 dnů
t_{ods}	průměr.	16 dnů	9 dnů	9 dnů	5 dnů	5 dnů

V případech, kdy určujícím prvkem pro dimenzování zdroje KVET jsou potřeby technologického tepla, nebo vlastní spotřeba elektrické energie, je nezbytné konstruovat i tzv. diagramy denních průběhů potřeb tepla a denních průběhů spotřeby elektrické energie, jejichž příklady jsou uvedeny na obrázcích číslo 4.4 a č. 4.5.



Obrázek č. 4.4 Typový průběh potřeb tepla v průběhu dne v zimním a letním období



Obrázek č. 4.5 Typový průběh potřeb el. energie v průběhu dne v zimním a letním období

Před každou volbou technologie a návrhem velikosti zdroje KVET je třeba bezpodmínečně znát (zkonstruovat) diagramy potřeby tepla (roční, měsíční, denní), popřípadě i diagramy potřeb elektrické energie (denní, týdenní, roční), jeli zdroj KVET určen výhradně pro krytí vlastních spotřeb.

5. TECHNOLOGIE ZDROJŮ KVET

Evropská, obdobně i česká legislativa definují základní technologie KVET, z nichž prvních pět je velice rozšířeno a běžně komerčně využíváno, další skupinu tvoří technologie, které mají dosud na trhu zanedbatelný podíl, nebo jejichž vývoj stále probíhá. Jedná se o :

- Parní protitlakovou turbínu
- Parní odběrovou turbínu
- Plynovou turbínu s rekuperací tepla
- Paroplynové zařízení s dodávkou tepla
- Spalovací pístový motor
- Další technologie KVET – mikroturbína, Stirlingův motor, palivový článek, parní stroj, organický Rankinův cyklus a kombinace uvedených technologií a zařízení.

Předmětem následujících kapitol bude pro výše uvedené technologie či skupiny technologií podat stručný přehled o zařízeních jako takových, o principech jejich funkce, technických parametrech, provozních vlastnostech, zásadách dimenzování, a o jejich hlavních výhodách a nevýhodách.

5.1 Parní protitlakové turbíny (PPT)

5.1.1 Popis zařízení a princip funkce PPT

Parní turbína je točivý stroj přeměňující část energie vstupní (admisní) páry na mechanickou práci.

Parní turbínu tvoří těleso statoru s vhodně uspořádanými rozváděcími koly pro usměrnění toku přiváděné páry, kterou jsou následně ofukovány lopatky rotoru umístěného v ose turbíny. Tlakovou energii páry působící na lopatky je rotor roztáčen, ten je následně schopen pohánět generátor – zdroj elektrické energie.

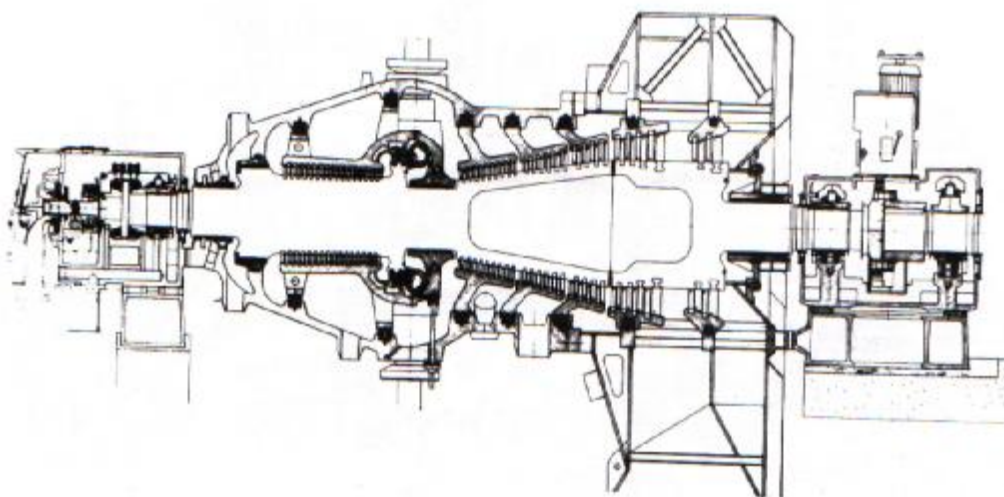
Pára procházející turbínou tak postupně expanduje, v důsledku transformace části její energie na mechanickou práci rotoru klesá její tlak a teplota, zároveň se zvětšuje i její objem.

V případě, že expanze páry na posledním stupni turbíny je ukončena při tlaku vyšším, jak atmosférickém, tj. teplota výstupní (emisní) páry je vyšší jak 100 °C, nazýváme takovouto turbínu protitlakovou.

Pára o relativně vyšších parametrech na výstupu z turbíny je tak využitelná pro dodávky tepla, a to buď ve formě horké vody ohřívané ve výměníku pára/voda, nebo přímo ve formě páry.

Samozřejmě platí při konstantních admisních parametrech páry úměra, že čím vyšší protitlak (vyšší emisní parametry páry), tím menší podíl vyráběné elektřiny vůči dodávkám tepla.

Řez protitlakovou parní turbínou s odběrem páry (60 MWe) je uveden na obrázku č. 5.1.1.



Obrázek č. 5.1.1 Řez protitlakovou parní turbínou

5.1.2 Základní technické parametry PPT

Protitlakové parní turbíny se vyrábějí v širokém výkonovém rozsahu od 10 kW (točivé redukce) až po cca 100 MW. Setkáváme se s různým technickým provedením turbín, u nejmenších jednotek se jedná o radiální jednostupňové provedení, u středních výkonů o axiální jednotělesové vysokootáčkové stroje s převodovkami, největší turbíny jsou vícetělesové axiálního typu s přehříváním páry. Přehled typických parametrů vstupní a výstupní páry pro příslušné výkonové rozsahy je uveden v následující tabulce č. 5.1.1.

Tabulka č. 5.1.1 Přehled typických parametrů vstupní a výstupní páry protitlakových turbín

	Jedn.	Parní protitlakové turbíny			
Výkonový rozsah turbíny	MWe	0,01 ÷ 1,0	1,0 ÷ 6,0	6,0 ÷ 35,0	>35,0
Admisní tlak páry	MPa	0,5 ÷ 2,0	2,3 ÷ 6,0	9,0 ÷ 13,0	13,0 ÷ 16,0
Admisní teplota páry	°C	200 ÷ 300	360 ÷ 480	535	535
Emisní tlak páry	MPa	0,1 ÷ 0,8	0,1 ÷ 1,3	0,1 ÷ 1,8	0,1 ÷ 1,8
Teplárenský modul	-	0,05 ÷ 0,2	0,10 ÷ 0,35	0,15 ÷ 0,42	0,2 ÷ 0,45

Jak již bylo několikrát uvedeno, parní protitlaková turbína je stroj zpracovávající páru, je tedy nezbytné kromě turbíny samotné mít k dispozici i zdroj této páry, tedy další zařízení.

Nejčastějším zdrojem páry bývá kotel na spalování fosilních paliv (uhlí, olejů, zemního plynu), nebo biomasy, může jím však být i parogenerátor topený spaliny (např. na výfuku plynové turbíny – viz dále), nebo jiný externí zdroj páry.

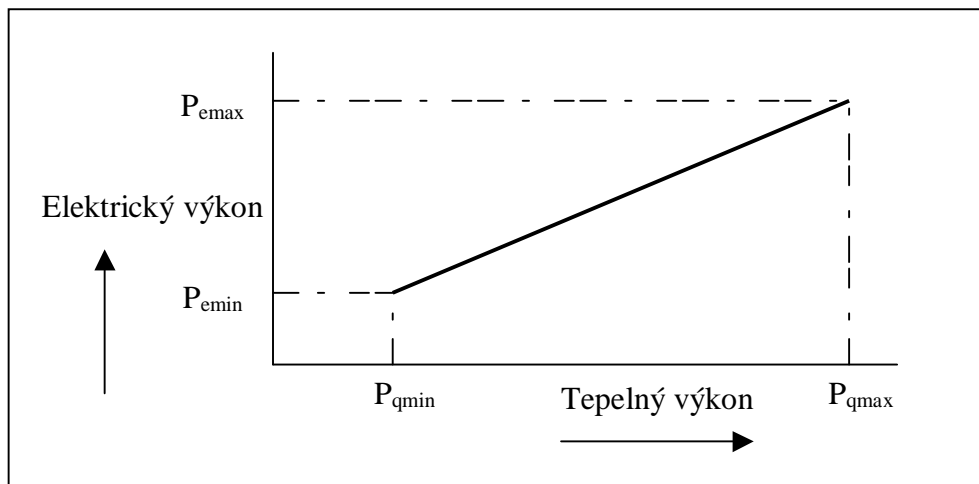
V případě protitlakových parních turbín využíváme veškerou výrobu elektrické energie a veškeré teplo vystupující z turbosoustrojí. Účinnosti výroby elektřiny, výroby tepla a celkové účinnosti zdrojů jsou pak určovány zejména účinnostmi výroby páry v kotelnách (účinnostmi kotlů), termodynamickou účinností turbíny, dále pak tepelnými a mechanickými ztrátami ve strojovnách. Přehled typických rozsahů účinností zdrojů KVET s protitlakovými parními turbínami je uveden v tabulce č. 5.1.2.

Tabulka č. 5.1.2 Přehled běžných účinností zdrojů KVET s protitlakovými parními turbínami

	Jedn.	Parní protitlakové turbíny			
Výkonový rozsah zdroje	MWe	0,01 ÷ 1,0	1,0 ÷ 6,0	6,0 ÷ 35,0	>35,0
Účinnost výroby el. en.	%	5 ÷ 15	10 ÷ 20	15 ÷ 25	20 ÷ 30
Účinnost výroby tepla	%	55 ÷ 70	55 ÷ 70	55 ÷ 70	60 ÷ 65
Celková účinnost zdroje	%	65 ÷ 75	75 ÷ 80	80 ÷ 85	85 ÷ 90

5.1.3 Základní provozní a technologické vlastnosti PPT

Charakteristickým rysem protitlakových parních turbín je přímá závislost elektrického výkonu na dodávaném tepelném výkonu, tj. na průtočném množství páry turbínou. Tato závislost je graficky znázorněna na obrázku č. 5.1.2.



Obrázek č. 5.1.2 Závislost elektrického a tepelného výkonu protitlakové parní turbíny

V případě protitlakové parní turbíny se jedná o zdroj závislé výroby elektrické energie, tj. průběh výroby elektrické energie kopíruje průběh výroby tepla.

Maximální elektrický výkon turbíny je dosahován při maximálních dodávkách tepla a je omezen konstrukčně přípustným průtočným množstvím páry turbínou, minimální výkony odpovídají minimálním průtočným množstvím páry turbínou (při menších jak minimálních průtocích dochází ke kavitaci a k následnému poškození turbíny).

Rozsah výkonů, tj. minimálních a maximálních průtoků závisí na konstrukci a parametrech turbíny (běžně 40 až 100 % P_{\max} , maximálně 20 až 100 % P_{\max}), v každém případě bývá nižší než rozsah běžně požadovaných tepelných výkonů (běžně 5 až 100 % P_{\max}).

Obecným jevem provozu nejen protitlakových parních turbín, ale i odběrových a kondenzačních parních turbín je relativně dlouhá doba odstávky turbíny (do studeného stavu) a jejího opětovného najetí (požadováno je postupné prohřívání z důvodu zamezení vzniku mechanických deformací). Tato vlastnost prakticky vylučuje cyklus každodenního najíždění (například ráno) a každodenního odstavení (například na noc) parní turbíny. Tento typ turbíny je předurčen pro kontinuální celoroční, nebo sezónní provoz.

Protitlakové parní turbíny jsou schopny realizovat dodávky tepla v horké vodě (tzv. protitlaky do vody o nižších parametrech emisní páry), ale i v páře (tzv. protitlaky do páry).

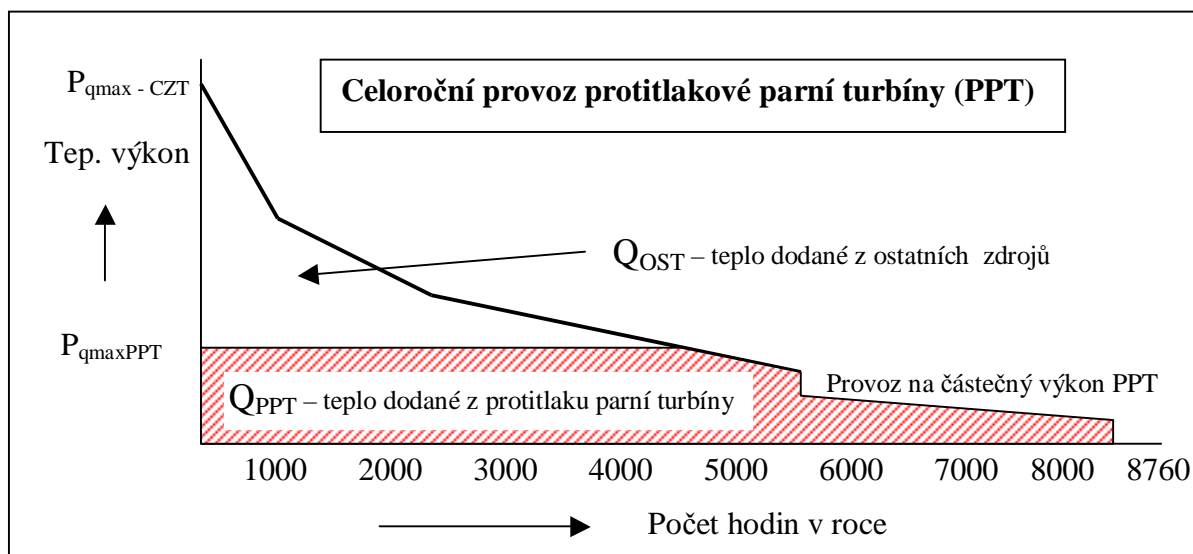
Protitlakové parní turbíny vykazují nízkou měrnou spotřebu tepla na výrobu elektrické energie (absence kondenzačních ztrát, proto jsou ze všech typů turbín energeticky nejefektivnější), proto lze připustit jejich instalaci i za parními kotli spalujícími relativně dražší paliva (např. zemní plyn nebo TTO).

5.1.4 Zásady dimenzování a způsobu provozu PPT

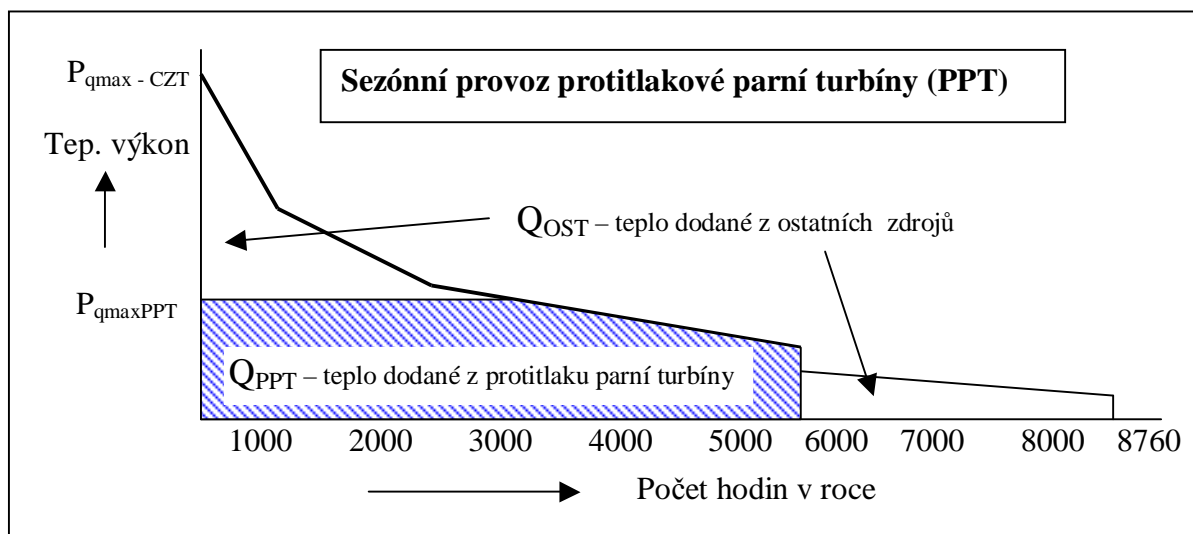
Protitlakové parní turbíny dimenzujeme vždy s ohledem na průběh potřeb tepla. Rozhodujícím kritériem bývá zpravidla minimální požadavek na dodávku tepla, který by měl korespondovat s minimálním průtočným množstvím páry turbínou.

Z těchto důvodů je možno velikosti protitlakových parních turbín navrhovat buď podle letních potřeb tepla s předpokladem celoročního provozu, nebo podle minimálních potřeb tepla na začátku a konci topného období s předpokladem pouze sezónního provozu (relativně výkonově větší zařízení).

Znázornění podílu dodávek tepla na krytí typických diagramů doby trvání potřeb tepla je pro oba případy znázorněno na obrázcích č. 5.1.3 a č. 5.1.4.



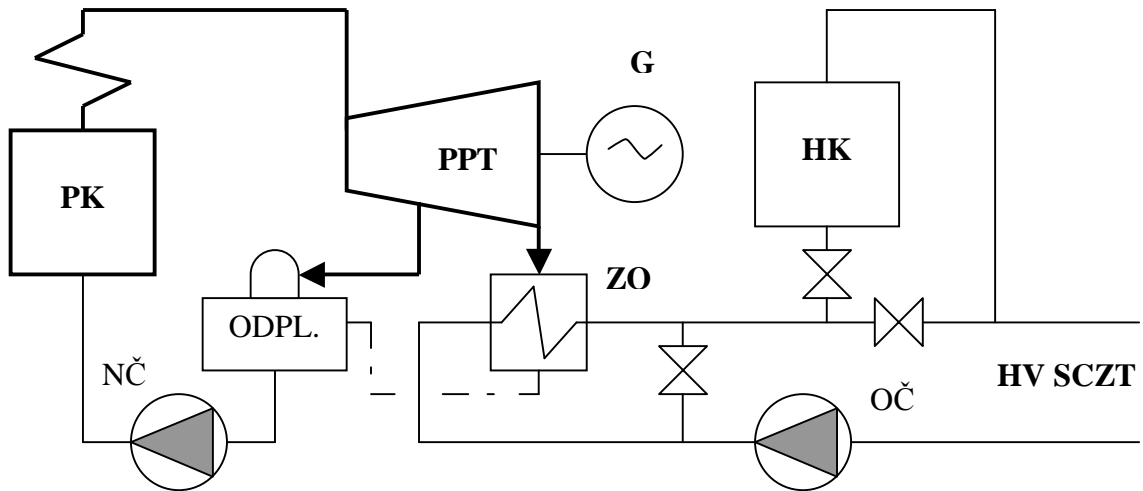
Obrázek č. 5.1.3 Způsob celoročního provozu protitlakové parní turbíny



Obrázek č. 5.1.4 Způsob sezónního provozu protitlakové parní turbíny

Jak je patrné z diagramů uvedených na obrázcích č. 5.1.3 a č. 5.1.4, protitlaková parní turbína není schopna plně vykrýt celoroční potřeby tepla odběratelů, nezbytné je tedy v teplárně instalovat špičkové, nebo doplňkové (letní) zdroje. Těmito zdroji mohou být samostatné kotle, redukce ostré páry, nebo odběry tepla z dalších turbosoustrojí.

Příklad nejjednoduššího technologického schématu zdroje s protitlakovou parní turbínou pro dodávku tepla v horké vodě je uveden na obrázku č. 5.1.5.



Obrázek č. 5.1.5 Nejjednodušší uspořádání zdroje s protitlakovou parní turbínou

Obvykle dosahované provozní ukazatele při nasazení zdrojů KVET s protitlakovou parní turbínou jsou uvedeny v následující tabulce č. 5.1.2.

Tabulka č. 5.1.2 Přehled obvykle dosahovaných provozních ukazatelů zdrojů s PPT

Parametr	Jednotka	Celoroční provoz	Sezónní provoz
Celková roční doba provozu PPT	hod	8000 ÷ 8500	5250 ÷ 5750
Doba využití maximálního výkonu PPT	hod	6000 ÷ 7000	4000 ÷ 4500
Výkonový teplotní součinitel	-	0,2 ÷ 0,3	0,4 ÷ 0,6
Roční teplotní součinitel	-	0,5 ÷ 0,8	0,5 ÷ 0,8

5.1.5 Souhrn hlavních výhod a nevýhod PPT

K hlavním výhodám PPT patří :

- Vysoká celková energetická účinnost
- Dlouhá doba životnosti
- Možnosti dodávky tepla v páře i v horké vodě

K hlavním nevýhodám PPT patří :

- Relativně menší podíl výroby elektrické energie
- Výroba elektřiny je závislá na potřebách tepla
- Vyžaduje kontinuální provoz bez častých odstávek

K dalším specifickým vlastnostem PPT řadíme :

- Možnost nasazení ve zdrojích spalujících i méněhodnotná paliva
- Vhodné pro prakticky veškerý výkonový rozsah potřeb tepla
- Předurčeny k provozu v základním zatížení odběrových diagramů

Nejčastější místa nasazení jsou :

- Jako základní zdroje ve velkých teplárnách zásobujících rozsáhlé systémy CZT
- V závodových teplárnách s kontinuální potřebou tepla a elektrické energie
- Ve zdrojích dodávajících páru o různých tlakových úrovních (točivé redukce)

Nejčastější chyby při aplikaci :

- Výkonově předimenzované zařízení (neodpovídá potřebám tepla), nutno instalovat dodatečnou (potlačenou) kondenzaci nebo v lepším případě akumulaci.
- Příliš vysoká cena vstupní páry vyráběné z ušlechtilých paliv – při malém termodynamickém spádu a relativně vysokých měrných investicích problémy s návratností.

5.2 Parní odběrové turbíny (POT)

5.2.1 Popis zařízení a princip funkce POT

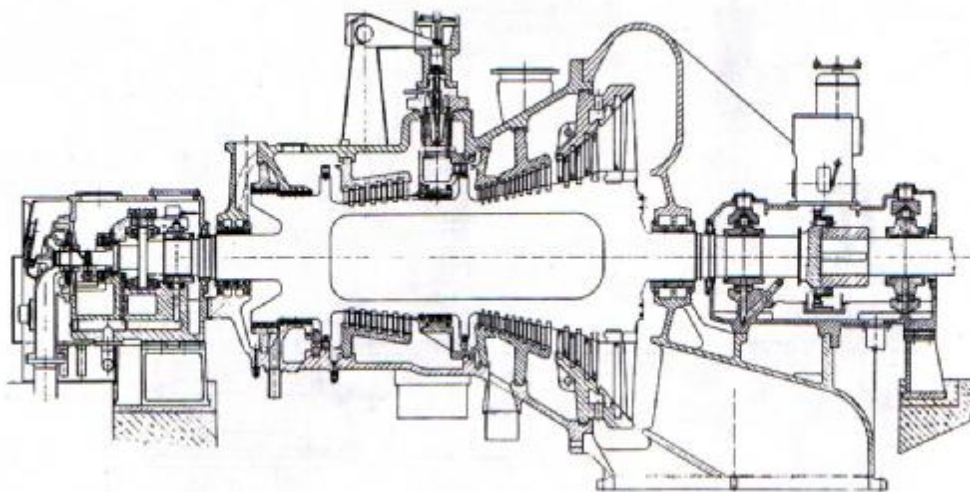
Princip funkce parní odběrové turbíny je shodný s parní protitlakovou turbínou, jak bylo popsáno v předchozí kapitole. Veškeré množství páry vstupující do turbíny prochází jejími prvními stupni (lopatkovými řadami), kde postupně expanduje, čímž se transformuje část její energie na mechanickou práci (rotaci turbíny). V místě, kde expandující pára má ještě dostatečné teplotní a tlakové parametry využitelné pro teplotní účely se část jejího množství odebírá (odtud název odběrová turbína), zbylá část v turbíně zůstává a pokračuje v expanzi.

Základní rozdíl mezi protitlakovým a odběrovým strojem tedy spočívá v tom, že parní odběrová turbína obsahuje ještě tzv. kondenzační část, tj. pára, která není využita (odebrána) pro teplotní účely prochází ještě dalšími lopatkovými řadami, čímž se využije její zbytková energie pro výrobu další elektřiny.

U teplotních odběrových turbín lze množství odebírané páry zpravidla regulovat v rozsahu od nuly, kdy turbína přechází do čistě kondenzačního režimu, až po maximální odběrové množství, na něž byla turbína, respektive její odběry konstruovány. Maximální odebírané množství páry je kromě konstrukce odběrových míst limitováno i zachováním alespoň minimálního průtočného množství páry kondenzační částí (zamezení kavitace).

Pro upřesnění pojmů je třeba ještě doplnit, že odběry páry v průběhu expanze jsou realizovány i u čistě kondenzačních nebo protitlakových turbín. Jedná se však zpravidla o neregulované, relativně malé odběry, kde odebíraná pára slouží pro odplynění a přehřev napájecí vody do kotle (zvýšení celkové energetické účinnosti cyklu). Až v případě, kdy některý z odběrů (turbína má obvykle více odběrů na různých tlakových úrovních) je záměrně konstruován pro dodávky tepla vně strojovny, hovoříme o odběrové parní turbíně.

Řez kondenzační odběrovou parní turbínou (30 MWe) je uveden na obrázku č. 5.2.1.



Obrázek č. 5.2.1 Řez odběrovou parní turbínou

5.2.2 Základní technické parametry POT

Odběrové parní turbíny se na rozdíl od protitlakových nevyrábějí v tak širokém rozsahu, výkonově jsou posunuty o něco výše. Jedná se o stroje od několika MWe pro nižší parametry páry až po několik 100 MWe (u nás maximálně 200 MWe – teplárenské úpravy bloků v elektrárnách ČEZ, ale i turbína 1000 MWe v ETE umožňuje odběry až do 300 MWt).

Setkáváme se s jednotělesovým či vícetělesovým provedením, s přehříváním nebo bez přehřívání páry, vždy se jedná o axiální parní turbíny s jedním nebo více odběry. Přehled typických parametrů vstupní, odběrové a kondenzační páry pro příslušné výkonové rozsahy je uveden v následující tabulce č. 5.2.1.

Tabulka č. 5.2.1 Přehled typických parametrů páry u odběrových parních turbín

	Jedn.	Parní odběrové turbíny			
Výkonový rozsah turbíny	MWe	6 ÷ 30	30 ÷ 60	60 ÷ 200	> 200
Admisní tlak páry	MPa	3,5 ÷ 9,0	9,0 ÷ 13,0	13,0	16,0
Admisní teplota páry	°C	440 ÷ 535	535	535	535
Tlaky páry v odběrech	MPa	0,1 ÷ 1,3	0,1 ÷ 1,8	0,1 ÷ 3,6	0,1 ÷ 3,6
Tlak páry do kondenzace	MPa	0,035 ÷ 0,04	0,035 ÷ 0,04	0,035 ÷ 0,04	0,035 ÷ 0,04
Teplárenský modul	-	0,20 ÷ 0,38	0,34 ÷ 0,46	0,38 ÷ 0,48	0,40 ÷ 0,50

Pro odběrové parní turbíny jsou rovněž důležité parametry charakterizující maximální rozsah dodávky tepla z odběru $P_{q_{max}}$ (minimální je zpravidla roven 0) a měrný pokles dosažitelného elektrického výkonu (vůči čistě kondenzačnímu provozu) při odebíraném tepelném výkonu. Tento poměr označíme Δp_e a je definovaný jako $\Delta P_e/P_q$. Přehled typických hodnot $P_{q_{max}}$ a Δp_e je uveden v tabulce č. 5.2.2.

Tabulka č. 5.2..2 Rozsah maximálních dodávek tepla a měrných poklesů elektrického výkonu

	Jedn.	Parní odběrové turbíny			
Výkon. rozsah turbíny $P_{e_{max}}$	MWe	6 ÷ 30	30 ÷ 60	60 ÷ 200	> 200
Max. tepelný výkon $P_{q_{max}}$	MWt	15 ÷ 60	60 ÷ 110	100 ÷ 200	200
Měr. pokles el. výkonu Δp_e	MWe/MWt	0,12 ÷ 0,2	0,11 ÷ 0,22	0,1 ÷ 0,25	0,08 ÷ 0,24

Nejčastějším zdrojem páry bývá kotel na spalování tuhých fosilních paliv a biomasy, může jím však být i parogenerátor topený spalinami z plynových turbín, nebo parogenerátor v jaderné elektrárně. V případě odběrových parních turbín využíváme veškerou výrobu elektrické energie a pouze větší či menší část tepla odebraného z turbosoustrojí.

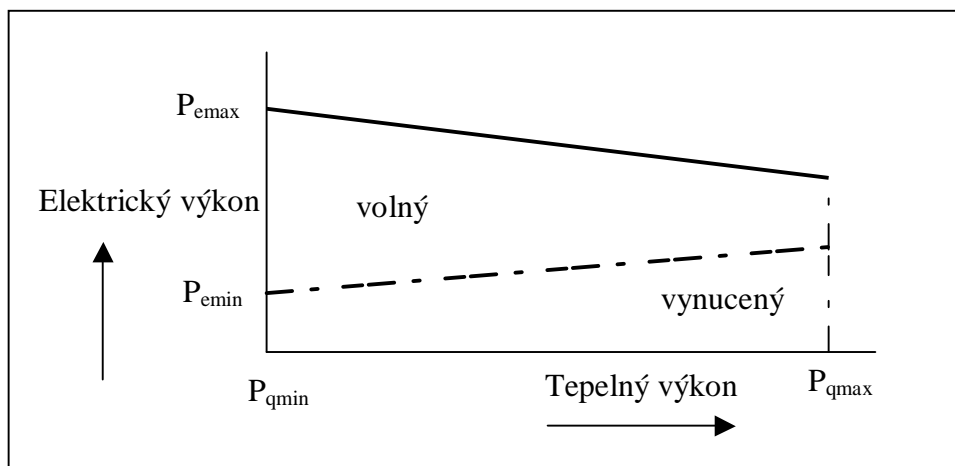
Celkové účinnosti zdroje pak závisí na množství odebíraného (využívaného) tepla a oscilují tak mezi účinností při čistě kondenzačním provozu a účinností při maximálním odběru tepla, jak je uvedeno v tabulce č. 5.2.3.

Tabulka č. 5.2.3 Přehled rozsahu dosahovaných účinností zdrojů KVET s POT

	Jedn.	Parní odběrové turbíny			
Výkonový rozsah turbíny	MWe	6 ÷ 30	30 ÷ 60	60 ÷ 200	> 200
Minimální celková účinnost	%	25 ÷ 30	30 ÷ 34	34 ÷ 38	38 ÷ 42
Maximální celková účinnost	%	65 ÷ 75	60 ÷ 70	55 ÷ 65	50 ÷ 60

5.2.3 Základní provozní a technologické vlastnosti POT

Charakteristickým rysem odběrových parních turbín je částečná nezávislost el. výkonu na dodávaném tepelném výkonu, tj. část el. výkonu je vázána na dodávky tepla (vynucený výkon – daný průtokem páry odběrem a minimem do kondenzace) a část je na dodávkách tepla nezávislá (volný výkon – daný průtokem páry turbínou nad rámec průtoku odběrové páry a minima do kondenz.). Tato charakteristika je graficky znázorněna na obrázku č. 5.2.2.



Obrázek č. 5.2.2 Závislost elektrického a tepelného výkonu odběrové parní turbíny

V případě odběrových parních turbín je možno rozsah tzv. volného elektrického výkonu využít pro vykrytí odběrových diagramů elektrické energie, například u menších turbosoustrojí v průmyslových podnicích, nebo i pro poskytování systémových služeb elektrizační soustavě, například u velkých turbosoustrojí veřejných tepláren.

Maximální elektrický výkon turbíny je dosahován při minimálních dodávkách tepla a je omezen konstrukčně přípustným průtočným množstvím páry turbínou a podmínkami kondenzace.

Rozsah volného elektrického (regulačního) výkonu bude záviset na poměru instalovaného elektrického výkonu turbosoustrojí a množství odebíraného tepla z odběrů turbíny. Určitou výhodou odběrové parní turbíny oproti protitlakové parní turbíně je možnost regulace dodávaného tepelného výkonu prakticky v celém rozsahu potřeb, aniž by byl nějakým způsobem provoz kotlů a turbíny ohrožen. Odběry tepla tedy nemají vliv na dobu provozu turbíny, na dobu využití jejího maxima, mají vliv pouze na celkovou energetickou účinnost zdroje, která při poklesu odběru tepla a zachování výroby elektřiny klesá.

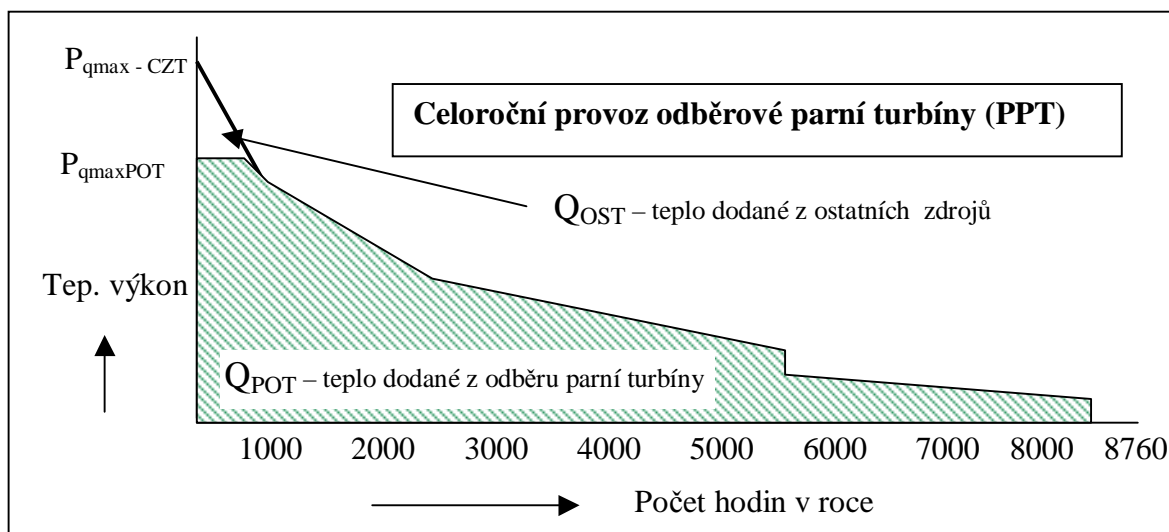
Odběrové parní turbíny jsou schopny realizovat dodávky tepla v páře v několika tlakových úrovních, kdy je pára využitelná současně pro technologické účely (zpravidla pára z tlakově nejvyššího odběru) a současně i pro ohřev topné vody (zpravidla z tlakově nižších odběrů). Odběrové parní turbíny vykazují relativně vysokou měrnou spotřebu tepla na výrobu elektrické energie (v důsledku kondenzačních ztrát), proto lze připustit jejich instalaci pouze za parními kotli spalujícími relativně levná paliva (např. uhlí, odpadní suroviny, nebo biomasu).

5.2.4 Zásady dimenzování a způsobu provozu POT

Odběrové parní turbíny dimenzujeme vždy s ohledem na průběh potřeb elektrické energie, nebo s ohledem na disponibilní zdroj vysokotlaké páry (výkon instalovaných kotlů).

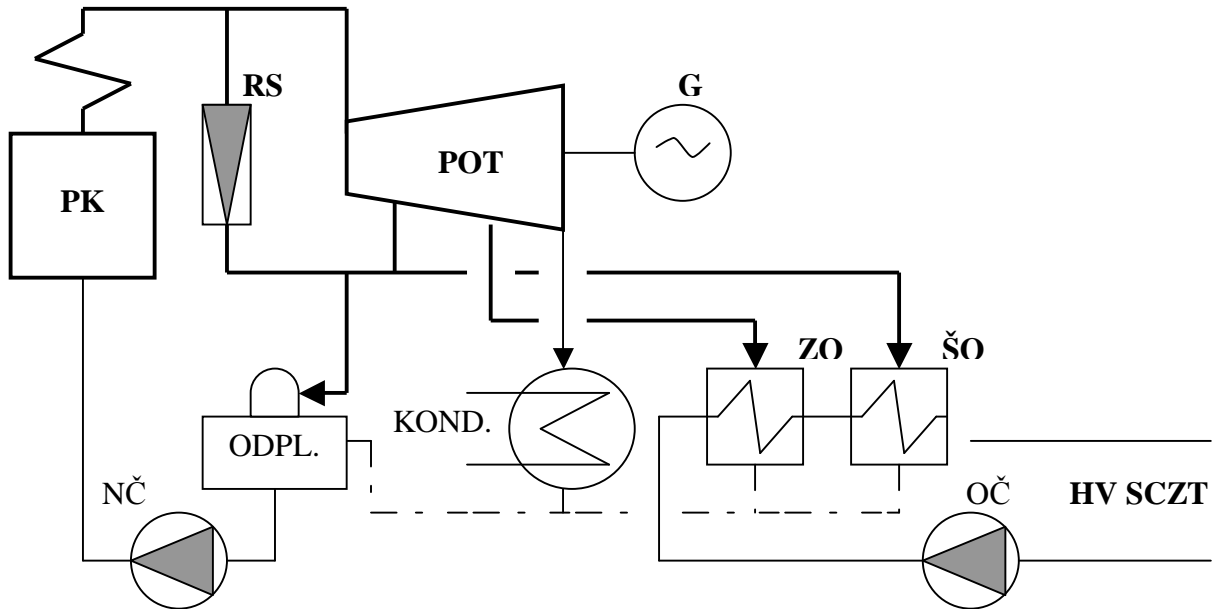
Za těchto podmínek je možno z odběrových parních turbín bezproblémově realizovat nejen letní dodávky tepla, ale při dostatečném výkonu turbosoustrojí i dodávky tepla v průběhu celého topného období. Teoreticky by mohla jedna velká odběrová parní turbína pokrýt veškeré potřeby CZT, z důvodu zajištění bezpečnosti dodávek však do CZT zpravidla pracuje ještě druhý zdroj, což nejčastěji bývá další odběrová turbína, nebo protitlaková turbína, nebo špičkový či záložní kotel. Z praktického hlediska dimenzování jsou pak úplné špičky potřeb tepla (při největších mrazech) kryty párou z redukcí, nebo ze špičkového kotle.

Znázornění podílu dodávek tepla z odběru POT na krytí typických diagramů doby trvání potřeb tepla je na obrázku č. 5.2.3.



Obrázek č. 5.2.3 Průběh dodávek tepla z odběrové parní turbíny

Příklad nejjednoduššího technologického schématu zdroje s odběrovou parní turbínou pro dodávku tepla v horké vodě je uveden na obrázku č. 5.2.4.



Obrázek č. 5.2.4 Nejjednodušší uspořádání zdroje s odběrovou parní turbínou

Obvykle dosahované provozní ukazatele při nasazení zdrojů KVET s odběrovou parní turbínou jsou uvedeny v následující tabulce č. 5.2.4.

Tabulka č. 5.2.4 Přehled obvykle dosahovaných provozních ukazatelů zdrojů s POT

Parametr	Jednotka	Průmysl. zdroje	Veřejné zdroje
Celková roční doba provozu POT	hod	8000 ÷ 8500	7000 ÷ 7500
Doba využití max. el. výkonu POT	hod	6500 ÷ 7500	5500 ÷ 6000
Doba využití max. tepel. výkonu POT	hod	3500 ÷ 4500	2500 ÷ 3500
Výkonový teplotní součinitel	-	0,8 ÷ 1,0	0,6 ÷ 1,0
Roční teplotní součinitel	-	0,9 ÷ 1,0	0,8 ÷ 1,0

5.2.5 Souhrn hlavních výhod a nevýhod POT

K hlavním výhodám POT patří :

- Výroba elektřiny je částečně nezávislá na dodávkách tepla
- Dlouhá doba životnosti
- Možnosti dodávky tepla v páře i v horké vodě

K hlavním nevýhodám POT patří :

- Nižší celková energetická účinnost
- Nezbytnost chladicího systému – kondenzačního okruhu
- Vyžaduje kontinuální provoz bez častých odstávek

K dalším specifickým vlastnostem POT řadíme :

- Možnost nasazení ve zdrojích spalujících i méněhodnotná paliva
- Vhodné pro větší soustavy s vyššími výkony
- Schopnost vykrývat diagramy potřeb elektrické energie

Nejčastější místa nasazení jsou :

- Ve velkých veřejných teplárnách zásobujících rozsáhlé systémy CZT
- V závodových teplárnách s velkou potřebou elektrické energie zásobovaného podniku
- V elektrárnách s blízkým a koncentrovaným odbytem tepla

Nejčastější chyby při aplikaci :

- Možnosti a parametry odběrů neodpovídají potřebám tepla – páry o různých tlakových úrovních, nezbytné je pak „přiredukovat“ ostrou páru, nebo instalovat redukce u vyšších odběrů.
- Příliš vysoká cena vstupní páry při relativně malých odběrech tepla – vysoké náklady na výrobu elektrické energie.

5.3 Plynové turbíny s rekuperací tepla (GTRT)

5.3.1 Popis zařízení a princip funkce GTRT

Plynová turbína (anglicky Gas Turbine – odtud GT) je točivý stroj složený ze třech částí.

První částí je axiální kompresor, kterým je nasáván venkovní vzduch a pomocí relativně vysokého počtu lopatkových řad stlačován (obvyklý kompresní poměr je 10 až 20).

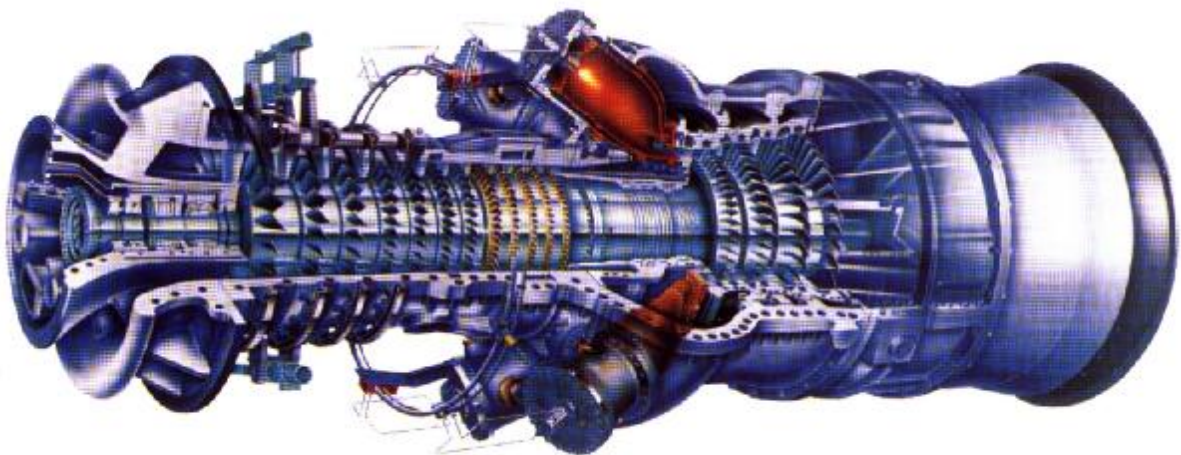
Stlačený vzduch pokračuje do spalovací komory, kde se v důsledku hoření paliva ohřívá, (běžně na teploty 900 až 1300 °C), čímž má zároveň snahu zvětšovat svůj objem.

Expanze ohřátého stlačeného vzduchu je umožněna v třetí – expanzní části turbíny, což je opět axiální rotační stroj s několika řadami lopatek, kde se mění energetický potenciál stlačeného vzduchu o vysoké teplotě na mechanickou práci. Tato mechanická práce se zčásti využívá pro pohon již zmiňovaného kompresoru, zčásti pro pohon generátoru.

Spaliny vystupující z expanzní části turbíny mají zpravidla ještě dostatečnou teplotu (450 až 570 °C) využitelnou pro topné účely, tedy dají se využít přímo (např. pro technologické účely), nebo je lze zavést do kotle, ve kterém je vyráběna pára, nebo ohřívána topná voda, což je tzv. rekuperace tepla.

V principu se tedy jedná o proudový motor známý například z letadel, kde však reaktivní proud vystupujících spalin je v dalších stupních expanzní turbíny transformován na mechanickou práci (elektrickou energii) a užitečné teplo.

Řez plynovou turbínou (6 MWe) je uveden na obrázku č. 5.3.1.



Obrázek č. 5.3.1 Řez plynovou turbínou

5.3.2 Základní technické parametry GTRT

Plynové turbíny se vyrábějí ve velmi širokém výkonovém rozsahu od stovek kW (menší jednotky s výkonem několik desítek kW se nazývají mikroturbíny a bude o nich zmínka v dalších kapitolách) až po jednotkový výkon přes 200 MW.

Výkonově menší plynové turbíny původně vycházely z konstrukcí leteckých proudových motorů, největší plynové turbíny byly konstrukčně odvozovány od parních turbín. Zpravidla se jedná o jednohřídelové stroje, kdy na jednom hřídeli je umístěna kompresorová i expanzní část turbíny (není podmínkou), generátor může být poháněn buď přímo přes spojku rotorem turbíny (u větších GT), nebo přes převodovku (u menších vysokootáčkových strojů).

Přehled typických parametrů plynových turbín (GT) s rekuperací tepla (RT) pro příslušné výkonové rozsahy je uveden v následující tabulce č. 5.3.1.

Tabulka č. 5.3.1 Přehled typických parametrů plynových turbín s rekuperací tepla

	Jedn.	Plynové turbíny s rekuperací tepla		
Výkonový rozsah turbíny	MWe	1 ÷ 10	10 ÷ 50	50 ÷ 240
Teplota spalin na výst. z turbíny	°C	460 ÷ 500	490 ÷ 540	510 ÷ 565
Otáčky turbíny	1/min	8000 ÷ 25000	6000 ÷ 12000	3000 ÷ 3600
Využitelný tepelný výkon	MWt	1,8 ÷ 18,0	18,0 ÷ 91,0	91,0 ÷ 335,0
Teplárenský modul	-	0,5 ÷ 0,6	0,5 ÷ 0,6	0,5 ÷ 0,7

Elektrický výkon turbíny a následně i její elektrická účinnost značně závisí na teplotě a tlaku (měrném hustotě) nasávaného vzduchu. Obecně platí, že čím nižší teplota a vyšší tlak vzduchu, tím vyšší elektrický výkon a naopak.

Využitelný tepelný výkon kromě teploty a množství výstupních spalin turbíny bude záviset i na schopnosti jejich vychlazení ve spalinovém kotli, respektive na tom, budeme-li užité teplo požadovat ve formě páry, horké vody, nebo teplé vody.

Celkové účinnosti výroby elektrické energie a tepla tak budou limitovány technologickými prvky turbíny, (zpravidla maximální přípustnou teplotou spalin na prvních stupních expanzní části turbíny), konstrukčním uspořádáním (počtem lopatkových řad, s převodovkou nebo bez, s rekuperací, s nástřikem páry do spalovací komory, atd.) a na úrovni využití energetického obsahu spalin vystupujících z turbíny (jejich vychlazení).

Rozsah běžně dosahovaných účinností výroby energie v plynových turbínách s rekuperací tepla je uveden v tabulce č. 5.3.2.

Tabulka č. 5.3.2 Rozsah běžně dosahovaných účinností GTRT

	Jedn.	Plynové turbíny s rekuperací tepla		
Výkonový rozsah turbíny	MWe	1 ÷ 10	10 ÷ 50	50 ÷ 240
Účinnost výroby elektrické energie	%	25 ÷ 32	30 ÷ 35	33 ÷ 38
Účinnost výroby užitého tepla	%	50 ÷ 61	49 ÷ 58	48 ÷ 57
Celková účinnost GTRT	%	82 ÷ 86	84 ÷ 88	86 ÷ 90

V praxi se s uspořádáním plynová turbína + pouze rekuperační spalínový kotel setkáváme spíše u menších jednotek plynových turbín (z kategorie 1 ÷ 10 MWe, občas i z kategorie 10 ÷ 50 MWe), v případě aplikace větších plynových turbín se jedná o složitější technologická schémata – paroplynové cykly (viz. dále).

Spalínové kotle pak bývají jednodušší konstrukce - nejčastěji parní středotlaké, popřípadě horkovodní, určené pro průmyslovou dodávku tepla.

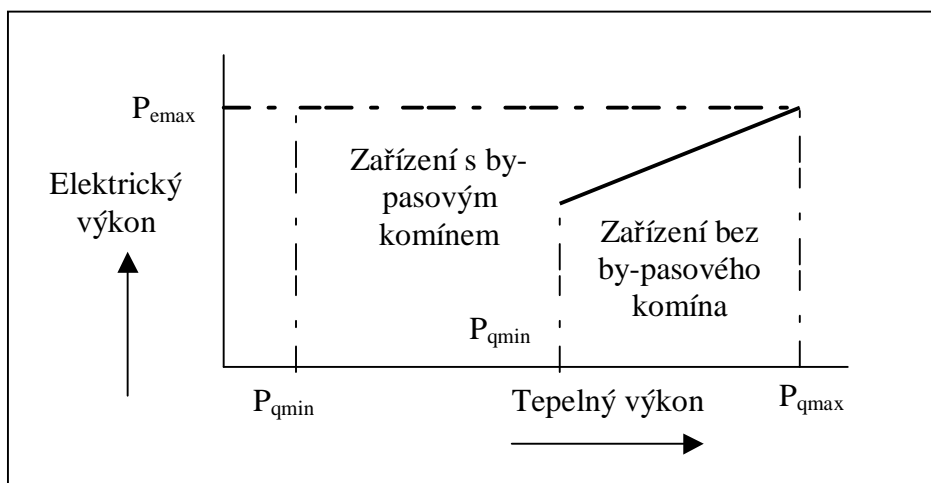
5.3.3 Základní provozní a technologické vlastnosti GTRT

U plynových turbín s rekuperací tepla jsme schopni dosáhnout částečné nezávislosti průběhu výroby elektrické energie a tepla, podobně jak tomu bylo u parních odběrových turbín s tím, že stejně jako u parních odběrových turbín při sníženém podílu využívaného tepla klesá celková účinnost (část spalin je pouštěna bez užtku by-pasovým komínem mimo spalínový kotel), na rozdíl od nich se však nemění dosažitelný elektrický výkon (nezaznamenáváme úbytek výroby elektriny z titulu teplofikace).

V případě, že mezi plynovou turbínou a spalínovým kotlem není instalován tzv. by-pasový komín, bude se plynová turbína s rekuperací tepla chovat obdobně jako protitlaková parní turbína, tj. s poklesem elektrického výkonu plynové turbíny poklesne i množství odcházejících spalin a tím i tepelný výkon spalínového kotle. Na rozdíl od protitlakových parních turbín je však využitelný regulační rozsah podstatně menší (při výkonovém zatížení pod 70 % jmenovitého výkonu začne prudce klesat účinnost plynové turbíny).

Vzhledem ke skutečnosti, že plynová turbína vyžaduje spalování poměrně kvalitního, a tím i drahého paliva (zemní plyn, svítiplyn, bioplyn, nebo lehký topný olej či jiné kvalitní kapalné palivo), bude aplikace s odpouštěním části proudu spalin by-pasovým komínem z ekonomických důvodů méně častá. Pokud se tak děje (u velkých plynových turbín), je to vyvoláno zpravidla zařazením příslušného zdroje do skupiny poskytovatelů systémových služeb elektrizační soustavě.

Průběhy obou výše zmiňovaných charakteristik závislosti elektrického a tepelného výkonu plynové turbíny s rekuperací tepla jsou graficky znázorněny na obrázku č. 5.3.2.



Obrázek č. 5.3.2 Závislost elektrického a tepelného výkonu plynové turbíny s rekuperací tepla

Další specifickou vlastností plynových turbín je možnost jejich relativně rychlého odstavení a najetí. Každý cyklus najetí a odstavení je však spojen se snížením určitého počtu tzv. ekvivalentních provozních hodin, tj. zkracuje se doba životnosti zařízení mezi jednotlivými opravami. Toto snížení počtu ekvivalentních provozních hodin je poměrně výrazné při velmi rychlých startech ze studeného stavu, vhodné jsou proto spíše pomalejší, plánované starty z teplého stavu.

Z pohledu prodloužení životnosti a omezení ztrát při startech, odstávkách a provozech na částečné výkony jsou plynové turbíny s rekuperací tepla vhodné spíše pro nepřetržitý provoz blízko jmenovitému výkonu, s víkendovou, popřípadě noční odstávkou zařízení.

Technologie založená na plynovém cyklu nepotřebuje k výrobě elektřiny vodu, naopak potřebuje ušlechtilé plynné, nebo kapalné palivo. Z těchto důvodů jsou aplikace plynových turbín nejvíce rozšířeny v suchých (pouštních) oblastech s těžbou ropných produktů (arabské země), ale také například na ropných plošinách v moři, velkých zámořských lodích, atd.

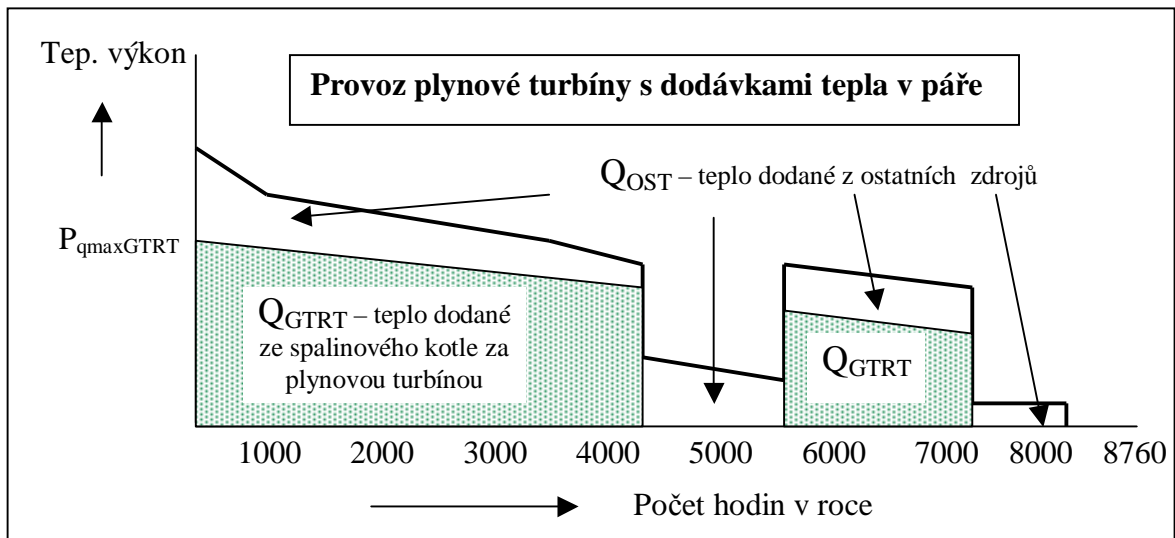
5.3.4 Zásady dimenzování a způsobu provozu GTRT

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, plynové turbíny s rekuperací tepla jsou díky svým vlastnostem předurčeny k aplikaci v provozech, kde jsou stabilní potřeby elektrické energie a tepla o vyšších parametrech (středotlaká pára). Bude se jednat zejména o průmyslové podniky s nepřetržitým, nebo týdenním, minimálně však s dvousměnným provozem, tj. z odvětví papírenství, potravinářství, těžkého strojírenství či chemické výroby.

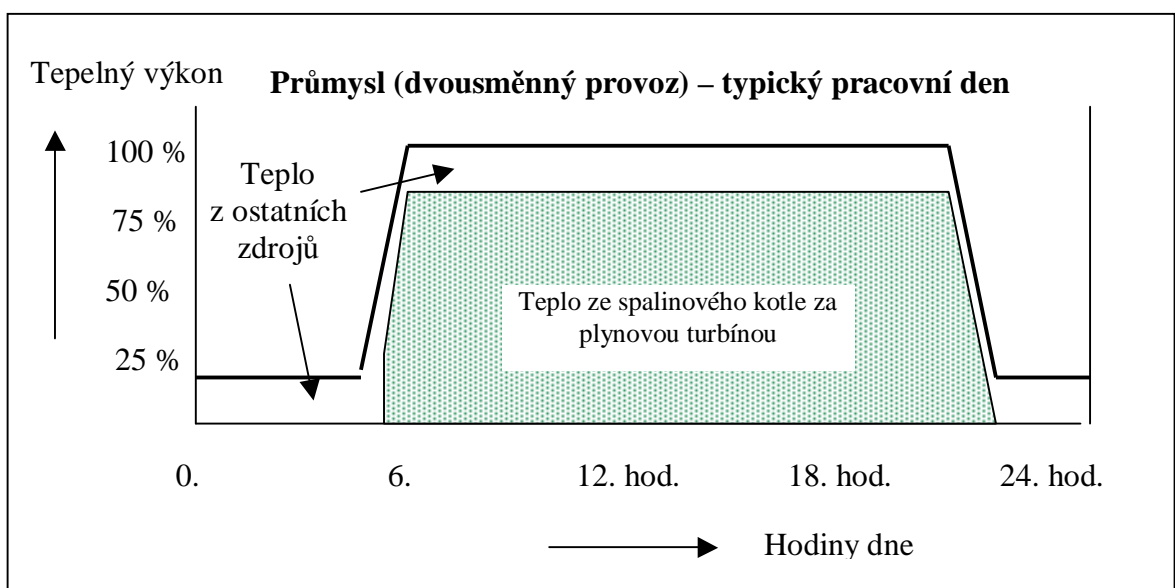
Rozhodující pro dimenzování výkonu může být jak průběh potřeb elektrické energie, tak i průběh potřeb tepla, důležité bude u druhého produktu vždy kontrolovat, nevzniknou-li nám při výrobě prvního produktu jeho výrazné přebytky.

Při dimenzování (návrhu) výkonu plynové turbíny musí být počítáno s tím, že její výkon bude v letních měsících znatelně menší než v měsících zimních, typ turbíny by měl být volen také s ohledem na disponibilní palivo, v případě zemního plynu na jeho tlak v přípojce (pokud je tlak zemního plynu nižší, než tlak stlačeného vzduchu přicházejícího do spalovací komory turbíny, je třeba plynovou turbínu dovybavit kompresorem plynu, což zvyšuje pořizovací cenu zařízení a následně i úroveň vlastní spotřeby elektrické energie).

Znázornění podílu dodávek tepla z GTRT na krytí typických průmyslových diagramů doby trvání potřeb tepla v páře je znázorněno na obrázku č. 5.3.3., znázornění průběhu výroby tepla GTRT na typických denních diagramech spotřeby páry v průmyslovém podniku s dvousměnným provozem je uvedeno na obrázku č. 5.3.4.

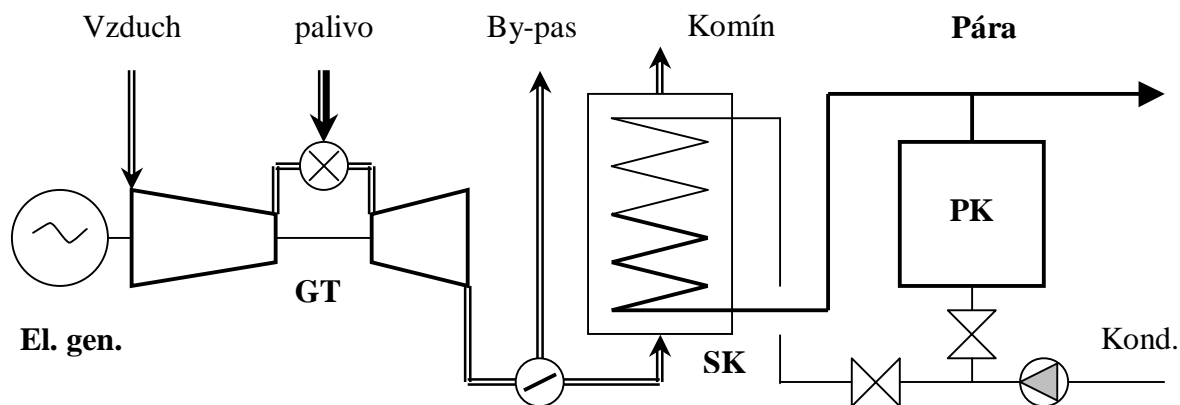


Obrázek č. 5.3.3 Průběh dodávek tepla z plynové turbíny s rekuperací tepla – roční diagram



Obrázek č. 5.3.4 Průběh dodávek tepla z plynové turbíny s rekuperací tepla – denní diagram

Příklad nejjednoduššího technologického schématu zdroje s plynovou turbínou a parním středotlakým spalínovým kotlem je uveden na obrázku č. 5.3.5.



Obrázek č. 5.3.5 Zdroj s plynovou turbínou, spalínovým a spolupracujícím parním kotlem

Obvykle dosahované provozní ukazatele při nasazení plynové turbíny s rekuperací tepla (GTRT) jsou uvedeny v následující tabulce č. 5.3.4.

Tabulka č. 5.3.4 Přehled obvykle dosahovaných provozních ukazatelů zdrojů s GTRT

Parametr	Jednotka	Průmyslové zdroje s nepřetržitým provozem	Průmyslové zdroje s dvousměnným provozem
Celková roční doba provozu GTRT	hod	7500 ÷ 8200	3500 ÷ 4500
Doba využití maxim. výkonu GTRT	hod	6500 ÷ 7500	3000 ÷ 4000
Výkonový teplotěnský součinitel	-	0,70 ÷ 0,85	0,60 ÷ 0,75
Roční teplotěnský součinitel	-	0,85 ÷ 0,95	0,80 ÷ 0,90

5.3.5 Souhrn hlavních výhod a nevýhod GTRT

K hlavním výhodám GTRT patří :

- Možnost rychlého najetí a odstávky
- Malé nároky na prostorovou a stavební připravenost
- Možnosti dodávky tepla v páře i v horké vodě

K hlavním nevýhodám GTRT patří :

- Možnost spalování pouze ušlechtilých paliv
- Omezený regulační rozsah provozních výkonů
- Vysoké nároky na kvalitu obsluhy a údržby

K dalším specifickým vlastnostem GTRT řadíme :

- Vysoká hlučnost (nezbytné umístění v kontejneru nebo protihluková ochrana)
- Sice malé prostorové nároky pro plynové turbíny, ale velké pro spalínové kotle
- Možnost modulového uspořádání a různých modifikací konfigurace

Nejčastější místa nasazení jsou :

- Ve velkých průmyslových závodech s nepřetržitou potřebou elektřiny a tepla
- Ve výrobních a zpracovatelských podnicích s potřebami technologické páry
- Ve speciálních provozech s potřebami horkého vzduchu o vysokých teplotách

Nejčastější chyby při aplikaci :

- Výkonově příliš velké jednotky s ohledem na průběhy potřeb elektrické energie a tepla – pokles účinnosti a ekonomie provozu v důsledku malého vytížení a častých odstávek
- Konstrukčně nevhodné typy plynových turbín – dodatečné nároky na další příslušenství, servis a opravy komplikují provoz a snižují jeho ekonomiku.

5.4. Paroplynové cykly (PPC)

5.4.1 Popis zařízení a princip funkce PPC

Paroplynový cyklus je kombinace parního cyklu, popsaného v kapitolách o protitlakových a odběrových parních turbínách a plynového cyklu, popsaného v předchozí kapitole týkající se plynové turbíny s rekuperací tepla.

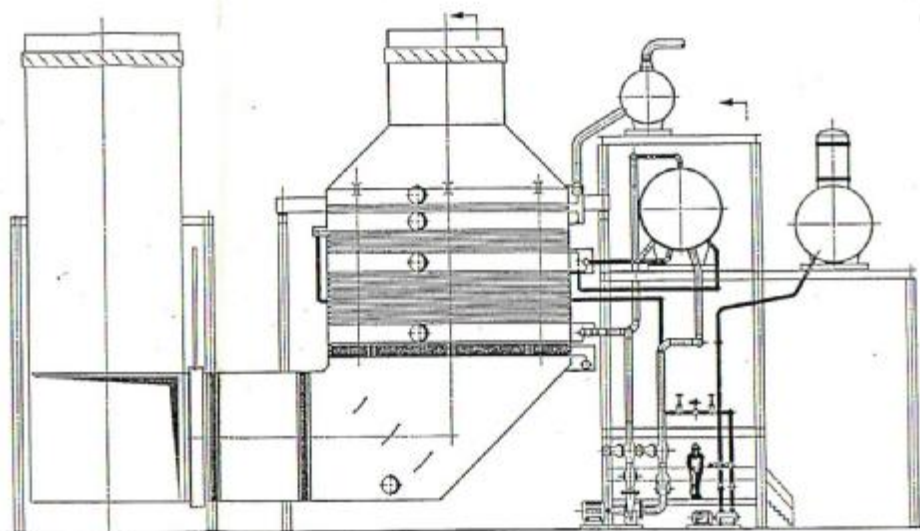
Jedná se tedy o sousledné uspořádání tří technologických celků. Prvním je plynová turbína, která pohání elektrický generátor (vyrábí elektřinu) a vypouští spaliny do kotle. Ve spalínovém kotli za plynovou turbínou je vyráběna vysokotlaká pára, která je dále vedena do protitlakové, nebo odběrové parní turbíny. Parní turbína pohání další generátor výroby elektrické energie, pára z odběru nebo protitlaku parní turbíny je využívána pro dodávky užitného tepla.

Tento poměrně složitý technologický komplex zařízení umožňuje řadu modifikací. Předně plynová turbína může být vybavena tzv. by-pasovým komínem pro možnost samostatného provozu plynové části – nezávislého, nebo částečně závislého na provozu parní části.

Spalínový kotel může být vybaven i klasickými hořáky (nejčastěji na stejné palivo jako plynová turbína - není to však podmínkou), které využívají přebytek kyslíku ve spalínách plynové turbíny a zvyšují tak výkon kotle. Tento vyšší výkon je využitelný pro dosažení vyšších parametrů vyráběné páry, nebo pro dosažení částečné nezávislosti provozu parního cyklu na provozu plynové turbíny.

O možnosti volby různého typu parní turbíny již bylo pojednáno v předchozích kapitolách, užitné teplo je pak možno dodávat ve formě horké či teplé vody ohřívané ve výměnících, nebo ve formě nízkotlaké či středotlaké páry.

Jelikož řezy parní a plynové turbíny byly prezentovány v předchozích kapitolách, na následujícím obrázku č. 5.4.1 je uveden řez parním spalínovým kotlem za plynovou turbínou.



Obrázek č. 5.4.1 Řez parním spalínovým kotlem za plynovou turbínou

5.4.2 Základní technické parametry PPC

Paroplynové cykly, jakožto poměrně složitá zařízení, jsou zpravidla budovány jako výkonově větší jednotky (řádově desítky až stovky MWe), setkáme se však i s řadou menších průmyslových aplikací s instalovaným výkonem několik MWe.

Pro paroplynové cykly jsou voleny plynové turbíny s maximální účinností a vysokými teplotami spalin (zpravidla na úkor omezenější provozní pružnosti). Parní spalínové kotle jsou konstruovány jako vícetlaké pro docílení maximálního vychlazení spalin, respektive pro docílení maximální účinnosti.

Příčinou jsou relativně nižší teploty spalin oproti spalinám z klasických hořáků. Při téměř lineární závislosti teploty a tepelného obsahu spalin a při nelineární závislosti energetických potřeb výroby přehřáté páry, kdy nelinearita je způsobena skupenským teplem výparným, je vhodné výparníky instalovat pro více teplotních, tedy i tlakových úrovní tak, abychom se „schodovitým“ průběhem výroby páry co nejvíce přiblížili lineárnímu průběhu vychlazení spalin. Spalínové kotle jsou pak složitější a objemnější (díky potřebě větších teplosměnných ploch). I za těchto podmínek však nejsou kotle PPC schopny vyrobit páru srovnatelných parametrů, jako kotle klasické, tudíž i konstrukce spalínových kotlů bývá poněkud odlišná.

Parní turbíny PPC jsou zpravidla víceúrovňové s nižšími parametry admisních par, z hlediska dodávek tepla mohou být konstruovány jako protitlakové, nebo kondenzační odběrové. V podmínkách ČR, kde vhodná paliva pro provoz plynových turbín, tj. zemní plyn popřípadě lehký topný olej, jsou výrazně dražší než ostatní v energetice používaná paliva, je z ekonomického důvodu vhodné preferovat turbíny protitlakové. Důvody pro instalaci odběrové kondenzační parní turbíny pak nebývají teplárenské, ale jsou motivovány schopností nabízet systémové služby elektrizační soustavě.

Přehled typických parametrů PPC pro různé typy provedení koncového parního cyklu je uveden v následující tabulce č. 5.4.1.

Tabulka č. 5.4.1 Přehled typických parametrů PPC pro různé typy koncového parního cyklu

Paroplynové cykly	Jedn.	S protitlakovou parní turbínou	S odběrovou parní turbínou	S kondenzační parní turbínou
El. výkon plynové turbíny	MWe	40 ÷ 80	60 ÷ 120	90 ÷ 240
Provedení spalínového kotle		1 ÷ 2 tlakový	2 tlakový	2 ÷ 3 tlakový
El. výkon parní turbíny	MWe	10 ÷ 20	25 ÷ 60	50 ÷ 125
El. výkon PPC celkem	MWe	50 ÷ 100	85 ÷ 180	130 ÷ 255
Tepelný výkon do SCZT	MWt	50 ÷ 100	20 ÷ 80	-
Teplárenský modul	-	0,8 ÷ 1,0	0,9 ÷ 1,2	-

Elektrický výkon plynové turbíny bude záviset zejména na teplotě a tlaku nasávaného vzduchu, elektrický výkon parní turbíny pak na množství a parametrech odebíraného tepla.

Výše popsané faktory se projeví na dílčích i celkových účinnostech PPC, které jsou uvedeny v tabulce č. 5.4.2.

Tabulka č. 5.4.2 Rozsah běžně dosahovaných účinností PPC

Paroplynové cykly	Jedn.	S protitlakovou parní turbínou	S odběrovou parní turbínou	S kondenzační parní turbínou
Účinnost výroby el. energie	%	40 ÷ 45	46 ÷ 50	51 ÷ 53
Účinnost výroby užit. tepla	%	38 ÷ 46	10 ÷ 30	-
Celková účinnost PPC	%	83 ÷ 86	60 ÷ 76	51 ÷ 53

5.4.3 Základní provozní a technologické vlastnosti PPC

Provozní vlastnosti PPC budou v největší míře předurčeny již zmiňovanou volbou typu parní turbíny. Zde se můžeme orientovat buď na teplárenské řešení, tj. zvolit parní protitlakovou turbínu, pak dosáhneme maximální celkové účinnosti byť při menším podílu výroby elektřiny a omezeném rozsahu poskytovaných systémových služeb (v řádu 10 až 30 % výkonu pouze plynové turbíny), nebo se orientovat na elektrárenské řešení, tj. zvolit kondenzační parní turbínu, pak dosáhneme většího podílu výroby elektřiny a širšího rozsahu nabízených systémových služeb elektrizační soustavě, ovšem za cenu nižší celkové provozní účinnosti.

První, teplárenské řešení předurčuje PPC k provozu v základním zatížení s maximální dobou využití instalovaných výkonů, druhé, elektrárenské řešení vyžaduje spíše občasný, špičkový provoz zdroje dle potřeb elektrizační soustavy (respektive dle aktuálních podmínek na trhu s elektrickou energií).

Řešení mezi těmito dvěma krajními polohami, tj. s odběrovou parní turbínou, budou v našich podmínkách méně vhodná, jelikož je velice těžké současně vyhovět protichůdným požadavkům na plynulé dodávky tepla při celkově vysoké účinnosti a požadavkům na nárazový provoz dle potřeb ES zatížený kondenzačními ztrátami při relativně drahém palivu.

Na základě výše uvedeného a s ohledem na skutečnost, že předmětem této práce nejsou zdroje systémových služeb ES, ale zdroje KVET, bude v následujícím popisován již pouze PPC s protitlakovou parní turbínou, navíc s dodávkami tepla v horké vodě.

Technologické vlastnosti PPC budou ovlivněny samostatnými omezeními platnými pro plynovou turbínu a pro parní protitlakovou turbínu. Z hlediska provozního výkonového rozsahu bude limitujícím prvkem spíše plynová turbína, u které zaznamenáváme při poklesu výkonu pod určitou mez i strmý pokles účinnosti, z hlediska četnosti a rychlosti najíždění a odstávek bude naopak limitující spíše parní turbína. Určitým řešením může být využívání bypasového komína za plynovou turbínou, nebo přídavného hořáku ve spalinovém kotli, ovšem vždy to bude na úkor vyšších ztrát, nebo nižšího podílu výroby elektřiny.

Efektivním řešením pro PPC s parní protitlakovou turbínou s dodávkami tepla do horkovodních systémů je instalace akumulátoru tepla, pomocí něhož lze do určité míry a v určitém rozsahu stabilizovat provoz PPC při cyklicky se měnících potřebách dodávky tepla.

Výroba elektrické energie PPC s protitlakovou turbínou bude za normálních provozních stavů (bez využívání by-pasového komína či přitápění ve spalinovém kotli) přímo úměrná dodávkám tepla, tj. charakteristiky závislosti elektrického a tepelného výkonu budou obdobné jako v případě samostatné protitlakové parní turbíny (viz. obr. č. 5.1.2) a samostatné plynové turbíny (viz. obrázek č. 5.3.2), tj. čím vyšší potřeby tepla, tím vyšší výroba elektřiny.

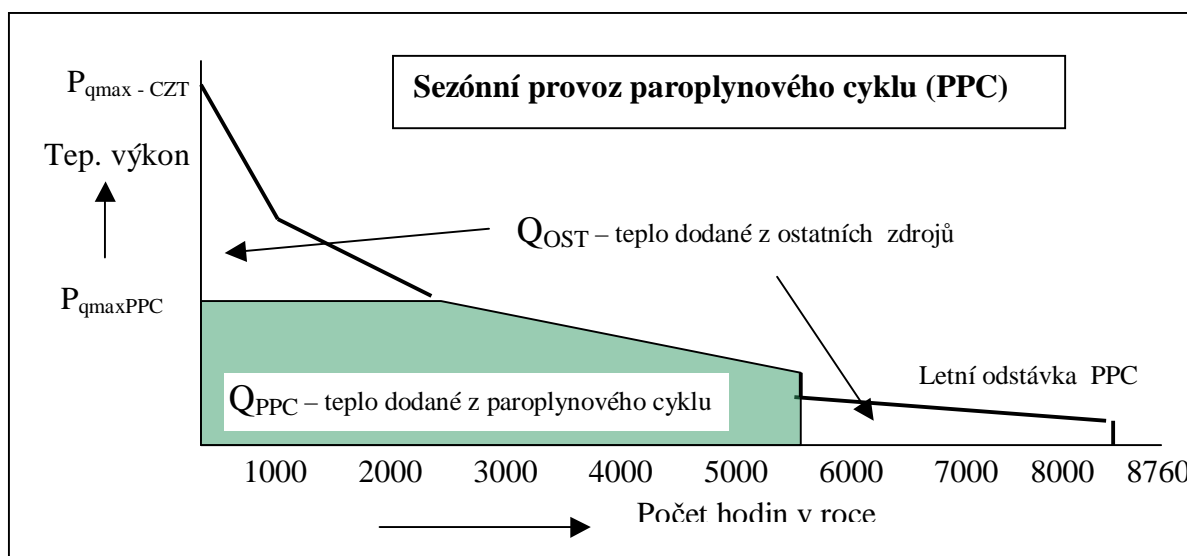
5.4.4 Zásady dimenzování a způsobu provozu PPC

V předchozí kapitole bylo zdůvodněno, že PPC s protitlakovou parní turbínou je předurčen k provozu v základním zatížení. Jelikož se však zpravidla jedná o výkonově velké jednotky, jejich základní provoz by byl možný pouze v těch největších soustavách CZT.

Největší soustavy CZT, kde by PPC našel uplatnění (z hlediska dodávek tepla) i v letním období však jsou zpravidla systémy s více zdroji, kde se v létě dává přednost „levnějšímu“ teplu, nebo teplu, jenž by jinak nebylo kde uplatnit (např. ze spaloven komunálního odpadu, ze zdrojů spalujících biomasu, atd.).

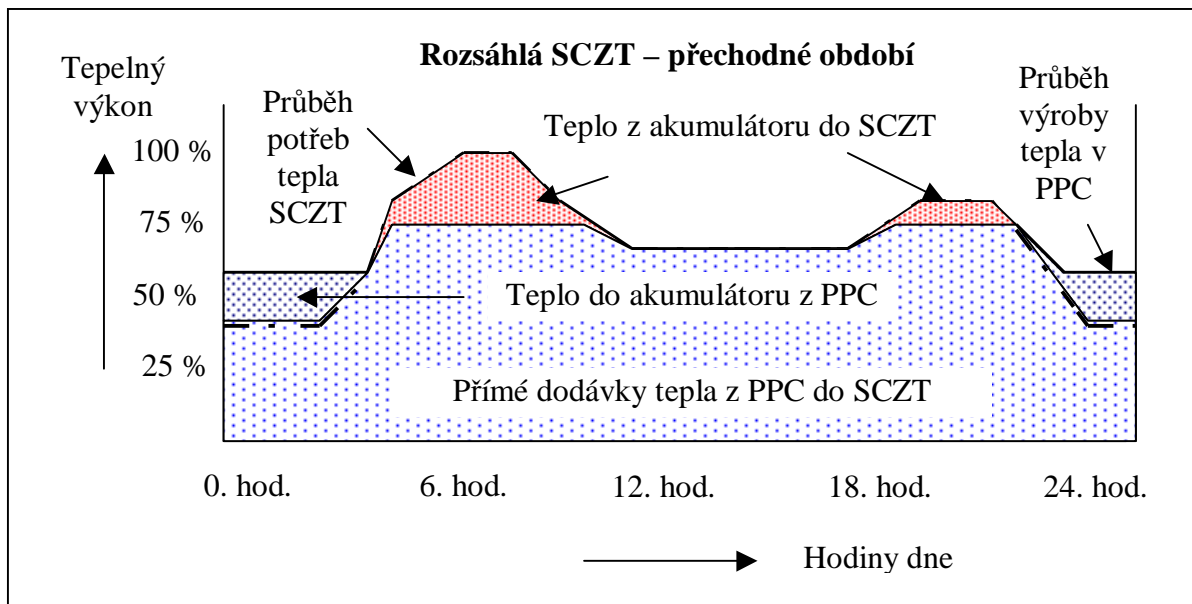
Z těchto důvodů se pak výkony PPC navrhují v úrovni průměrných potřeb tepla v přechodovém období (na jaře a na podzim) tak, aby toto zařízení za pomoci akumulace tepla bylo možno provozovat po celou topnou sezónu.

Znázornění podílu dodávek tepla z PPC na krytí typického diagramu doby trvání potřeb tepla velké HV SCZT je provedeno na obrázku č. 5.4.2.



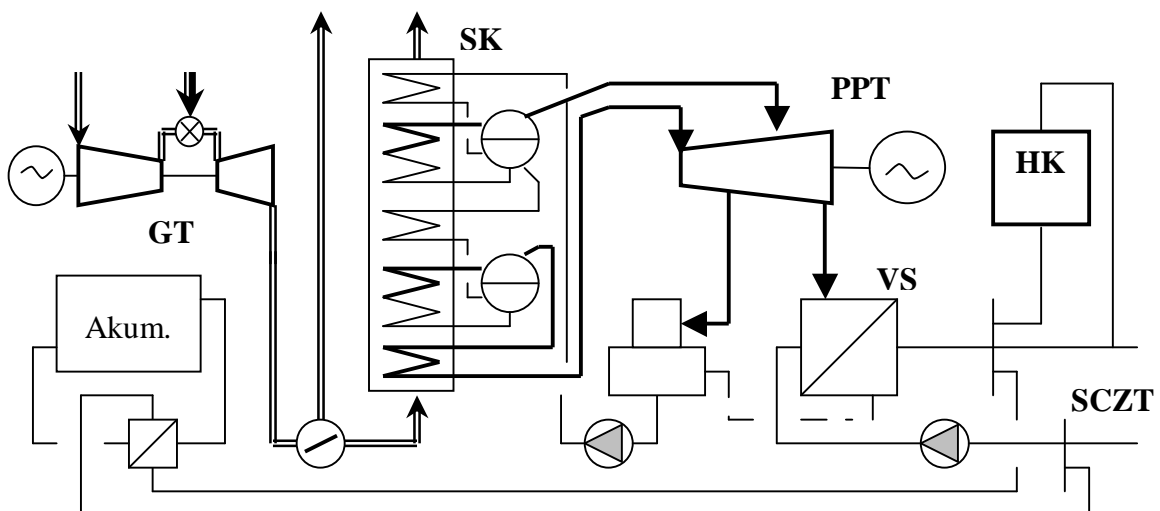
Obrázek č. 5.4.2 Způsob sezónního provozu PPC v rozsáhlém HV systému CZT

Způsob využívání akumulace pro zrovnomnění zatížení PPC odběrem tepla je pro případ denního cyklu s využitím beztlakého akumulátoru situovaného u zdroje znázorněn na obrázku číslo 5.4.3.



Obrázek č. 5.4.3 Způsob provozu PPC s akumulací tepla v přechodném období SCZT

PPC určený kromě výroby elektřiny i pro dodávky tepla bude vyžadovat spolupráci s dalším zdrojem (viz. obrázek č. 5.4.2) pro letní a špičkový provoz, kterým může být například horkovodní kotel, výhodné bude využít i beztlakého akumulátoru tepla (viz. obrázek č. 5.4.3) situovaného například ve zdroji. Příklad nejjednoduššího technologického schématu PPC s protitlakovou PT, spolupracujícím kotlem a akumulátorem tepla je uveden na obr. č. 5.4.4.



Obrázek č. 5.4.4 Zjednodušené schéma PPC s PPT, akumulací a HK s dodávkami tepla v HV

Další, již v předchozích kapitolách zmiňovanou aplikací je nasazení PPC v průmyslu. Jedná se zpravidla o zcela specifická zařízení technicky navržená a technologicky přizpůsobená konkrétním potřebám daného výrobního procesu. Typickými místy instalace jsou papírny, rafinérky, nebo chemické závody. Zde bývají PPC provozovány nepřetržitě (kromě pravidelné odstávky v době celozávodních dovolených), dodávky tepla bývají realizovány ve formě páry.

Využití paroplynových cyklů pro teplotní účely není v podmínkách ČR zas až tak časté, nicméně v následující tabulce č. 5.4.3 jsou uvedeny obvykle dosahované provozní ukazatele při nasazení PPC s protitlakovými parními turbínami jakožto veřejné zdroje s dodávkami tepla do SCZT, nebo jako průmyslové technologické zdroje.

Tabulka č. 5.4.3 Přehled obvykle dosahovaných provozních ukazatelů zdrojů s PPC

Parametr	Jednotka	PPC s dodávkami tepla do veřejné HV SCZT	PPC v průmyslové aplikaci pro potřeby technologie
Celková roční doba provozu PPC	hod	5000 ÷ 6000	7500 ÷ 8500
Doba využití max. výkonu PPC	hod	4000 ÷ 5000	6500 ÷ 7500
Výkonový teplotní součinitel	-	0,4 ÷ 0,6	0,8 ÷ 0,9
Roční teplotní součinitel	-	0,5 ÷ 0,8	0,90 ÷ 0,95

5.4.5 Souhrn hlavních výhod a nevýhod PPC

K hlavním výhodám PPC patří :

- Vysoký podíl vyráběné elektrické energie
- Vysoká účinnost výroby elektřiny i celého cyklu v případě provedení bez kondenzace
- Možnosti dodávky tepla v páře i v horké vodě

K hlavním nevýhodám PPC patří :

- Možnost spalování pouze ušlechtilých paliv
- Vyžaduje kontinuální provoz bez častých odstávek, omezená provozní pružnost
- Technologická komplikovanost, vysoké nároky na kvalitu obsluhy a údržby

K dalším specifickým vlastnostem PPC řadíme :

- Vysoká hlučnost GT (nezbytné umístění v kontejneru nebo protihluková ochrana)
- Malé prostorové nároky pro plynové turbíny, ale velké pro kotel a parní okruh
- Možnost modulového uspořádání a různých modifikací konfigurace

Nejčastější místa nasazení jsou :

- Ve velkých průmyslových závodech s nepřetržitou potřebou elektřiny a páry
- Ve velkých horkovodních SCZT využívajících ušlechtilá paliva
- Ve speciálních provozech s velkou produkcí spalitelných plynů

Nejčastější chyby při aplikaci :

- Výkonově příliš velké jednotky s ohledem na průběhy potřeb elektrické energie a tepla – pokles účinnosti a ekonomie provozu v důsledku malého vytížení a častých odstávek
- Instalace v provozech, kde je možno teplo i elektřinu vyrábět v paralelně instalovaných „levnějších“ zdrojích.

5.5. Spalovací pístové motory (PM)

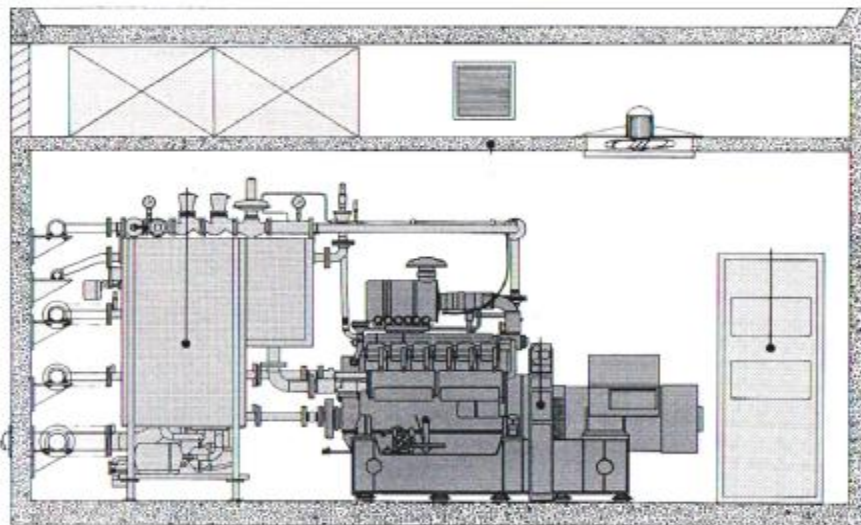
5.5.1 Popis zařízení a princip funkce PM

Spalovací pístové motory jakožto základ jedné z technologií KVET pracují v opakovaném plynovém cyklu, kdy nasátý vzduch je stlačen, po vstřiku a zažehnutí (vznícení) paliva se ohřeje, čímž se značně zvýší jeho objem, respektive v uzavřeném prostoru tlak, a při následné expanzi je tato tlaková energie transformována na mechanickou práci. Princip funkce pístového motoru není třeba dále objasňovat, v podstatě se jedná o stejné zařízení, jako jsou pístové motory používané k pohonu automobilů, lodí, nebo náhradních zdrojů elektrické energie.

Spalovací pístové motory se stávají zdrojem KVET (kogenerační jednotkou) tehdy, pokud je jejich mechanická práce využita prostřednictvím generátoru k výrobě el. energie a pokud je odpadní teplo cyklu efektivně využíváno pro topné účely (za normálních podmínek je odpadní teplo například u automobilových motorů bez užitku odváděno do okolí chladičem a výfukovými plyny). Zdroje KVET s pístovými spalovacími motory však nejsou totožná zařízení s motory a chladiči používanými u automobilů, jedná se o speciální konstrukce, které mají-li technicky a ekonomicky v energetice uspět, musí splňovat několik specifických požadavků.

Předně je to možnost spalovat levnější palivo, než jsou klasický benzín či nafta. Nejčastějším palivem tak bývá zemní plyn, často i čistírenské, nebo skládkové plyny s nižší výhřevností, motory pak vyžadují systém zapalování směsi (často označovány jako plynové motory). Další podmínkou je dlouhá doba životnosti a provozní spolehlivost, proto jsou tato zařízení konstruována jako nízkootáčkové a relativně masivní stacionární stroje schopné stabilního a trvalého provozu. Poslední neméně důležitou podmínkou je požadavek na celkově vysokou účinnost výroby obou forem energie. Jedná se o stroje přepřítňované, bez převodovek, snaha je využít co nejvíce „zdrojů“ odpadního tepla, kterými jsou mazací olej (prostřednictvím výměníku olej/voda), samotný blok motoru (prostřednictvím výměníku voda/voda) a výfukové plyny (prostřednictvím výměníku (spaliny/voda).

Řez spalovacím pístovým motorem s výměníky tepla (300 kWe) je uveden na obr. č. 5.5.1.



Obrázek č. 5.5.1 Řez spalovacím pístovým motorem s výměníky tepla

5.5.2 Základní technické parametry PM

Spalovací pístové motory s výměníky tepla, pro něž se vžil název kogenerační jednotky, jsou vyráběny v poměrně širokém výkonovém rozsahu od desítek kW elektrického výkonu až po několik MW.

Nejmenší stroje jsou dvou, tří či čtyřválcové v kompaktním provedení spolu s výměníky v kontejnerech, největší pak obrovské dvanácti, šestnácti až osmnácti válce vyžadující samostatné hlukově izolované prostory, speciální uložení, samostatné příslušenství, atd., přičemž výměníky tepla jsou umístěny také samostatně v sousedících prostorách.

U nejmenších strojů je možno použít asynchronní generátory, u větších strojů to jsou synchronní generátory, obvykle čtyřpólové což odpovídá 1500 otáčkám/min., nebo šestipólové pro stroje s 1000 otáčkami/min.

Teplo je využíváno prostřednictvím výměníků ohřívajících topnou vodu. V prvních stupních ohřevu bývají řazeny výměníky (chladiče) oleje a bloku motoru (u přeplňovaných strojů často navíc ještě chladiče plnicího vzduchu za turbodmychadlem), ve druhém stupni je topná voda dohřívána výměníkem (chladičem) výfukových plynů (zhruba polovina celkového tepelného výkonu).

Právě rozložení tepelných výkonů do příslušných teplotních úrovní omezuje parametry vyráběného tepla. Vzhledem k relativně malému podílu tepla o vysoké teplotě (pouze ve výfukových plynech) se teplo vyrábí zpravidla pouze ve formě teplé, nebo horké vody, páru lze produkovat pouze v omezené míře. Pro dosažení maximálních celkových účinností bývají voleny výstupní teploty topné vody do úrovně 100 °C.

Přehled typických parametrů kogeneračních jednotek s pístovými spalovacími motory (PM) pro příslušné výkonové rozsahy je uveden v následující tabulce č. 5.5.1.

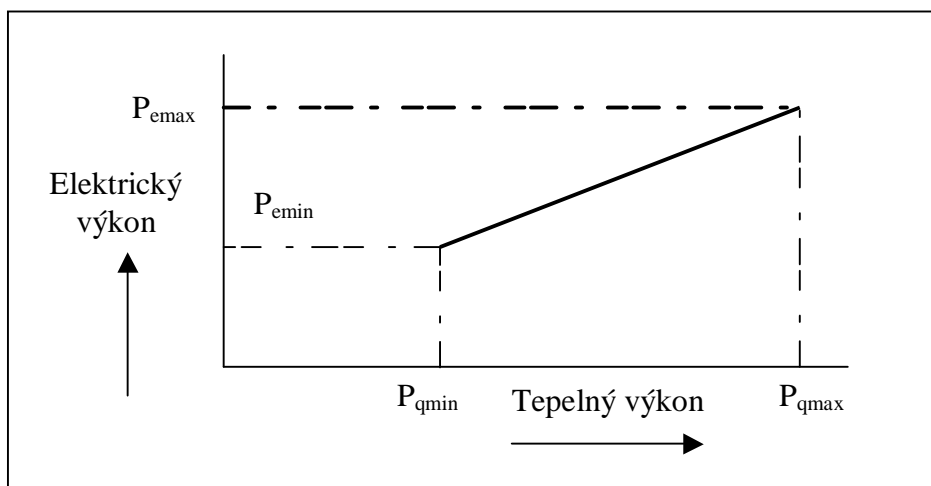
Tabulka č. 5.5.1 Přehled typických parametrů kogen. jednotek s pístovými spal. motory (PM)

	Jedn.	Pístové spalovací motory a výměníky tepla		
Elektrický výkon jednotky (rozsah)	kWe	10 ÷ 100	100 ÷ 1000	1000 ÷ 5000
Tepelný výkon jednotky	kWt	20 ÷ 170	170 ÷ 1500	1400 ÷ 5500
Účinnost výroby el. energie	%	27 ÷ 32	33 ÷ 36	37 ÷ 41
Účinnost výroby tepla	%	48 ÷ 57	46 ÷ 54	45 ÷ 52
Celková účinnost jednotky	%	80 ÷ 84	82 ÷ 87	86 ÷ 89
Teplárenský modul	-	0,50 ÷ 0,59	0,59 ÷ 0,67	0,71 ÷ 0,91

Poznámka : Uváděné parametry odpovídají palivu zemní plyn. Při použití jiného paliva se budou samozřejmě účinnosti lišit úměrně jeho kvalitě (výhřevnosti). Účinnosti a dosažitelné výkony budou rovněž závislé na provozních podmínkách.

5.5.3 Základní provozní a technologické vlastnosti PM

Kogenerační jednotky s pístovými spalovacími motory mají přímou (nikoli však zcela lineární) závislost dodávaného tepelného a elektrického výkonu, jak je znázorněno na obr. č. 5.5.2.



Obrázek č. 5.5.2 Závislost elektrického a tepelného výkonu pístového spalovacího motoru

Samozřejmě, i zde mohou být instalovány pomocné chladicí věže nebo jiná chladicí zařízení, která jsou schopna odvézt přebytečné teplo do okolí v situacích, kdy potřebný elektrický výkon převyšuje potřebný výkon tepelný. Vzhledem k potřebám kvalitního (ušlechtilého), tedy i drahého paliva je snaha provoz s vypouštěním tepla do okolí pokud možno minimalizovat, výjimku mohou tvořit zařízení spalující kontinuálně uvolňovaný „odpadní“ plyn, tedy kogenerační jednotky instalované například v čistírnách odpadních vod nebo u skládek komunálního odpadu.

Jak již bylo zmíněno výše, pístové spalovací motory vyžadují relativně kvalitní plynné, nebo kapalné palivo (ZP, naftu), stroje lze upravit i na spalování méněhodnotných paliv, jako jsou bioplyny (čistírenské, skládkové, dřevní) či jiná biopaliva (směsi s biolihem, bionaftou, atd.), tato však vždy musí splňovat určité nároky na čistotu (viz. problém dehtu v dřevoplynech).

Rozsah provozního výkonového zatížení pístového spalovacího motoru je větší, než tomu bylo v případě plynové turbíny, přičemž pokles účinnosti při provozu stroje na částečném výkonu není tak výrazný.

Nejcharakterističtější vlastností pístového spalovacího motoru je možnost časných a rychlých startů nebo odstávek, dalším kladem je relativně vysoká účinnost výroby elektrické energie i u výkonově menších jednotek (řádově stovky kW).

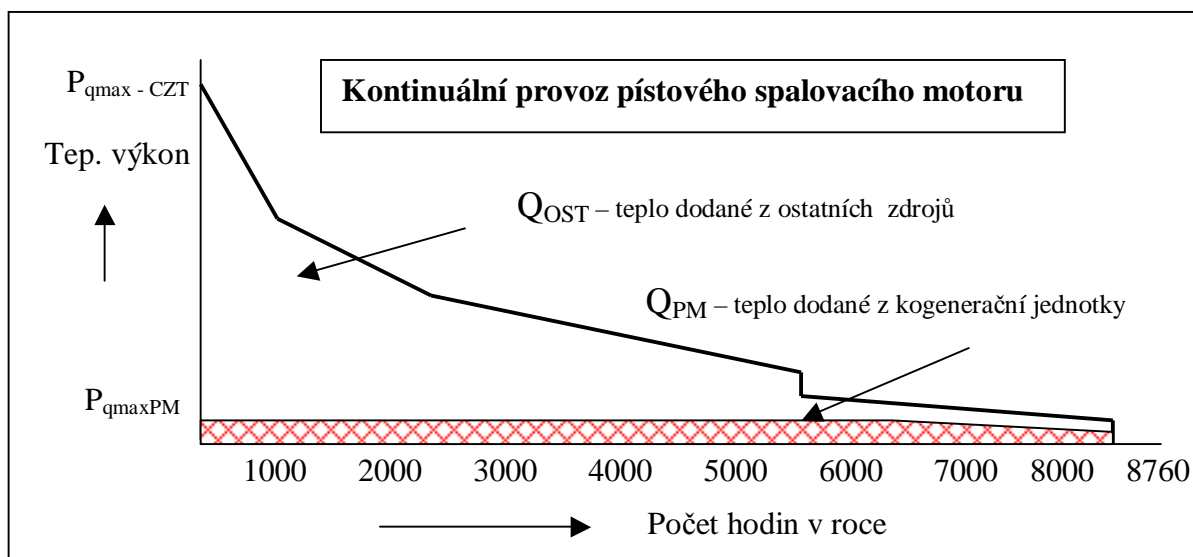
Již z názvu „pístový motor“ je jasné, že se na rozdíl od turbín nejedná o stroj rotační, nýbrž o stroj s cyklickým pohybem pístů tam a zpět a s přenosem lineárních sil na rotační pomocí klikové hřídele. Charakteristickými vlastnostmi každého pístového motoru je vyšší spotřeba mazacího oleje, vyšší opotřebení mechanických součástí a vyšší nároky na utlumení vibrací.

5.5.4 Zásady dimenzování a způsobu provozu PM

Kogenerační jednotky s pístovými plynovými motory můžeme díky jejich vlastnostem (relativně velký výkonový rozsah a možnost četných startů a odstávek) dimenzovat buď s ohledem na průběh potřeb elektrické energie (nejčastěji průběh vlastní spotřeby elektřiny ve zdroji), potom je nezbytná kontrola na možnost kontinuálního uplatnění vyráběného tepla (tepelný výkon by měl být do úrovně letních potřeb příslušné soustavy), nebo je dimenzovat s ohledem na potřeby tepla (obvykle se jedná o vyšší výkony než letní potřeby příslušné soustavy), kdy je možno díky akumulátoru tepla koncentrovat provoz do cenově výhodných tarifních pásem pro dodávky elektrické energie do vnější rozvodné sítě.

V prvním případě se tedy jedná o kontinuální provoz relativně malých jednotek bez dodávek přebytků elektřiny do sítě (veškerá výroba do úrovně vlastní spotřeby), ve druhém případě se jedná o přerušovaný provoz relativně větších jednotek s programově řízenými dodávkami elektřiny do sítě.

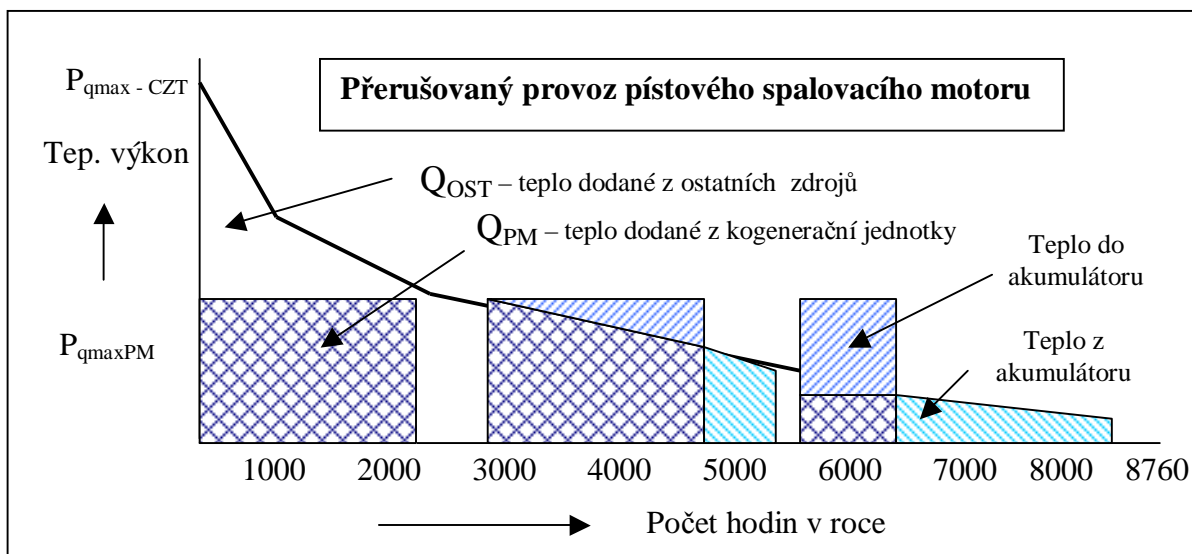
Případ s kontinuálním provozem kogenerační jednotky lze graficky znázornit na diagramu doby trvání potřeb tepla, jak je uvedeno na obrázku č. 5.5.3.



Obrázek č. 5.5.3 Způsob celoročního kontinuálního provozu pístového spalovacího motoru

Z diagramu uvedeného na obrázku č. 5.5.3 je zřejmé, že kogenerační jednotka s pístovým spalovacím motorem bude v tomto případě pouze jakýmsi doplňkovým zařízením, tj. že ostatní zdroje tepla (kotle) a zařízení vlastní spotřeby elektřiny budou dimenzovány na plný výkon. Účelem kogenerační jednotky s pístovým spalovacím motorem pak bude pouze snížit náklady na nákup elektrické energie ze sítě.

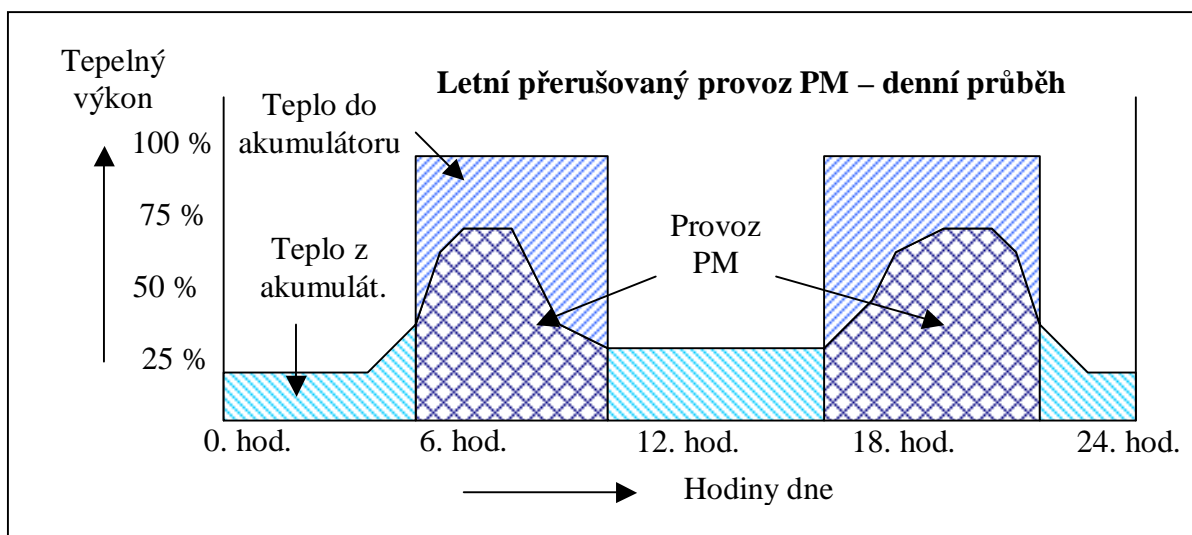
Druhý případ s přerušovaným provozem kogenerační jednotky a využíváním akumulace tepla je znázorněn na obrázku č. 5.5.4.



Obrázek č. 5.5.4 Příklad přerušovaného způsobu provozu PM

I v případě přerušovaného způsobu provozu se samozřejmě neobejdeme bez spolupracujících zdrojů tepla, tepelný výkon kogenerační jednotky lze však považovat za plnohodnotnou součást instalovaných kapacit pro krytí špičkových potřeb tepla.

Přerušovaným způsobem provozu rozumíme například šestnáctihodinový provoz v zimním období (odstávky na noc), dvanáctihodinový provoz v přechodném období (odstávky v době poledního útlumu a na noc) a osmihodinového provozu v letním období (čtyři hodiny ráno a čtyři hodiny večer), jak je znázorněno na obrázku č. 5.5.5.



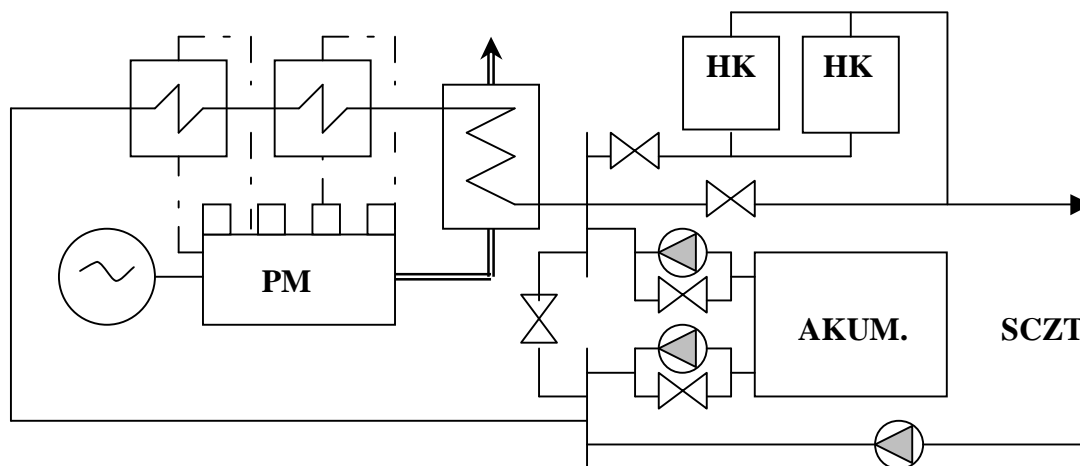
Obrázek č. 5.5.5 Znáznornění přerušovaného provozu PM na denním diagramu potřeb tepla

Přerušovaný způsob provozu, respektive denní časová pásma provozu PM můžeme volit i podle jiných kritérií, než je demonstrováno na obrázcích č. 5.5.4 a č. 5.5.5.

Tak například cenový výměr pro příspěvky k výkupní ceně elektřiny vyráběné formou KVET rozlišuje výše příspěvku dle toho, zda zdroj je provozován nepřetržitě, nebo pouze 8 hodin denně v pásmu vysokého tarifu (platí pro zdroje do 5 MWe instalovaného výkonu).

Obdobně jiné časové podmínky pro optimální dobu provozu PM mohou nastat v průmyslových podnicích, které mají specifické nároky na průběh odběru elektřiny nebo individuální obchodní smlouvy na nákup elektřiny ze sítě.

Příklad zjednodušeného technologického schématu zdroje s pístovým spalovacím motorem, spolupracujícím kotlem a akumulátorem tepla je uveden na následujícím obrázku č. 5.5.6.



Obrázek č. 5.5.6 Zjednodušené technologické schéma zdroje s pístovým spalovacím motorem

Pístové spalovací motory, respektive kogenerační jednotky s pístovými spalovacími motory nacházejí využití především ve středních, popřípadě i v malých zdrojích, kde se vyskytují současně potřeby tepla v teplé vodě a potřeby elektrické energie v nižších napěťových hladinách. Jedná se o zdroje pro rozsáhlejší komplexy objektů občanské vybavenosti (nemocnice, plavecké a sportovní haly, obchodní a administrativní centra), nebo i sídlištní či areálové kotelny. Velice časté aplikace jsou i v čistírnách odpadních vod, u skládek komunálního odpadu, perspektivní se jeví nasazení PM u bioplynových stanic například v zemědělských, dřevozpracujících či potravinářských komplexech.

V následující tabulce č. 5.5.2 jsou uvedeny obvykle dosahované provozní ukazatele při základním nepřerušovaném provozu PM a při provozu PM s pravidelnými odstávkami.

Tabulka č. 5.5.2 Přehled obvykle dosahovaných provozních ukazatelů zdrojů s PM

Parametr	Jednotka	PM při celoročním kontinuál. provozu	PM při přerušovaném způsobu provozu
Celková roční doba provozu PM	hod	8000 ÷ 8500	2500 ÷ 4000
Doba využití max. výkonu PM	hod	7500 ÷ 8000	2000 ÷ 3500
Výkonový teplotní součinitel	-	0,05 ÷ 0,1	0,4 ÷ 0,6
Roční teplotní součinitel	-	0,2 ÷ 0,4	0,5 ÷ 0,8

5.5.5 Souhrn hlavních výhod a nevýhod PM

K hlavním výhodám PM patří :

- Možnost rychlého najetí a odstávky
- Vysoké účinnosti i u výkonově relativně malých jednotek
- Modulové uspořádání a jednoduchá instalace, malé prostorové nároky

K hlavním nevýhodám PM patří :

- Možnost spalování pouze ušlechtilých paliv
- Hlučnost a vibrace, nezbytnost pružného uložení a protihlukové ochrany
- Vysoká celková účinnost pouze při dodávkách tepla ve formě teplé vody

K dalším specifickým vlastnostem PM řadíme :

- Častější servis, vyšší spotřeba mazacích olejů.
- Možnost bezobslužného, plně automatického a dálkového řízení provozu
- Možnost integrace do složitějších technologických celků, jako je např. trigenerace

Nejčastější místa nasazení jsou :

- Okrskové, nebo areálové plynové kotelny
- Energocentra obchodních, školských, nemocničních, sportovních a administrativních komplexů
- Čistírny odpadních vod, skládky komunálních odpadů, bioprovozy

Nejčastější chyby při aplikaci :

- Výkonově příliš velké jednotky s ohledem na průběhy potřeb tepla – omezená doba provozu, nutnost využívat pomocné chladiče
- Lokalizace v místech, kde elektřinu a teplo lze získat z levnějších zdrojů (el. ze sítě vvn nebo vn, teplo ze zdroje na biomasu nebo z levného SCZT).

5.6 Další technologie KVET

K dalším technologiím KVET řadíme zařízení, která buď svým rozsahem nasazení či úhrnným instalovaným výkonem nehrají v celkových bilancích zdrojů KVET takovou roli, nebo zařízení, která jsou stále ve stádiu vývoje a dosud nejsou běžně komerčně využívána.

Jedná se o technologie KVET :

- Mikroturbína
- Stirlingův motor
- Palivový článek
- Parní stroj
- Organický Rankinův cyklus

Základním popisům těchto technologií a perspektivám jejich budoucího uplatnění jsou věnovány následující kapitoly.

5.6.1 Mikroturbína

Pojmem mikroturbína obvykle označujeme vysokootáčkové plynové turbíny o elektrickém výkonu 10-100 kW. Pokud je toto zařízení doplněno o tepelný výměník využívající teplo v odcházejících spalinách pro ohřev vody nebo výrobu páry, stává se mikroturbína zdrojem KVET obdobně jak to mu bylo v případě plynové turbíny s rekuperací tepla (viz. kap. 5.3).

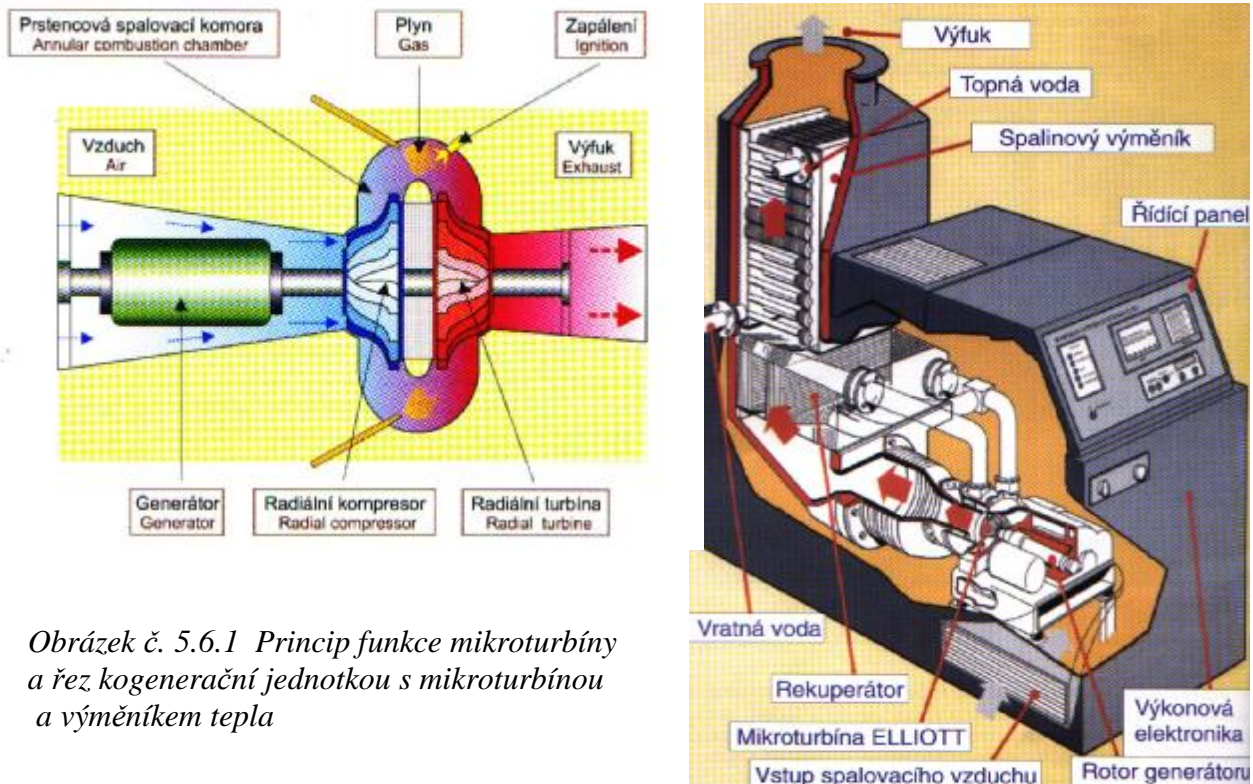
Nejběžnější mikroturbíny mívají na společné hřídeli jednostupňový radiální kompresor, jednostupňovou radiální turbínu a generátor elektrického proudu. Výfukové spaliny jsou využívány pro předehřev vzduchu vstupujícího do spalovací komory (v rekuperátoru) a pro ohřev vody využitelné pro topné účely nebo přípravu TUV (ve spalinovém výměníku).

Mikroturbíny obvykle spalují zemní plyn, potřebný tlak je 0,4 až 0,8 MPa. To je více, než je běžný tlak ve středotlaké plynovodní síti (max. 0,4 MPa), proto je nutné tlak plynu zvyšovat na potřebnou úroveň pomocí plynového kompresoru. Před spalovací komorou musí být zařazeny palivové filtry pro čištění plynu.

Vysokorychlostní generátor vyrábí elektrický proud indukcí ve vinutí statoru otáčením elektromagnetu (rotoru). U mikroturbín s vysokými otáčkami jsou rotory většinou tvořeny permanentními magnety. Vyráběná elektrická energie je pomocí tzv. elektronické převodovky usměrňována a střídačem měněna na standardní sinusový 50 Hz průběh běžný v el. síti.

Teplu je využíváno prostřednictvím vychlazování spalin ve výměníku, čímž dochází k ohřevu teplotnosného média.

Princip funkce mikroturbíny a uspořádání zdroje KVET (kogenerační jednotky) s mikroturbínou a výměníkem tepla jsou znázorněny na obrázku č. 5.6.1.



Obrázek č. 5.6.1 Princip funkce mikroturbíny a řez kogenerační jednotkou s mikroturbínou a výměníkem tepla

Elektrická účinnost mikroturbín bývá v rozmezí 25 % až 30 %, celková energetická účinnost (při využití tepla) dosahuje hodnot 70 až 80 %. Využitelný tepelný výkon bývá zpravidla dvojnásobný, než je dosahovaný výkon elektrický.

Přehled vybraných parametrů několika typů mikroturbín je uveden v tabulce č. 5.6.1.

Tabulka č. 5.6.1 Vybrané parametry několika typů mikroturbín

Výrobce a typ mikroturbíny	Výkon elektr.	Výkon tepelný	Účinnost elektric.	Účinnost celková	Spalovací komora	Typ ložisek	Jmenovitá otáčky
	kWe	kWt	%	%			
Capstone C30	30	60	23-25	68-70	prstenec	vzduch	96000
Capstone C60	60	120	24-26	-	prstenec	vzduch	96000
IR Powerworks	70	150	28	80	silu	olej	-
Elliot GT80	80	150	25	74	prstenec	olej	68000
Turbec T100	100	167	30	80	silu	olej	70000

Základní výhodou mikroturbín je kompaktnost, nízká hmotnost, vysoká provozní flexibilita a spolehlivost, stejně tak i možnost rychlých a četných startů či provoz při částečném výkonu.

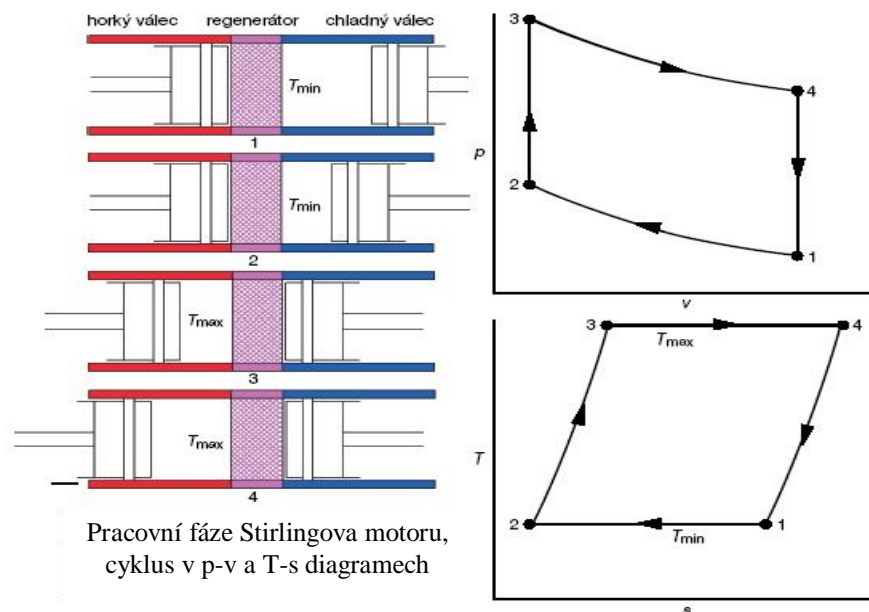
Hlavními nevýhodami jsou vysoká cena a relativně nízká elektrická účinnost, což jsou hlavní důvody dosud malého počtu aplikací v našich podmínkách.

Zdroje KVET s mikroturbínami mohou do budoucna najít uplatnění všude tam, kde se dosud nasazují menší kogenerační jednotky s pístovými spalovacími motory, které jsou však zatím levnější a mají vybudovanou širokou síť prodejního a servisního zázemí.

5.6.2 Stirlingův motor

Mezi dosud nepříliš rozšířené pístové motory patří také motory s vnějším spalováním, známé jako teplovzdušné nebo také Stirlingovy motory. Tyto motory se od ostatních pístových strojů odlišují především tím, že mají dva trvale vzájemně propojené zdvihové prostory s rozdílnou teplotou. Pracují s uzavřeným oběhem pracovní látky, což je obvykle inertní plyn, který je střídavě ohříván a ochlazován.

Stirlingův cyklus začíná izotermickou kompresí, při které je práce potřebná na stlačení pracovní látky ekvivalentní teple odváděnému do okolí. Vnitřní energie pracovní látky se proto nemění. Cyklus pokračuje izochorickým dějem, při kterém teplo dodané regenerátorem pracovní látce zvýší její teplotu a tím vzroste i tlak. Regenerátor, který je součástí takového tepelného stroje, si lze představit jako termodynamickou "houbu", která má schopnost teplo postupně přijímat a opět odevzdávat. Následuje izotermická expanze, při které se teplo od vnějšího zdroje předá pracovní látce a ta vykoná ekvivalentní práci. Cyklus se uzavírá izochorickým dějem, při kterém pracovní látka odevzdá teplo regenerátoru, a tím se sníží její teplota a tlak. Průběh Stirlingova cyklu je znázorněn na obrázku č. 5.6.2.



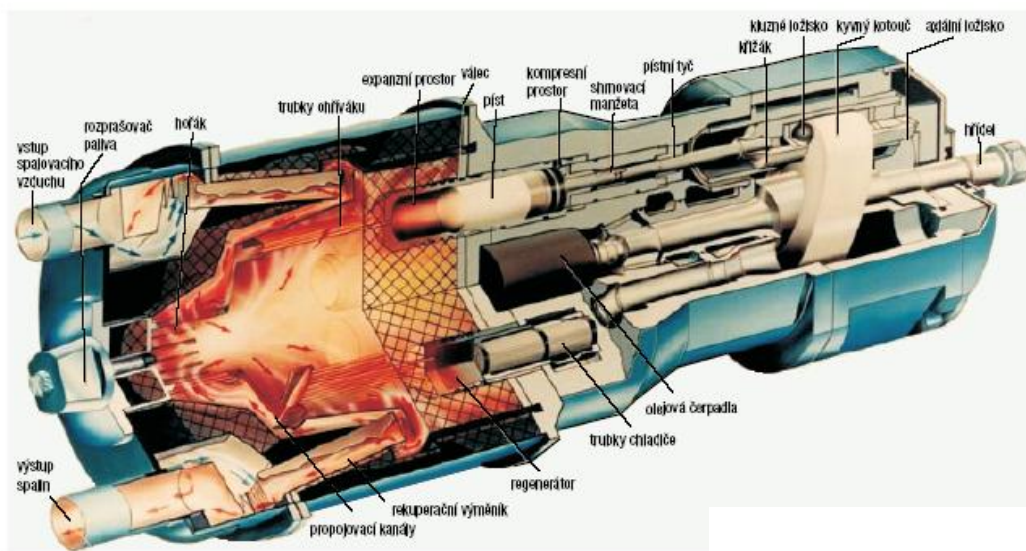
Obrázek č. 5.6.2 Znáznornění jednotlivých fází Stirlingova cyklu

Spuštění motoru je velmi snadné a spolehlivé, stačí zahřát hlavu válce na potřebnou teplotu. Nově vyvinuté a zdokonalené Stirlingovy motory druhé generace s regenerátorem dosahují při maximálním výkonu až 4000 otáček za minutu a regenerátor umožňuje za 0,02 s změnit teplotu plynů o několik set stupňů Celsia, čímž se zvyšuje účinnost zařízení na 38 až 42 % (odpovídá nejlepším naftovým motorům).

K hlavním výhodám Stirlingových motorů patří možnost přímého využití prakticky jakéhokoliv paliva, popřípadě i odpadního tepla z technologických procesů, a to díky vnějšímu přívodu tepla, dále pak vyšší vnitřní tepelná účinnost oproti motorům s vnitřním spalováním, výrazně nižší servisní náklady díky dlouhým servisním intervalům, dlouhá životnost daná především skutečností, že olej není v přímém kontaktu se spalinami ani horkými díly motoru, nulovou spotřebou oleje a velmi nízkou hlučností.

K hlavním nevýhodám oproti klasickým spalovacím motorům však patří zejména vyšší cena, daná náročnou montáží, speciálními materiály některých komponent a nutností použití technologií nevhodných pro sériovou výrobu.

Řez jedním z možných typů Stirlingova motoru je uveden na obrázku č. 5.6.3.



Obrázek č. 5.6.3 Řez jedním z možných typů Stirlingova motoru

Uplatnění Stirlingových motorů ve zdrojích KVET lze do budoucna očekávat jako alternativu k v současnosti používaným kogeneračním jednotkám s pístovými spalovacími motory a to zejména tam, kde budou vyšší nároky na nehučnost chodu nebo tam, kde bude k dispozici levný zdroj vysokopotenciální tepelné energie (například ze spalování biomasy, plynů nevhodných pro vnitřní spalování, atd.).

Bude se jednat o výkonově menší jednotky, které najdou uplatnění v malých a středních zdrojích KVET.

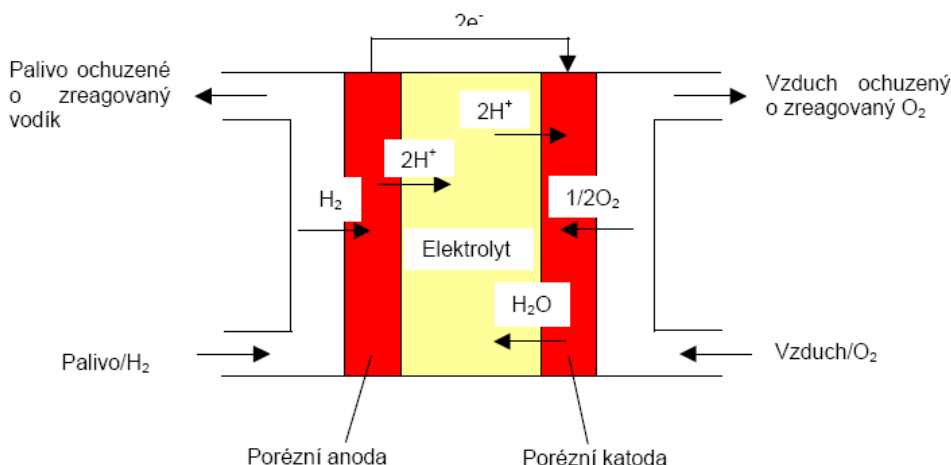
5.6.3 Palivový článek

Palivové články jsou zařízení, produkující elektrickou energii přímou konverzí chemické energie paliva na energii elektrickou. Pracují tiše, spolehlivě, s vysokou účinností a jejich provoz má jen zcela minimální negativní vliv na životní prostředí.

Využití palivových článků se očekává ve třech oblastech. Do první patří statické kogenerátory elektrické a tepelné energie, jejichž účinnost se díky využitelnosti odpadního tepla pohybuje mezi 80-85 %. Připravována je výroba jednak malých kogenerátorů pro rodinné domy o elektrickém výkonu 5-10 kW, jednak velkých zařízení pro velké budovy nebo komplexy budov. Jejich elektrický výkon bude podle potřeby a druhu palivového článku 200 kW až 1000 kW.

Do druhé oblasti patří využívání palivových článků pro všechny druhy pozemní a vodní dopravy, v první řadě však pro pohon automobilů. Miniaturní přenosné palivové články představují třetí oblast jejich užití. Tyto budou sloužit k pohonu veškerých přenosných elektronických zařízení a všude tam, kde se v současné době používají akumulátory a baterie.

Základní princip činnosti palivového článku je znázorněn na obrázku č. 5.6.4.



Obrázek č. 5.6.4 Základní princip funkce palivového článku

Palivové články dělíme jednak podle používaného typu elektrolytu, jednak podle teploty, při které pracují.

Palivové články s kyselinou fosforečnou (PAFC) - technologie PACF je v současnosti ze všech technologií palivových článků v nejvyšším stádiu vývoje a je již v prvním stádiu komercializace. V USA, Japonsku a Evropě již ke konci roku 1997 bylo instalováno více než stopadesát 200 kW jednotek těchto palivových článků. PAFC pracují s celkovou tepelnou účinností vyšší než 80 % (PC 25 firmy ONSI dosahují celkové tepelné účinnosti 85 %). Elektrická účinnost se pohybuje včetně krytí vlastní spotřeby okolo 40 – 45 %.

Karbonátové palivové články (MCFC) - palivové články MCFC pracují s taveninou, nasáknutou v keramické membráně. Tavenina je tvořena alkalickými uhličitany. MCFC pracují při vyšších teplotách - okolo 650 °C. MCFC jsou vyvíjeny pro energetické zdroje v průmyslovém sektoru a díky tomu, že pracují při vyšších teplotách jsou žhavými kandidáty pro aplikace, založené na kombinovaném cyklu, kde vystupující plyny jsou využívány na generování další energie. MCFC patří mezi takzvanou druhou generaci palivových článků. Palivové články MCFC jsou dnes v USA, Japonsku a vyspělých státech Evropy v prvním stádiu komercializace, nebo ve stádiu prvních ověřovacích provozů. Například firma Energy Research Corporation, USA, uvedla již v červnu 1996 do provozu 2-MW MCFC zdroj na zemní plyn jako demonstrační projekt.

Palivové články s pevným elektrolytem (SOFC) - palivové články SOFC používají keramický pevný elektrolyt, zpravidla obsahující jako základní složku ZrO_2 a pracují při teplotě okolo 1000 °C. Vysoká teplota dává větší možnosti při výběru paliva, nabízí k využití kombinovaný cyklus a také umožňuje použití interního reformingu. Při vývoji SOFC výrobci převážně předpokládají, že SOFC budou součástí kombinovaného cyklu, kde budou dále napojeny na jednu nebo více plynových turbín. Předpokládaná elektrická účinnost je 62-72% v závislosti na konstrukci. V současné době pracuje v provozních podmínkách například 100 kW demonstrační jednotka SOFC v Holandsku.

Stručný přehled různých typů palivových článků uvádí následující tabulka č. 5.6.2.

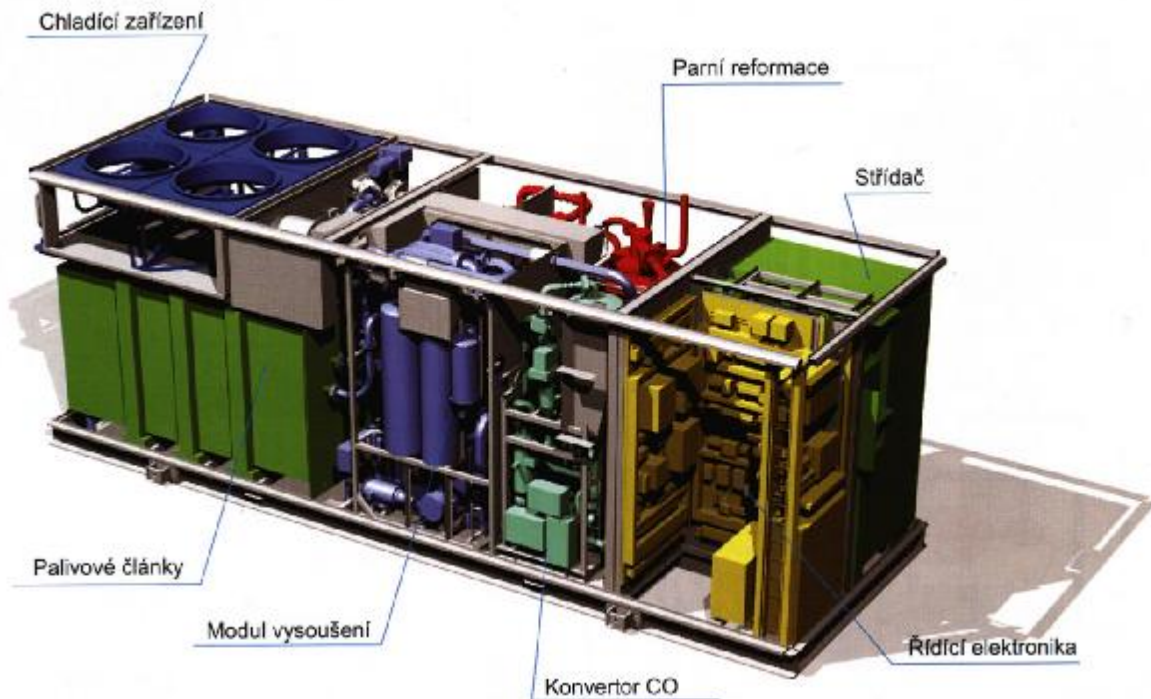
Tabulka č. 5.6.2 Přehled palivových článků podle elektrolytu a pracovní teploty

Článek		Elektrolyt	Pracovní teplota (°C)	Rozmezí výkonů
Nízkoteplotní	Alkalický (AFC) Membránový (PEMFC)	Roztok KOH Iontoměničová membrána	70 - 100 20 - 100	0,5 - 100 kW do 500 kW
Středněteplotní	Kyselý (PAFC)	Roztok kyseliny fosforečné	170 - 200	do 15 MW
Vysokoteplotní	Z tavených karbonátů (MCFC) Z vodivých oxidů (SOFC)	Tavenina karbonátů Li, Na, K Keramické oxidy zirkonia	600 - 700 700 - 1000	do 100 MW do 100 MW

Z uvedených druhů palivových článků všechny s výjimkou alkalických mohou používat vedle vodíku i reformovaná paliva a jako oxidační činidlo kyslík z okolního vzduchu.

Cena energie z kogeneračních jednotek s různými typy palivových článků je doposud značně nad cenou tržní, převážně díky vysokým pořizovacím nákladům. Mimo jiné i z těchto důvodů nejsou palivové články dosud rozšířeny, nelze tedy ani přesně určit optimální způsob jejich provozu. Dá se však předpokládat, že palivové články najdou v budoucnu uplatnění hlavně v tzv. „malé energetice“, v první fázi v provezech a zařízeních s vysokými nároky na spolehlivost, čistotu a efektivnost energetického zdroje s důrazem na ochranu životního prostředí.

Pohled na složení energetického zdroje s palivovým článkem je uveden na následujícím obrázku č. 5.6.5.



Obrázek č. 5.6.5 Pohled na energetický zdroj s palivovým článkem

5.6.4 Parní stroj

Parní stroje patří historicky k nejstarším strojům transformujícím tepelnou energii na energii mechanickou. Tato zařízení jsou dobře známá z parních lokomotiv, parních průmyslových pohonů, atd.

V současné době již tato zařízení jakožto pohony v dopravě a v průmyslu nejsou využívána, rovněž tak v energetice byly původní pístové stroje nahrazeny turbínami.

Parní stroje však mohou najít své uplatnění v případech, kdy jeden zdroj, např. středotlaký parní kotel, vyrábí současně páru pro dvě tlakově a teplotně rozdílné úrovně užití, tj. část vyráběné „průmyslové“ páry je redukována na páru „topnou“.

K redukcí páry je pak možno využít buď klasické regulační armatury (zpravidla se zástříkem pro zchlazení páry), nebo točivé redukce (buď v klasickém provedení s axiální parní turbínou, nebo s vysokootáčkovým radiálním oběžným kolem – viz. kapitola protitlakové parní turbíny), a nebo pístové parní stroje, kde jsou tlakovou parou plněny válce stroje.

Parní pístový stroj (motor) může pracovat do protitlaku (KVET), nebo do kondenzace. Podle využitelného spádu a množství páry je možné řadit parní stroje paralelně nebo sériově. Výkon stroje je dán zpracovatelným tlakovým spádem, který je k dispozici, počtem otáček, které jsou dány přiřazeným typem generátoru a vstupními parametry páry, určujícími současně její potřebné množství.

Přehled základních parametrů jednoho příkladu parního stroje dostupného na trhu je uveden v tabulce č. 5.6.3.

Tabulka č. 5.6.3 Základní technické parametry parního pístového stroje

Pracovní médium	sytá nebo přehřátá pára, stlačené plyny včetně spalín	
Maximální vstupní teplota	°C	260
Maximální vstupní tlak	MPa	2
Maximální otáčky motoru	1/min.	750
Maximální elektrický výkon	kW	120
Maximální spotřeba páry	kg/h	2800
Hmotnost	kg	2500
Rozměry	mm	délka: 2750, šířka: 880, výška: ~1440

Parní stroj je vhodný jen pro menší vstupní tlaky páry, vyšší tlak a teplotní spád může lépe zpracovat turbína (točivá redukce). Výhodou parního stroje je schopnost zpracovat i mírně znečištěnou páru, nevdí mu ani vyšší vlhkost páry. Nevýhodami jsou vysoká hmotnost a nízká termodynamická účinnost. Pohled na jednotku s pístovým parním strojem je uveden na obrázku č. 5.6.6.



Obrázek č. 5.6.6 Pohled na zařízení s pístovým parním strojem

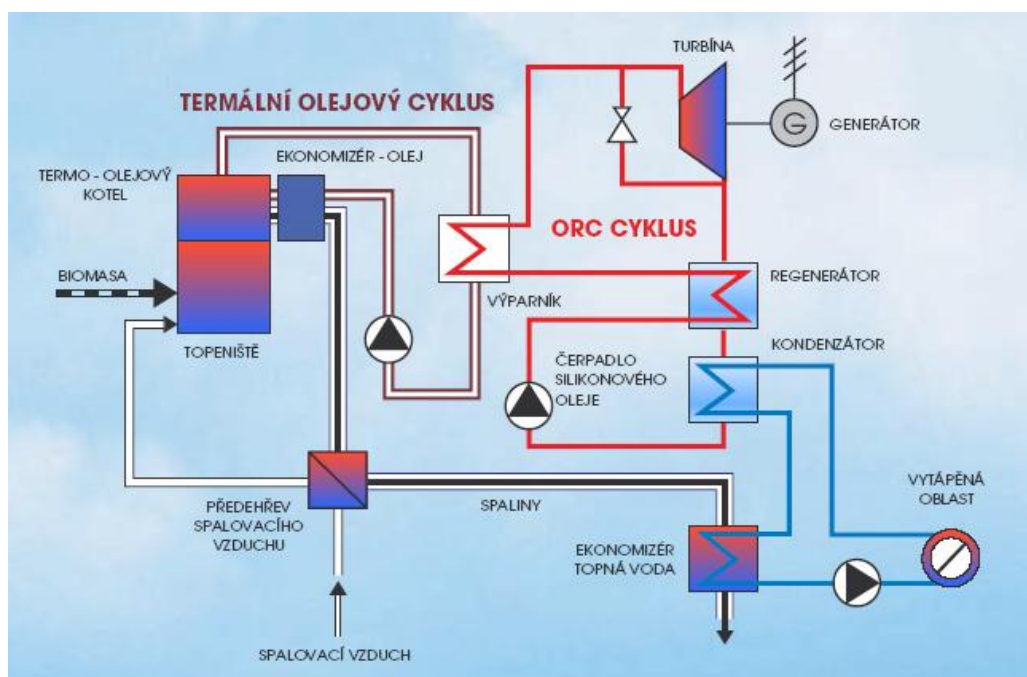
5.6.5 Organický Rankinův cyklus

Jednou z perspektivních technologií, obzvláště ve spojení se spalováním biomasy je tzv. Organický Rankinův cyklus (ORC). Pracovní látkou v klasickém Rankinově cyklu je voda, respektive vodní pára. Pro zařízení pracující při nižší teplotě ve výparníku se jeví výhodnější používat jiné pracovní látky, než vodu. Tyto pracovní – organické látky jsou charakteristické vyšší molární hmotností, komplexnější molekulovou stavbou a při nasazení pak poskytují vyšší účinnost cyklu při aplikaci jednodušší jedноступňové turbíny.

V konstrukčně relativně jednoduchém kotli se ohřívá termoolej, např. na cca 300 °C. Olej jde do výparníku, kde se vyvíjí plyn z organického pracovního média. Plyn je veden do pomaloběžné axiální turbíny. Z turbíny je plyn odváděn do regenerátoru a kondenzátoru, kde je ochlazen a zkapalněn. Tím je uzavřen pracovní cyklus. Teplo pro odběratele se získává z ekonomizéru za kotlem.

Pro teploty pod 200 °C se jako pracovní látka používají alkyly, freony, případně jiná média známá z chladicí techniky (z reverzního Rankinova cyklu), pro vyšší teploty do 400 °C se používají např. aromatické uhlovodíky, popřípadě jiná organická média či jejich směsi. Většina organických látek má (na rozdíl od vody) kladnou směrnici křivky syté páry, expanze v turbíně pak probíhá do oblasti přehřáté páry a otevírá možnost použití rekuperátoru, který využívá teplo přehřátí k ohřevu kapalné fáze a zvyšuje tak účinnost výroby elektrické energie.

System je tedy schopen transformovat energii při poměrně nízké teplotě. Použitá turbína má relativně vysokou účinnost zejména při částečném zatížení, její nízké otáčky umožňují přímý pohon generátoru, eroze turbínových lopatek je minimální (nepřítomnost kapiček pracovního média) a významná je rovněž možnost jakékoli regulace výkonu turbosoustrojí v celém výkonovém rozsahu. Technologické schéma ORC je uvedeno na následujícím obrázku č. 5.6.7.



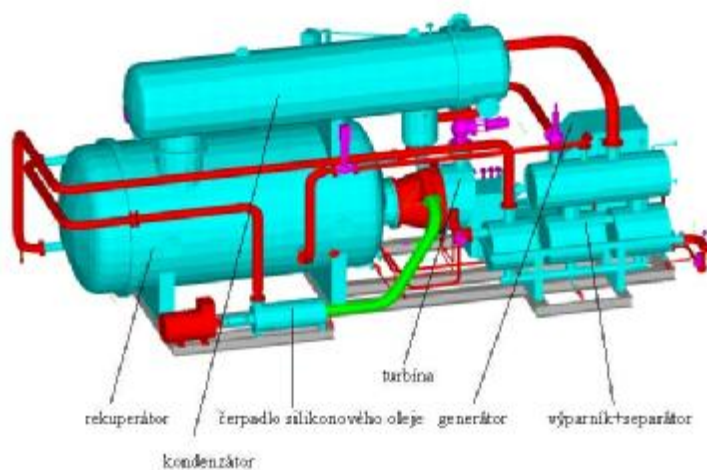
Obrázek č. 5.6.7 Technologické schéma Organického Rankinova Cyklu

V 70. a 80. letech minulého století začaly být vyvíjeny jednotky ORC zejména pro stacionární pozemní aplikace využívající geotermální energii, solární energii, tepelnou energii oceánů, odpadní energii (z průmyslových procesů), atd.

Pokud zohledníme potenciální možnosti pro nasazení ORC v ČR, lze uvažovat zejména s aplikacemi pro výrobu elektrické energie v menších a středních zdrojích spalujících biomasu, kde s ohledem na velikost kotle a kvalitu biomasy není možno vyrábět vysokotlakou přehřátou vodní páru.

Zařízení nabízená v ČR pracují s teplotami 250 až 300 °C při tlaku maximálně 0,3 MPa, elektrický výkon zařízení je 200 až 1500 kW. Z hlediska teploty pracují kontinuálně (dáno provozem kotle na biomasu) jakožto základní zdroje dodávek tepla do CZT.

Příklad uspořádání jednotlivých komponent ORC cyklu je znázorněno na obrázku č. 5.6.8, pohled do strojovny v reálném provozu ORC je uveden na obrázku č. 5.6.9.



Obrázek č. 5.6.8 Příklad uspořádání komponent ORC



Obrázek č. 5.6.9 Pohled do reálného provozu strojovny ORC

6 PERSPEKTIVY ZDROJŮ KVET

6.1 Velké teplotárenské zdroje

Do budoucna se dá očekávat ve **velkých** teplotárenských zdrojích výstavba spíše „Integrovaných multifunkčních a flexibilních zdrojů“ než výstavba speciálních jednoúčelových vysoce účinných zařízení.

Tzv. integrované multifunkční a flexibilní zdroje budou umožňovat :

- Využití více druhů paliv s možností jejich spoluspalování
- Změnu podílu vyráběné elektrické energie, tepla, popřípadě dalších produktů
- Využití synergických efektů při poskytování širokého spektra služeb

Využití více druhů paliv s možností jejich spoluspalování bude znamenat snížení rizik zdrojů KVET na straně vstupů. Ve zdrojích KVET tak budou aplikována topeniště (kotle, reaktory), jenž budou moci spalovat, nebo zplyňovat různé druhy uhlí, zároveň v nich bude možno spalovat nebo zplyňovat různé druhy biomasy. Jako další paliva zde budou využívány zemní plyn, skládkové plyny, bioplyny, důlní plyny, a to jednak pro přímé spalování, nebo pro pohon plynových turbín generujících spalovací nebo reakční vzduchy, atd.

Bude se jednat především o pokročilé atmosférické a tlakové fluidní kotle, popřípadě i zplyňovací reaktory, plynové turbíny. Uplatnění najdou i pokročilé konstrukce roštových kotlů.

Změna podílu vyráběné elektrické energie a tepla, popřípadě dalších produktů bude znamenat snížení rizik zdrojů KVET na straně výstupů. Ve zdrojích KVET tak bude instalováno zpravidla více typů turbosoustrojí parních, popřípadě i plynových. Minimálně jedno parní turbosoustrojí bude s kondenzací, nebo alespoň s potlačenou kondenzací, minimálně jedno plynové turbosoustrojí bude mít možnost provozu na by-pasový komín.

Důvodem pro tato technologická schémata budou měnící se podmínky na trhu elektrické energie (cena elektřiny z obnovitelných zdrojů, otevřený trh služeb pro elektrizační soustavu, dodávky silové elektřiny, přímé dodávky velkým odběratelům dle jejich odběrových diagramů, atd.) Dalšími produkty se rozumí například dodávky vysokotlaké páry pro technologické účely, výroba chladu pro distribuci, produkce sádry nebo stabilizátu pro stavební průmysl, atd.

Využití synergických efektů při poskytování širokého spektra služeb bude znamenat snížení rizik zdrojů KVET z hlediska pozic na místních trzích. Bude tak docházet ke slučování činností výroby elektrické energie a tepla s dalšími, jako je nakládání s odpady, již zmiňovaná výroba a dodávka chladu, ale třeba i příprava a distribuce pitné vody, nebo další služby, se kterými se setkáváme u tzv. multiutilitních společností.

Ve zdrojích KVET tak bude jako palivo zužitkován komunální odpad, produkovaná mechanická práce pro přímé pohony (turbooběhová čerpadla), zdroje najdou lepší využití díky letním energetickým potřebám pro výrobu chladu, čištění odpadních vod, přípravu a distribuci pitné vody, atd., lépe vytíženy budou i dopravní, údržbářské a administrativně správní kapacity teplárenských společností.

U zdrojů KVET nelze do budoucna očekávat výstavbu sice vysoce účinných, ale v podstatě jednoúčelových energetických technologií, jako jsou velké kotle s nadkritickými parametry nebo velké paroplynové cykly.

Jelikož KVET je vázána především na odbyt tepla a systémy CZT na rozdíl od systémů elektrifikačních či plynofikačních jsou a budou vždy záležitostí lokální, nebude možno se z důvodu eliminace rizik vázat pouze na jeden druh paliva, ani na předpoklad fixního odbytu produkce v předem daném poměru.

Tento postup bude vlastní spíše velkým celonárodním či nadnárodním energetickým společností provozujícím velké množství různých zdrojů na různá paliva v jednom systému, a případný výpadek výroby v jedné skupině zdrojů bude nahraditelný výrobou ve zdrojích jiných, nebo dovozem.

6.2 Malé a střední zdroje KVET

Malé a střední zdroje představují rovněž významný potenciál rozvoje KVET. Převážná část těchto zdrojů bude jako paliva využívat zemní plyn, popřípadě další typy plyných paliv, jako jsou skládkové plyny, bioplyny, atd.

V samostatně stojících kotelnách se budou jako zdroje KVET i nadále prosazovat především plynové motory, ve zdrojích tepla nacházejících se přímo v budovách (technických podlažích, na střechách) lze očekávat spíše aplikace méně hlučných technologií bez vibrací, tedy mikroturbín a následně i palivových článků.

Snahou výrobců bude uplatnit sériově vyráběná zařízení v typových výkonových řadách v kompaktním provedení a s víceúčelovým využitím. Kompaktní provedení bude znamenat modulové uspořádání jednotlivých komponent v kontejneru, přičemž v případě poruchy a při servisních zásazích bude možno jednotlivé moduly na místě měnit, vyjmuté původní moduly pak budou opravovány či repasovány ve specializovaných závodech.

Víceúčelové využití může představovat nejen kogeneraci, ale do budoucna i trigeneraci s případně dalšími funkcemi. Kromě kombinované výroby elektřiny, tepla a chladu mohou víceúčelová zařízení sloužit i jako zdroje záložního napájení, zdroje tlakového vzduchu, atd.

Největší rozšíření zdrojů KVET na bázi plyných paliv lze očekávat v sektoru služeb a průmyslu. Typickými uživateli budou nemocnice, školy, obchodní domy, kancelářské objekty, plavecké bazény, zimní stadiony, sportovní haly, hotely, banky, firemní sídla, kulturní a společenská zařízení. V oblasti průmyslu se bude jednat zejména o průmysl lehký (elektrotechnický, textilní, atd.) a o průmysl zpracovatelský (oděvní, potravinářský, atd.).

Instalace zdrojů KVET pro lokální (etážové) vytápění bytů a rodinných domků se pravděpodobně nerozšíří. Aplikace budou častější u větších domovních, nebo sídlištních zdrojů tepla.

Kombinovaná výroba elektřiny a tepla na bázi spalování biomasy bude aplikována především u středních zdrojů, a to v průmyslu, zemědělství, nebo i v sídlištních zdrojích při vytěšňování spalování uhlí. V průmyslu (strojírenském, dřevozpracujícím) půjde zejména o parní kotle na biomasu s točivými redukcemi páry nebo pístovými parními motory (hlavně tam, kde je potřeba pára o více tlacích), v lesnictví, zemědělství nebo v samostatně stojících kotelnách půjde spíše o organické Rankinovy cykly. U zemědělských komplexů s živočišnou výrobou mohou být vedle kompostace využívány i zplyňovací reaktory, které budou generovat bioplyn pro přímé spalování, nebo pro spoluspalování ze zemním plynem.

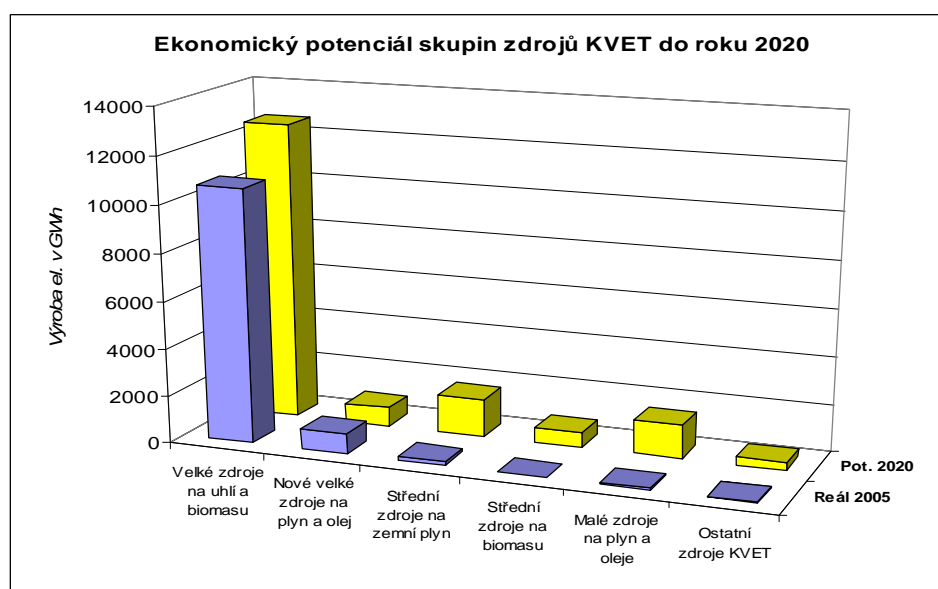
6.3 Celkový potenciál pro uplatnění zdrojů KVET v ČR

Celkový potenciál pro uplatnění zdrojů KVET v ČR vychází z výsledků práce „Analýza potenciálu KVET v ČR“, jež byla provedena v letech 2004 a 2005. Souhrnná zpráva o výsledcích této analýzy byla zveřejněna v roce 2005 jako součást plnění Směrnice 2004/8/EC o podpoře vysokoúčinné KVET.

Porovnání stávající úrovně výroby elektrické energie v jednotlivých skupinách zdrojů KVET s ekonomickým potenciálem výroby v těchto skupinách k roku 2020 je v číselné podobě uvedeno v tabulce č. 6.3.1 a v grafické podobě na obrázku č. 6.3.1.

Tabulka č. 6.3.1 Ekonomický potenciál výroby el. do r. 2020 ve skupinách zdrojů KVET

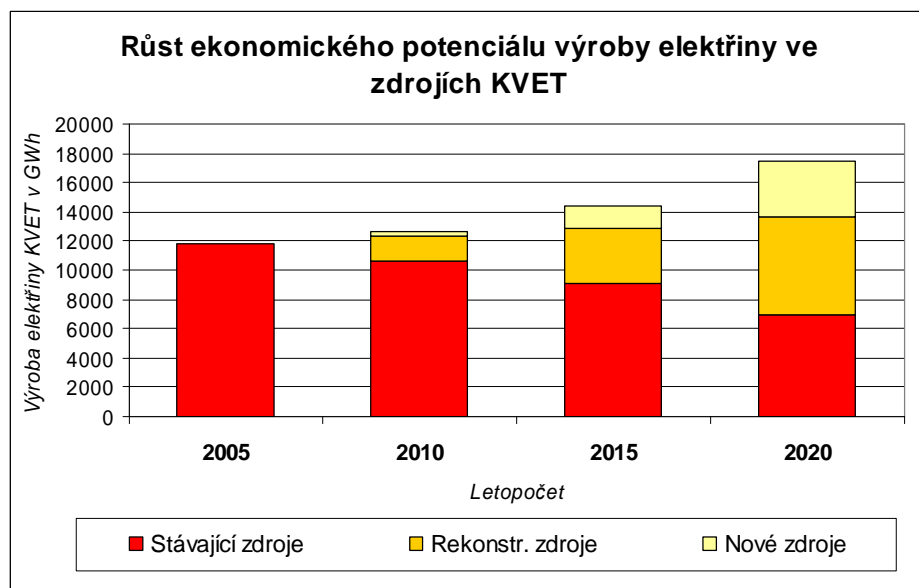
Ekonomický potenciál KVET Shrnutí výsledků po skupinách zdrojů	Jedn.	Velké zdroje na uhlí a biomasu	Nové velké zdroje na plyn a olej	Střední zdroje na zemní plyn	Střední zdroje na biomasu	Malé zdroje na plyn a oleje	Ostatní zdroje KVET	Zdroje KVET celkem
Reálná úroveň k roku 2005	GWh	10688	867	153	0	66	15	11788
Potenciál přírůstku do roku 2020	GWh	1912	-70	1464	625	1376	323	5630
Ekonomický potenc. k roku 2020	GWh	12600	797	1617	625	1442	338	17419



Obrázek č. 6.3.1 Ekonomický potenciál skupin zdrojů KVET do roku 2020

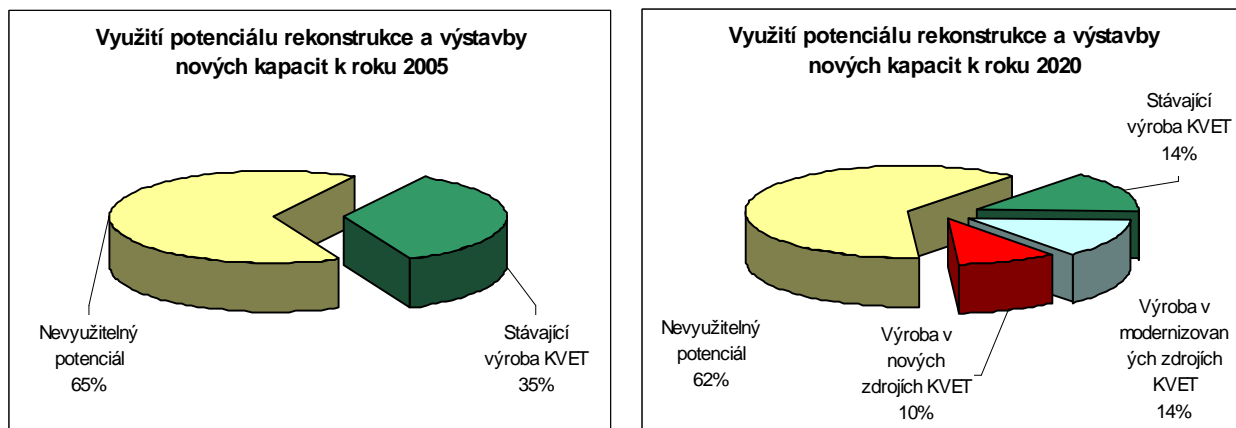
Jak je zřejmé z údajů uváděných v tabulce č. 6.3.1 a na obrázku č. 6.3.1, nejvyšší ekonomický potenciál zdrojů KVET se nachází v rekonstrukcích velkých zdrojů KVET na uhlí a biomasu, dále ve středních a malých zdrojích spalujících zemní plyn. Určitý, i když ne již tak významný ekonomický potenciál je ve středních zdrojích na biomasu a v ostatních zdrojích KVET, nulový pak ve velkých zdrojích na zemní plyn a topné oleje.

Vývoj ekonomického potenciálu výroby elektřiny ve zdrojích KVET celkem v období 2005 až 2020 s rozdělením na stávající zdroje, rekonstruované zdroje a nové zdroje je v grafickém zpracování uveden na obrázku č. 6.3.2.



Obrázek č. 6.3.2 Růst ekonomického potenciálu výroby elektřiny ve zdrojích KVET

Celkového nárůstu výroby elektřiny KVET ze současných cca 11,8 TWh (v r. 2005) na budoucích 17,4 TWh (v r. 2020) bude pravděpodobně dosaženo díky třem srovnatelně významným jevům. Těmito jevy jsou celkový růst poptávky po užitném teple, aplikace modernějších technologií v rekonstruovaných zdrojích a instalace nových zařízení do malých a středních zdrojů tepla. Srovnání současného a očekávaného budoucího využití příležitostí výroby elektřiny v KVET je znázorněno na obrázku č. 6.3.3.



Obrázek č. 6.3.3 Využití potenciálu zdrojů KVET v letech 2005 a 2020

7 ZÁVĚR

Sborník technických řešení zdrojů s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla, jak již uvádí jeho název, je zaměřen zejména na aspekty technického, technologického a provozního charakteru.

Tento sborník tedy může potenciálním investorům či zájemcům o instalaci zdroje KVET napomoci při výběru vhodného typu zařízení, při volbě jeho optimální velikosti, nebo při vyčíslení očekávaných výrobních a spotřebních bilancí, rozhodně však nedává odpověď na otázku, zda pro ně bude pořízení té které technologie také ekonomicky výhodné.

Právě ekonomické parametry budou vždy tím rozhodujícím argumentem, který bude o realizaci příslušného projektu v konečné fázi rozhodovat.

Ekonomickou efektivnost instalace zdroje KVET budou ovlivňovat zejména :

- Náklady související s pořízením příslušného zařízení, tj. konkrétní výše investic a způsob jejich krytí (z vlastních prostředků, úvěrem, leasingem, pronájmem, atd.).
- Náklady související s provozem a údržbou zařízení (zejména náklady na paliva a ostatní hmoty, náklady na obsluhu, opravy, servis, atd.).
- Výnosy plynoucí z výroby a provozu zařízení, tj. tržby (úspory) z vlastní výroby elektřiny, tepla, popřípadě tržby za poskytování dalších služeb (záložní zdroj, regulační výkon, kompenzace účinníku, atd.)
- Příplatky a bonusy pro zdroje KVET, tj. příplatky k ceně elektřiny vyrobené formou KVET, příplatky za decentralizovanou výrobu, bonusy za využívání obnovitelných zdrojů energie, možná daňová zvýhodnění či investiční pobídky formou dotací nebo výhodných úvěrů.

Rozbor výše uvedených aspektů nebyl předmětem tohoto sborníku. Jedná se o poměrně obsáhlou problematiku, která si zasluhuje samostatné rozpracování a zhodnocení.

SEZNAM ZKRATEK A SYMBOLŮ

CZT	Centralizované zásobování teplem
ES	Elektrizační soustava
EU	Evropská unie
G	Generátor
GTRT	Plynová turbína s rekuperací tepla
HK	Horkovodní kotel
HV	Horká voda
KVET	Kombinovaná výroba elektřiny a tepla
MCFC	Karbonátový palivový článek
ORC	Organický Rankinův cyklus
PAFC	Palivový článek s kyselinou fosforečnou
PM	Spalovací pístový motor
PPC	Paroplynový cyklus
PPT	Parní protitlaková turbína
POT	Parní odběrová turbína
SK	Spalinový kotel
SOFC	Palivový článek s pevným elektrolytem
TTO	Těžký topný olej
VS	Výměňiková stanice
Q_{CZT}	Roční potřeby tepla pro soustavy CZT
E_{KVET}	Elektřina vyrobená v procesu KVET
Q_{GTRT}	Teplo ze spalinového kotle za plynovou turbínou
Q_{KVET}	Teplo vyrobené v procesu KVET
$Q_{pal-KVET}$	Spotřeba tepla v palivu ve zdroji KVET
Q_{PPT}	Teplo dodané z protitlaku parní turbíny
Q_{PM}	Teplo z kogenerační jednotky s pístovým spalovacím motorem
$Q_{už-KVET}$	Užitečné teplo vyráběné ve zdroji KVET
$Q_{roč}$	Roční celková dodávka tepla do CZT
Q_{ost}	Teplo dodané z ostatních zdrojů

$P_{q\max POT}$	Maximální tepelný výkon parní odběrové turbíny
$P_{\max-CZT}$	Maximální tepelný příkon soustavy CZT
$P_{\max-KVET}$	Maximální dosahovaný tepelný výkon zdroje KVET
P_{\min}	Minimální výkonové zatížení teplárenské soustavy
$P_{q\max PPT}$	Maximální tepelný výkon parní protitlakové turbíny
T_{ods}	Doba odstávky v letním období
T_{top}	Doba topné sezóny
α	Výkonový teplárenský součinitel
α_r	Roční teplárenský součinitel
Δpe	Měrný pokles elektrického výkonu POT při odběru tepla
η^{el}_{KVET}	Účinnost výroby elektrické energie ve zdroji KVET
η^q_{KVET}	Účinnost výroby užitečného tepla ve zdroji KVET
η^{celk}_{KVET}	Celková účinnost zdroje KVET
σ	Teplárenský modul
τ	Celková doba provozu zdroje KVET
τ_{\max}	Doba využití maxima (maximálního výkonu)

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- 1) Státní energetická koncepce České republiky – Ministerstvo průmyslu a obchodu (2004)
- 2) Vyhláška MPO č. 439/2005 Sb., kterou se stanoví podrobnosti způsobu určení množství elektřiny z KVET a určení množství elektřiny z druhotných energetických zdrojů (2005)
- 3) Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2004/8/EC o podpoře KVET založené na poptávce po užitečném teple na vnitřním trhu energií (2004)
- 4) J. Kadrnožka – Tepelné elektrárny a teplárny – SNTL (1984)
- 5) J. Vlach a kolektiv – Zásobování teplem a teplárenství – SNTL (1989)
- 6) Jaroslav Kadrnožka, Ladislav Ochrana – Teplárenství – CERM, s.r.o. Brno (2001)
- 7) Josef Vlach a kolektiv – Čísla pro energetiky – ČSZE (2003)
- 8) Kolektiv autorů – Topenářská příručka – GAS s.r.o. Praha (2001)
- 9) Jan Šurovský – Mikroturbína – energetická revoluce pro 21. století – Instalace Praha (2003)
- 10) J. Karafiát a kolektiv – Analýza potenciálu KVET v ČR – ORTEP, s.r.o. (2005)
- 11) Josef Brož – Historie a současnost Stirlingova motoru – časopis Energetika č. 8-9/2006
- 12) Jaroslav Sláma – Organický Rankinův cyklus – časopis 3T č. 3/2006
- 13) Doc. Ing. Jiří Šťastný, CSc. – Točivá redukce v parních sítích – PolyComp, a.s. (2005)
- 14) J. Karafiát a kolektiv – Studie proveditelnosti uplatnění zdrojů KVET ve zdrojích teplárenských soustav – ORTEP, s.r.o. (1994 – 2006)
- 15) Propagační, nabídkové a informační materiály výrobců technologií KVET
- 16) Webové stránky výrobců technologií KVET