

# Pokročilé termodynamické cykly

## 1. přednáška

Autor: Jiří Kučera  
Datum: 19.2.2020

# Přednášky a cvičení

---

## Přednášky a cvičení

Ing. Jiří Kučera, Ph.D.

**Metodik tepelných výpočtů v Doosan Škoda Power**

**Kontakty :**

**e-mail : [jiri.kucera@doosan.com](mailto:jiri.kucera@doosan.com)**

**mobil : 731608190**

# Podmínky k zápočtu a ke zkoušce

- Podmínkou pro zápočet je vypracování semestrální práce na určené téma z ATC a přednesení této práce formou referátu. Na přednesený referát by měla následovat diskuse, tj. dotazy a náměty ze strany ostatních studentů. Vítány budou samozřejmě také dotazy a náměty v průběhu vlastní přednášky a cvičení z ATC.
- Zkouška bude udělena na základě výsledku odborné rozpravy studenta se zkoušejícím nad tématy předmětu ATC.
- Pro tuto rozpravu si student vypracuje přípravy ke třem vylosovaným tématům, která budou testována podrobněji, s tím, že při vypracovávání přípravy ke zkoušce má student možnost využít poznámky z vlastního sešitu. Během rozpravy se zkoušejícím má už student možnost využívat jen svoji přípravu.
- Nad rámec vypracovaných témat bude v rámci rozpravy zkoušejícím testován i všeobecný přehled studenta z ostatních, tj. nevylosovaných, témat z předmětu ATC.
- Upozorňuji, že součástí zkoušky jsou nejenom otázky z teorie, ale i rozbor a vysvětlování funkčních a tepelných schémat pokročilých cyklů v rozsahu, ve kterém budou prezentovány během výuky tj. během přednášek i cvičení.
- Znamka ze zkoušky může být zlepšena s přihlédnutím k případné, zvláště pozitivní, aktivitě studenta během přednášek a cvičení v průběhu semestru.

# ATC v kontextu ostatních předmětů

Především navážeme a rozvineme látku z předchozího předmětu „Termodynamické cykly“.

TTT

PTT

TM

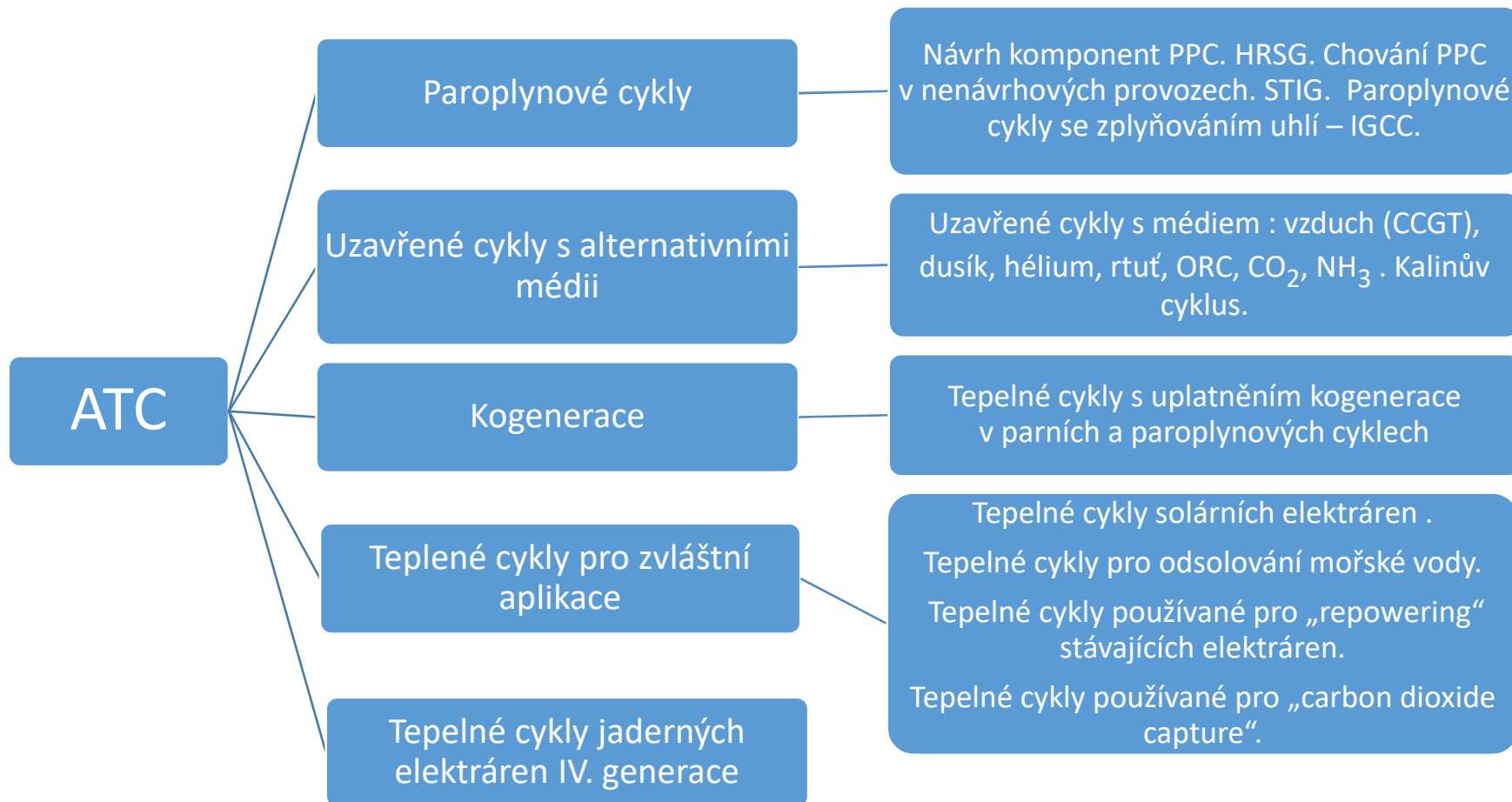
ATC

Pro mnoho z aplikací s pokročilými cykly jsou významnými komponentami kompresor, plynová a parní turbína, proto navážeme na předměty PTT a PTK.

Termomechanika je samozřejmým výchozím teoretickým předmětem především z hlediska termodynamického chování jednotlivých médií.

PTK

# Program přednášek



SW nástroje pro výpočty pokročilých cyklů - bilancování, řízení priority průtoků a tlaků

- Šťastný, M. : Paroplynová zařízení pro elektrárny a teplárny, ČVUT, Praha 1993
- Konečný V. : Návrh paroplynového zařízení, ZČU, Plzeň 2007
- Škopek J.: Tepelné turbíny a turbokompresory, ZČU, Plzeň 2010
- Bečvář, J. : Tepelné turbíny, SNTL, Praha 1968
- Horlock, J.H. : Advanced Gas Turbine cycles, Cambridge 2003
- *Elmasri, M.A. - Design of gas turbine combined cycle and cogeneration systems, Theory, Practice and Optimization - seminář Thermoflow, Milan 2008*
- Dostál, V. : Jaderné reaktory IV. generace, ČVUT, Praha 2010
- Kučera, J. : prezentace k výuce budou postupně dodávány

## Paroplynové cykly I.

- *Otevřený cyklus spalovací turbíny*
  - *Popis cyklu beze ztrát a se ztrátami*
- *Přechod od otevřeného cyklu spalovací turbíny k paroplynovému cyklu (PPC)*
- *Základní pravidla návrhu spalinového výměníku v paroplynovém cyklu (HRSG)*

## SW nástroje pro výpočty pokročilých cyklů

- *Obecný popis procesu výpočtu prostřednictvím SW nástrojů pro výpočty pokročilých cyklů*
- *Popis datových toků při výpočtu prostřednictvím SW nástrojů pro výpočty pokročilých cyklů*
- *Výpočty termodynamických vlastností média*
- *Návrhové vs. nenávrhové provozování*
- *Přenosy tlaků a průtoků*

# Paroplynové cykly I.

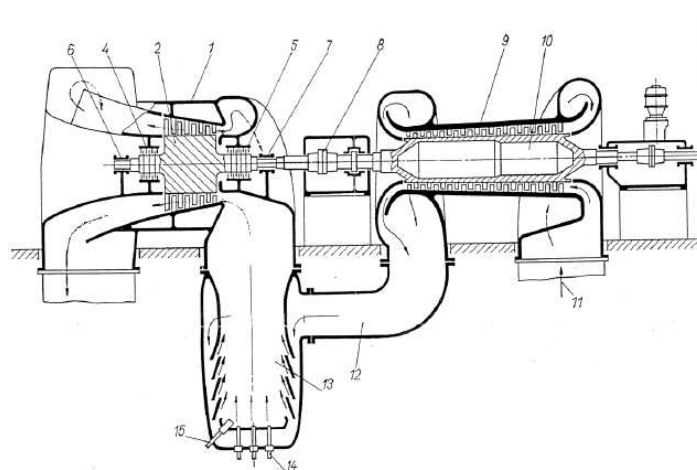


# Paroplynové cykly I. - otevřený cyklus spalovací turbíny

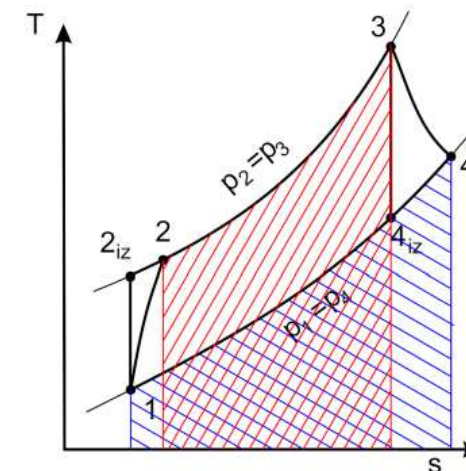
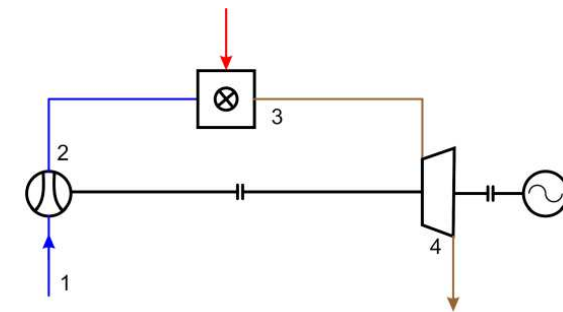
Teoretickým základem pro úvahy o paroplynových cyklech (PPC či CCPP) je otevřený cyklus spalovací turbíny (GT) :

**Plynová turbína** – rotační tepelný lopatkový motor, kde se tepelná energie stlačeného horkého plynu mění v energii mechanickou

**Spalovací turbína** – soubor zařízení tvořené kompresorem, spalovací komorou a plynovou turbínou



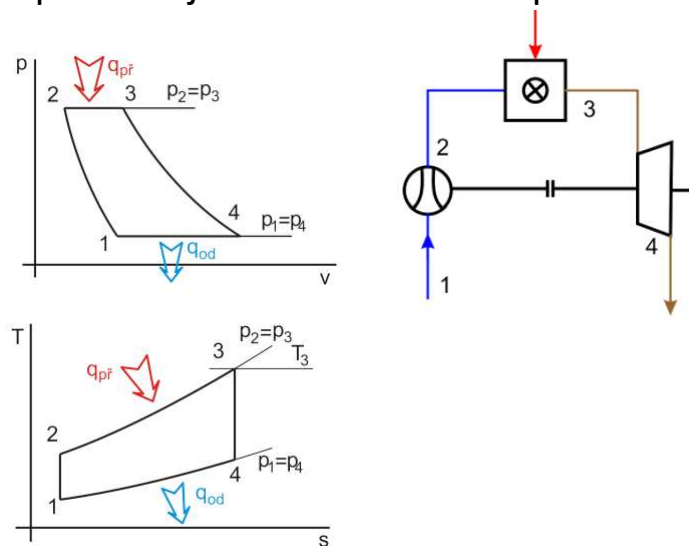
- 1) skříň turbíny
- 2) rotor turbíny
- 4, 5) labyrintová ucpávka
- 6, 7) ložiska
- 8) spojka
- 9) skříň kompresoru
- 10) rotor kompresoru
- 11) vzduch nasávaný kompresorem
- 12) vzduch zaváděný do spalovací komory
- 13) spalovací komora
- 14) palivová tryska
- 15) zapalovací svíčka



# Otevřený cyklus spalovací turbíny - teoretický popis

**Otevřený cyklus spalovací turbíny** se teoreticky popisuje rovnicemi pro **Ericsson – Braytonův cyklus** (tj. oběh se spalováním při konstantním tlaku).

**Teoretický oběh** se skládá ze **dvou izobar** : přívod tepla ve spalovací komoře a isobara při atmosférickém tlaku reprezentující spojnici mezi výfukem a sáním a **ze dvou adiabat** reprezentujících stlačení v kompresoru a expanzi v plynové turbíně.



$$\eta_r = \frac{a^T - a^K}{q_{př}} = \frac{(T_3 - T_4)c_p - (T_2 - T_1)c_p}{(T_3 - T_2)c_p} = \frac{T_3 \left(1 - \frac{T_4}{T_3}\right) - T_2 \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right)}{T_3 - T_2}$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

$$\eta_t = \frac{T_3 \left(1 - \frac{T_4}{T_3}\right) - T_2 \left(1 - \frac{T_1}{T_2}\right)}{T_3 - T_2} = \frac{(T_3 - T_2) \left(1 - \frac{T_4}{T_3}\right)}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_4}{T_3} = 1 - \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

Zdroj obrázků : Žitek P. - přednášky ZSES, 6.přednáška

Odvození tepelné účinnosti teoretického oběhu dle Škopek J.: Tepelné turbíny a turbokompresory

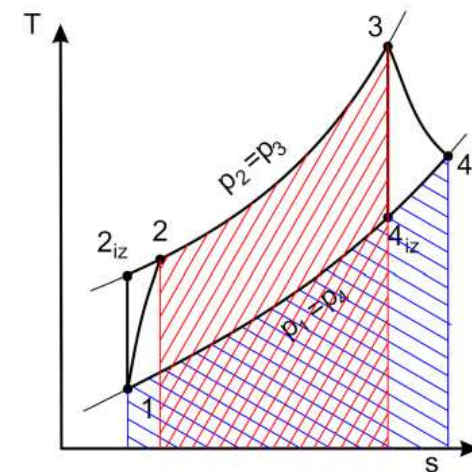
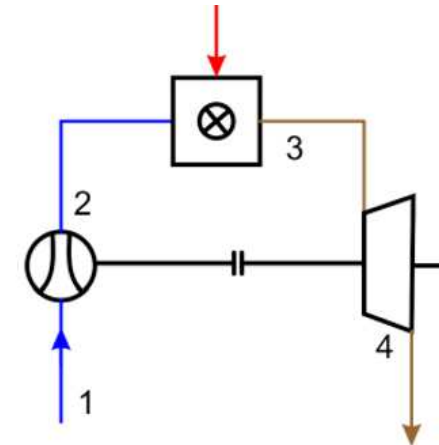
# Otevřený cyklus spalovací turbíny - skutečný popis

Při popisu skutečného otevřeného cyklu spalovací turbíny se oproti teoretickému musí brát přinejmenším v úvahu :

- tlaková ztráta v sacím traktu kompresoru (případně ve filtrech)
- skutečná účinnost komprese (polytropický děj)
- změna složení pracovního média ve spalovací komoře (vzduch -> spaliny => *změna složení se pak vyjadřuje změnou jeho  $c_p$* )
- skutečná účinnost expanze (polytropický děj)
- tlaková ztráta ve výstupním traktu plynové turbíny

Při výpočtu se pak řeší bilance každé komponenty zvlášť a ze získaných výsledků se pak popisuje cyklus jako celek

- v podrobnějších modelech se počítají např. i ucpávkové úniky jednotlivých komponent a spotřeba chladicího vzduchu (ten obchází spalovací komoru)



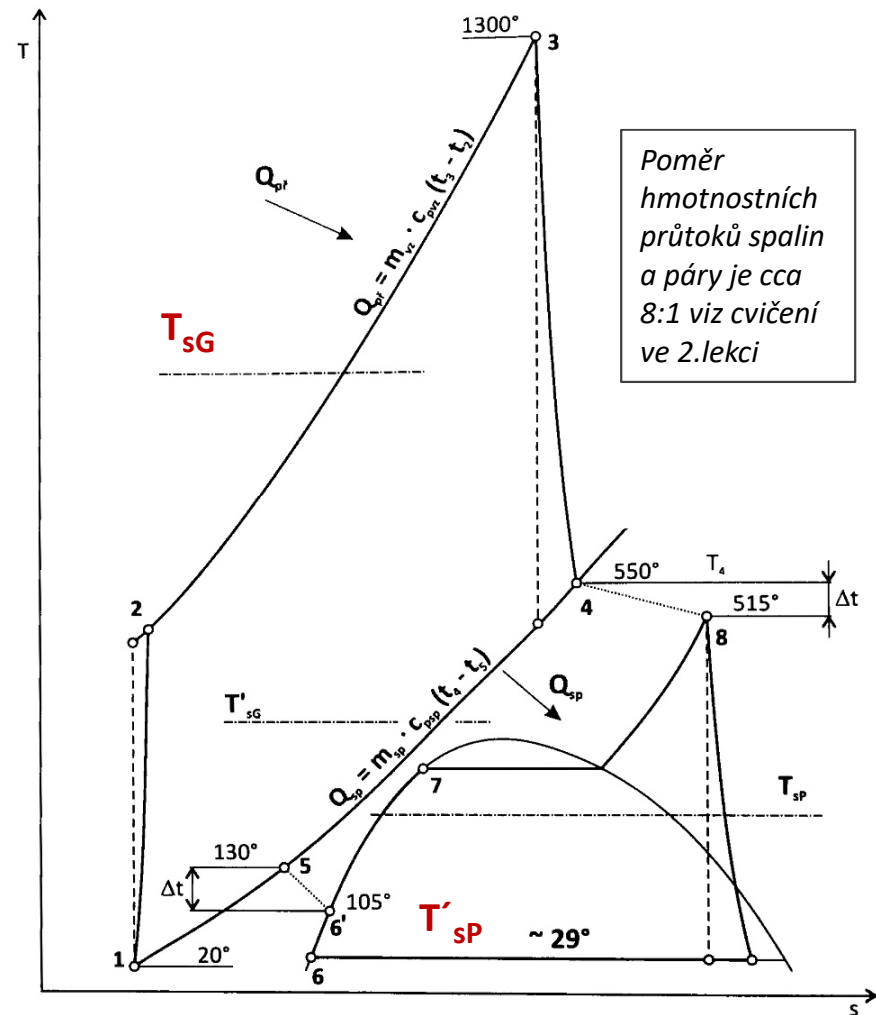
## Přechod od otevřeného cyklu k paroplynovému cyklu

**Klíčovou částí jsou děje 4-5 a 6'-8**, kdy teplo spalin vystupujících z GT (4-5) se využívá k ke generaci páry pro parní turbínu (ST) - děj (6'-8).

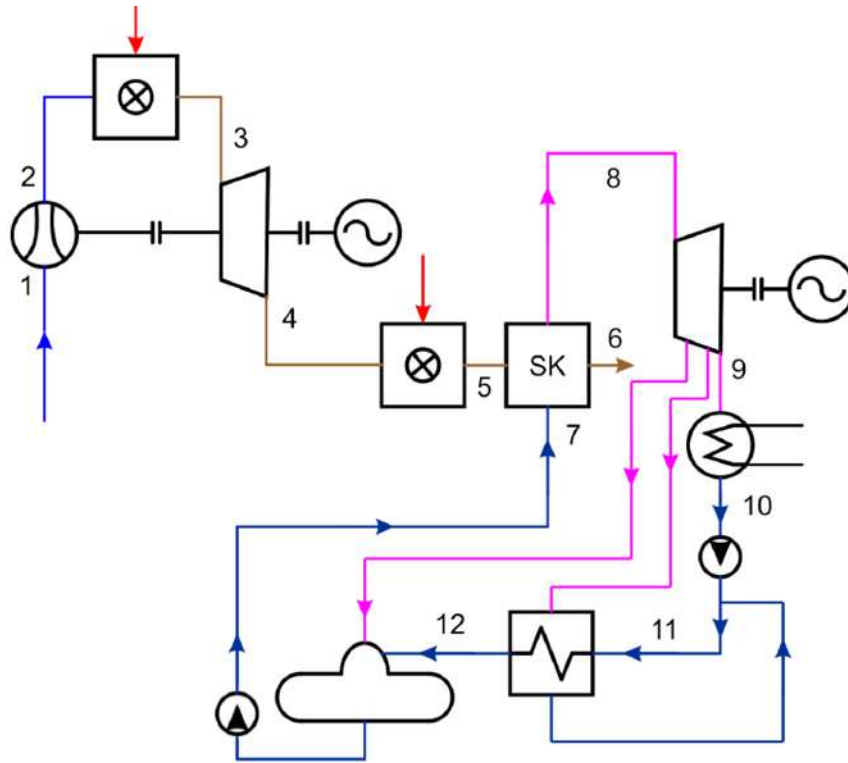
Zařízení, kde se tak děje, se nazývá HRSG (heat recovery steam generator, česky např. *spalinový výměník nebo spalinový kotel*).

Z hlediska teorie cyklů je zřejmé, **čím je dosaženo vysoké tepelné účinnosti paroplynového cyklu** : střední teplota přívodu tepla je vysoká, neboť odpovídá cyklu spalovací turbíny a zároveň střední teplota odvodu tepla je nízká, neboť vychází z cyklu parní turbíny - tj. odvod tepla při teplotě kondenzace.

*(Pozor ! Ovšem ne všechno teplo v PPC odchází v kondenzátoru parní turbíny. Část tepla z GT není předáno v HRSG a odchází formou spalin cca 130 °C teplých !)*

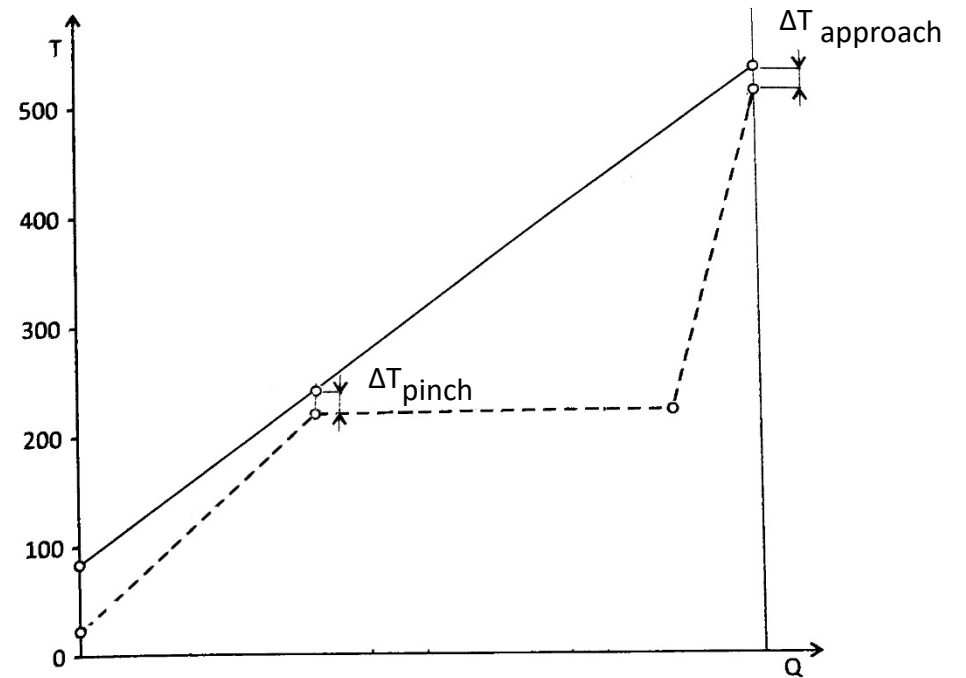


# Schéma paroplynového cyklu

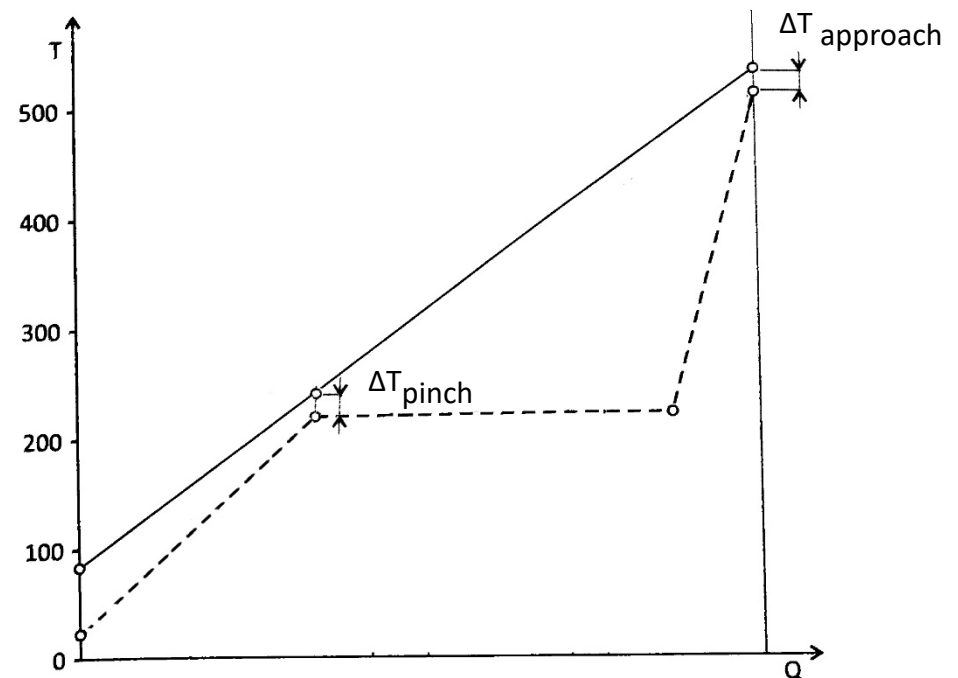


Schematické zapojení PPC

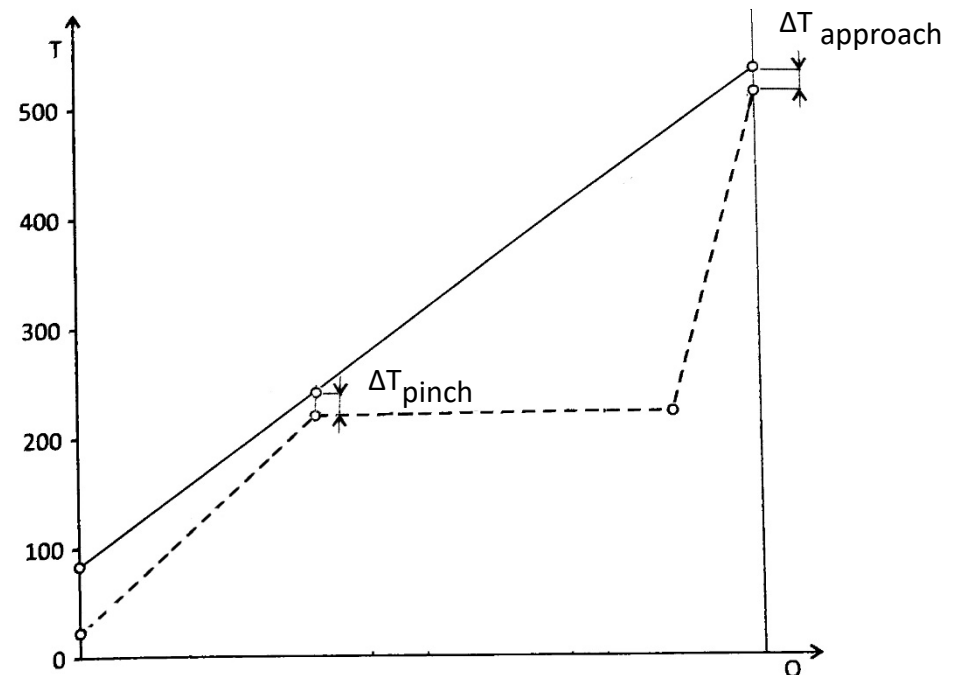
Průběh teplot spalin, vody a páry v HRSG



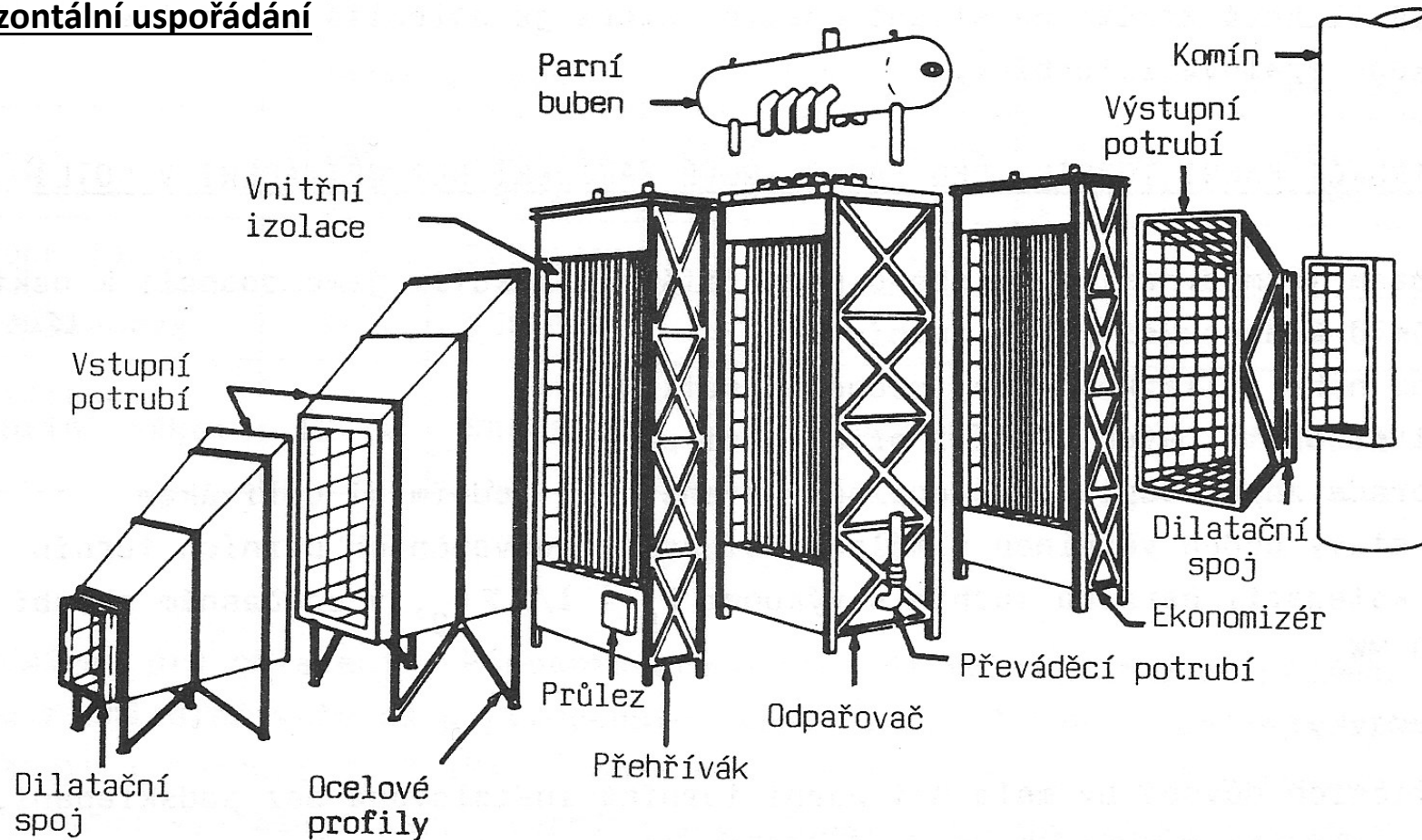
- V návrhovém výpočtu se hledá **průtok a parametry páry, který je možno vygenerovat danými spalinami**. Do diagramu Q-T se vynášejí průběhy teploty obou médií ve vazbě na přenesené teplo.
- Návrh HRSG je dobře popsán ve studijním materiálu „[Konečný V. : Návrh paroplynového zařízení](#)“ (kapitoly 1 a 3).
- Vstupní informací do výpočtu je teplota, hmotnostní průtok („množství“) a chemické složení spalin ( $\Rightarrow c_p$  spalin).
- Kritickými místy („úzkými hrdly“) návrhu je rozdíl teplot spalin na konci děje ve výparníku oproti teplotě sytosti, při níž probíhá var/vypařování, tzv. „pinch point“ a rozdíl teplot spalin vstupujících do HRSG a teploty páry na konci přehříváku, tzv. „approach point“.
- Dalším kritickým místem je minimální přípustná výstupní teplota spalin.



- Volbou pinch point „se nastavuje“ množství generované páry (volí se minimálně 5,5 °C).
- Approach point rozhoduje (zvláště v případě nízké teploty spalin) o teplotě generované páry (volí se minimálně 10 °C).
- Volba pinch point a approach point zásadně ovlivní střední logaritmické teplotní spády na výměnících a tím potřebnou velikost jejich teplosměnné plochy ( $\downarrow \Delta T_{\log} \Rightarrow \uparrow$  plocha).
- Omezení z hlediska minimální přípustné výstupní teploty spalin je kritický obsah  $\text{SO}_2$  a hlavně  $\text{SO}_3$  ve spalinách. Při jejich vyšším obsahu se výstupní teplota spalin omezuje tak, aby nepodkročila 140÷130 °C, aby nedošlo ke kondenzaci kyselin.



## Horizontální uspořádání



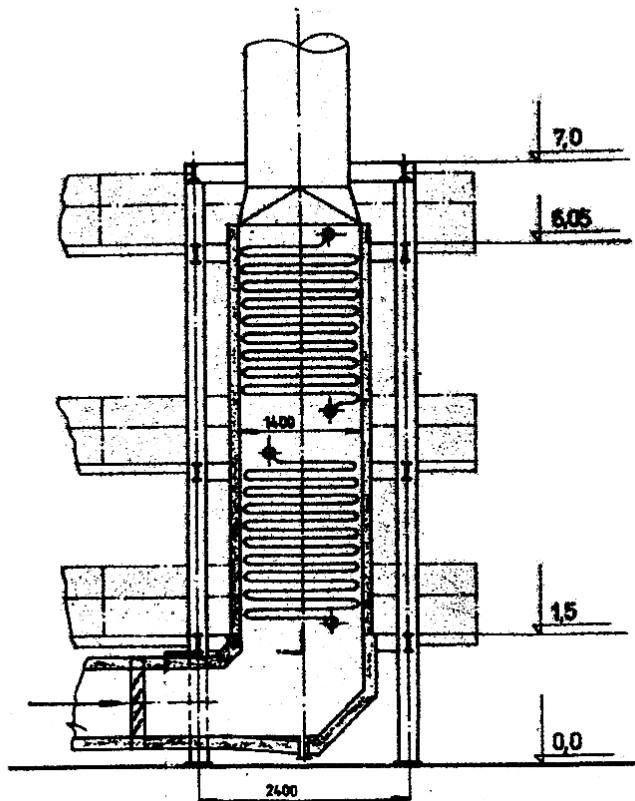
Zdroj : Šťastný, M. : Paroplynová zařízení pro elektrárny a teplárny



## Horizontální uspořádání



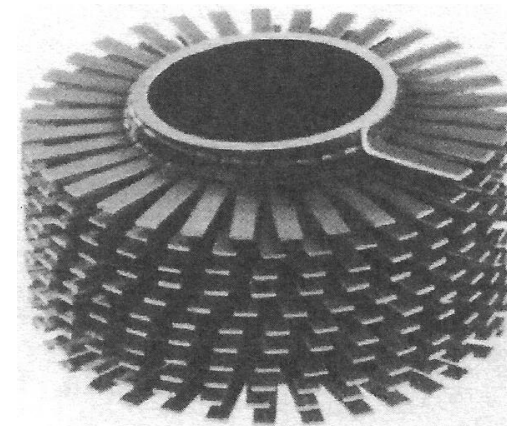
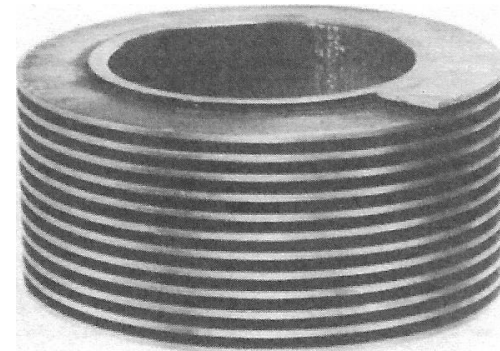
## Vertikální uspořádání



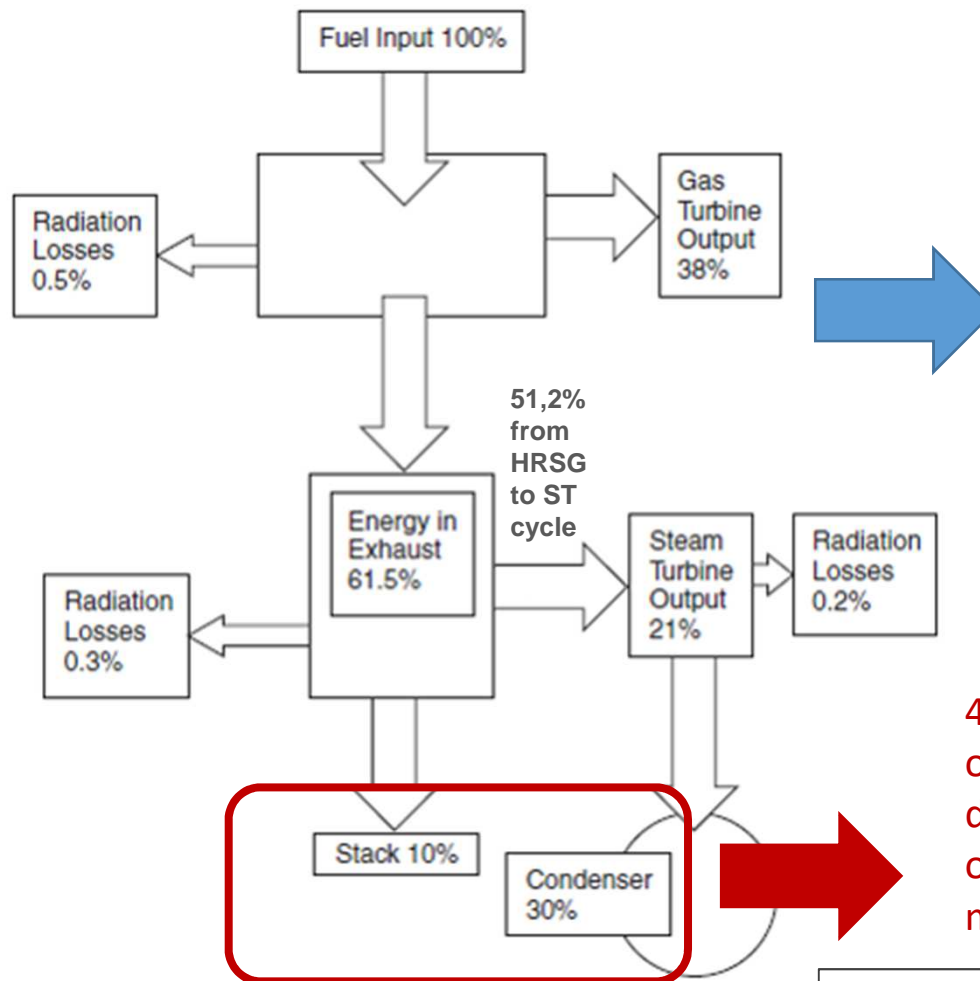
## Uspořádání žebrovaných trubek v tělese HRSG



## Detaily žebrování trubek



## Typická distribuce energií v paroplynovém cyklu



59 % z energie v palivu se přemění v užitečnou energii na svorkách generátorů spalovací a parní turbíny

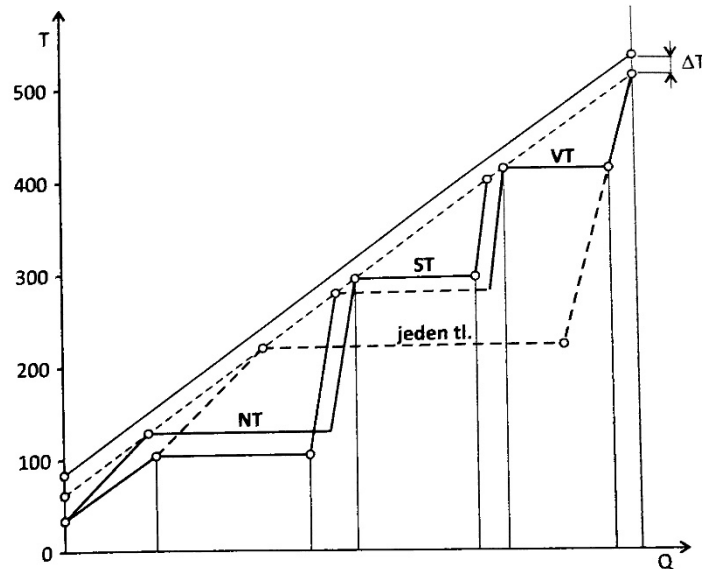
*≈1 % z energie v palivu odejde ve formě tepla vyzářeného do okolí*

40 % z energie v palivu odejde ve formě tepla spalin do komína a tepla odvedeného do chladicího média v kondenzátoru ...

Zdroj : Gas Turbine Engineering Handbook

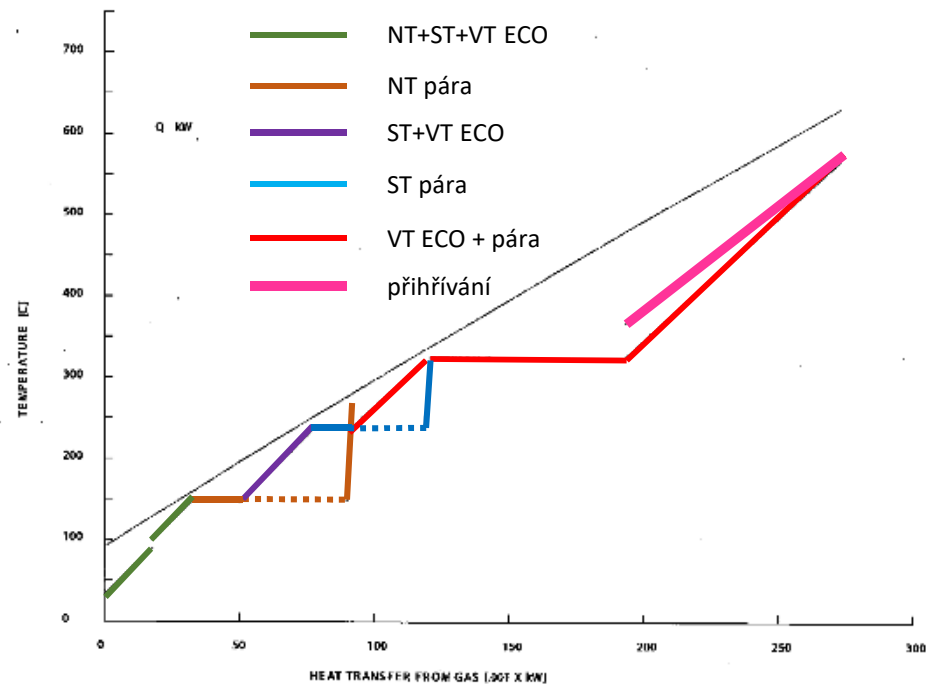
# Vícetlakový HRSG a cyklus s přehříváním

- HRSG se s výhodou navrhují jako vícetlakové (důvody budou podrobněji vysvětleny na druhé přednášce)



Průběh teplot spalin, vody a páry v třítlakovém HRSG

- resp. jako vícetlakové s přehříváním



Průběh teplot spalin, vody a páry v třítlakovém HRSG s přehříváním

# Příklad na třítlakový paroplynový cyklus s přehříváním



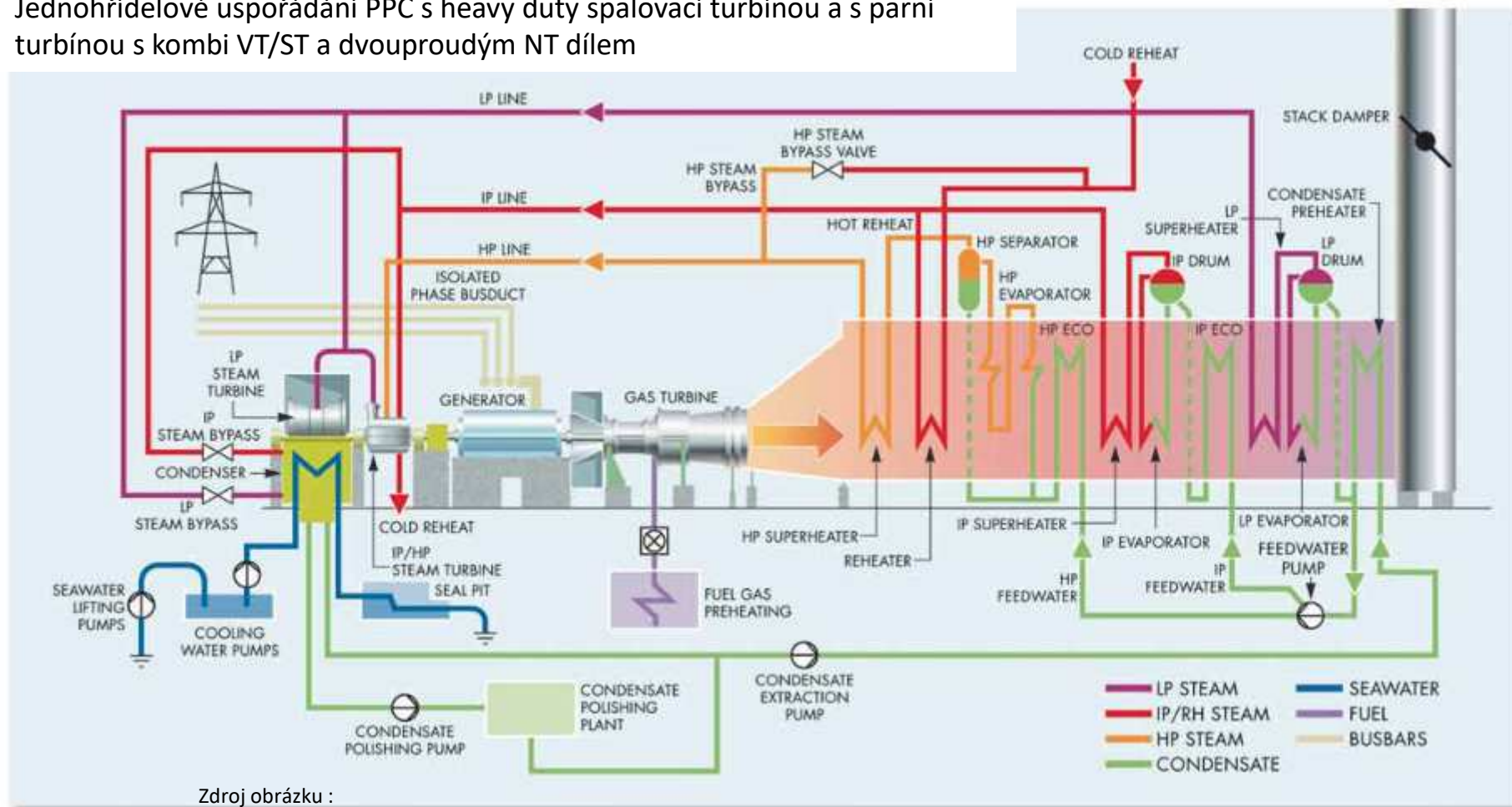
## Elektrárna Bugok 3 v Koreji

Zdroj obrázku :

<http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/gas-turbines/SGT6-8000H/bugok-3-bringing-the-h-class-to-korea-brochure.pdf>

# Procesní schéma elektrárny s vícetlakovým HRSG s přehříváním

Jednohřídelové uspořádání PPC s heavy duty spalovací turbínou a s parní turbínou s kombi VT/ST a dvouprůdným NT dílem

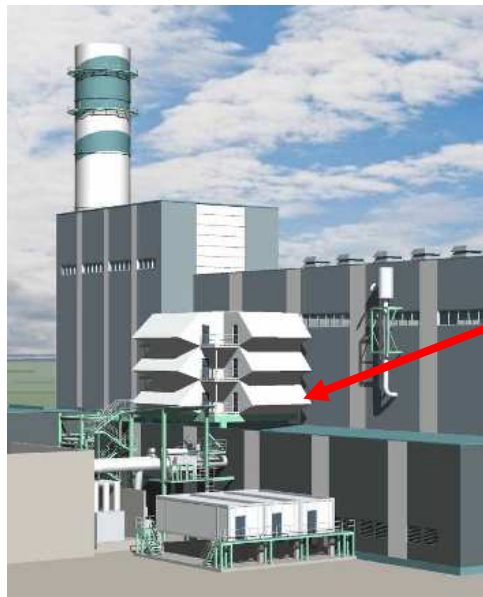


Zdroj obrázku :

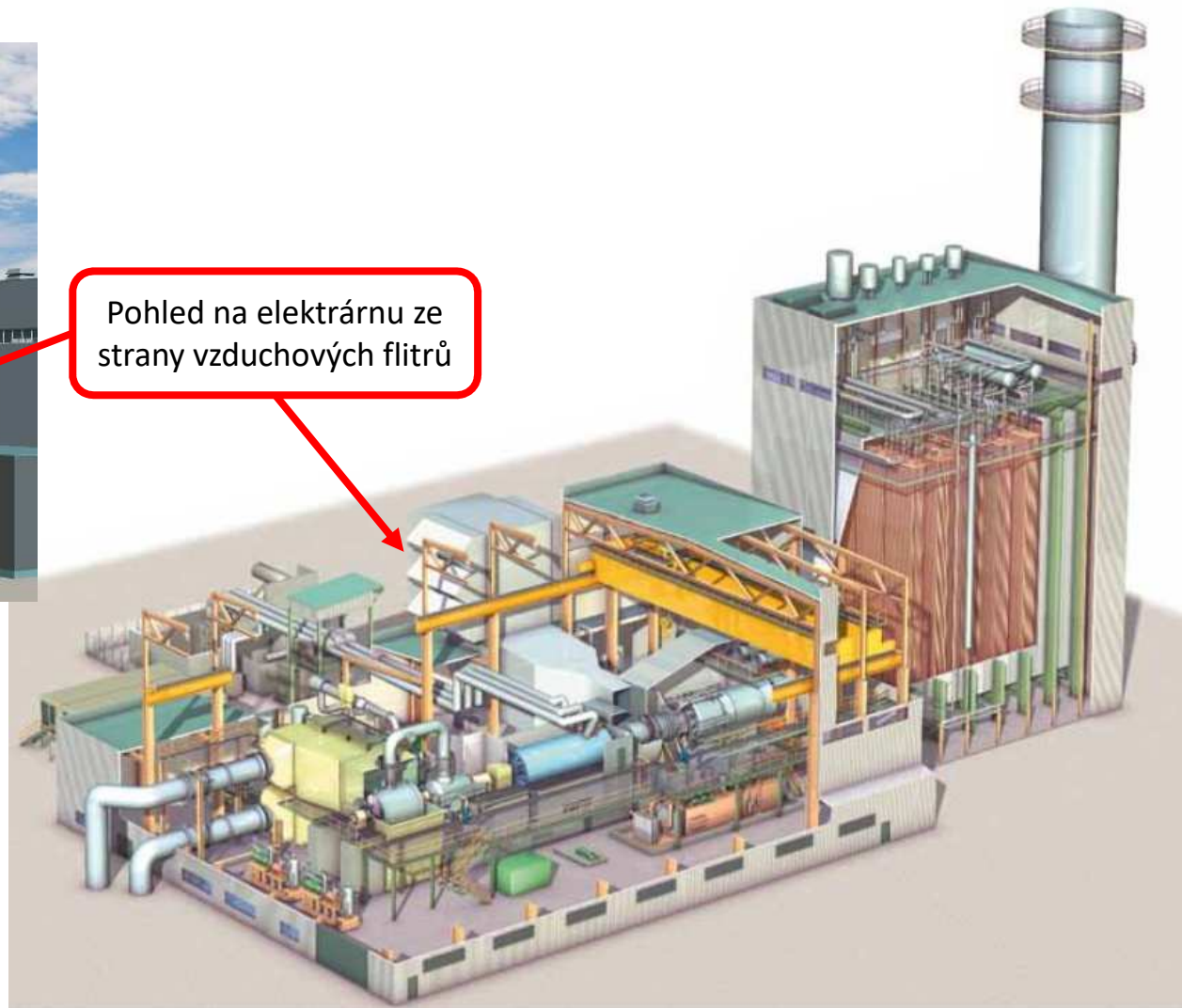
<http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/gas-turbines/SGT6-8000H/bugok-3-bringing-the-h-class-to-korea-brochure.pdf>



# Schematický řez elektrárnou s vícetlakovým HRSG s přehříváním

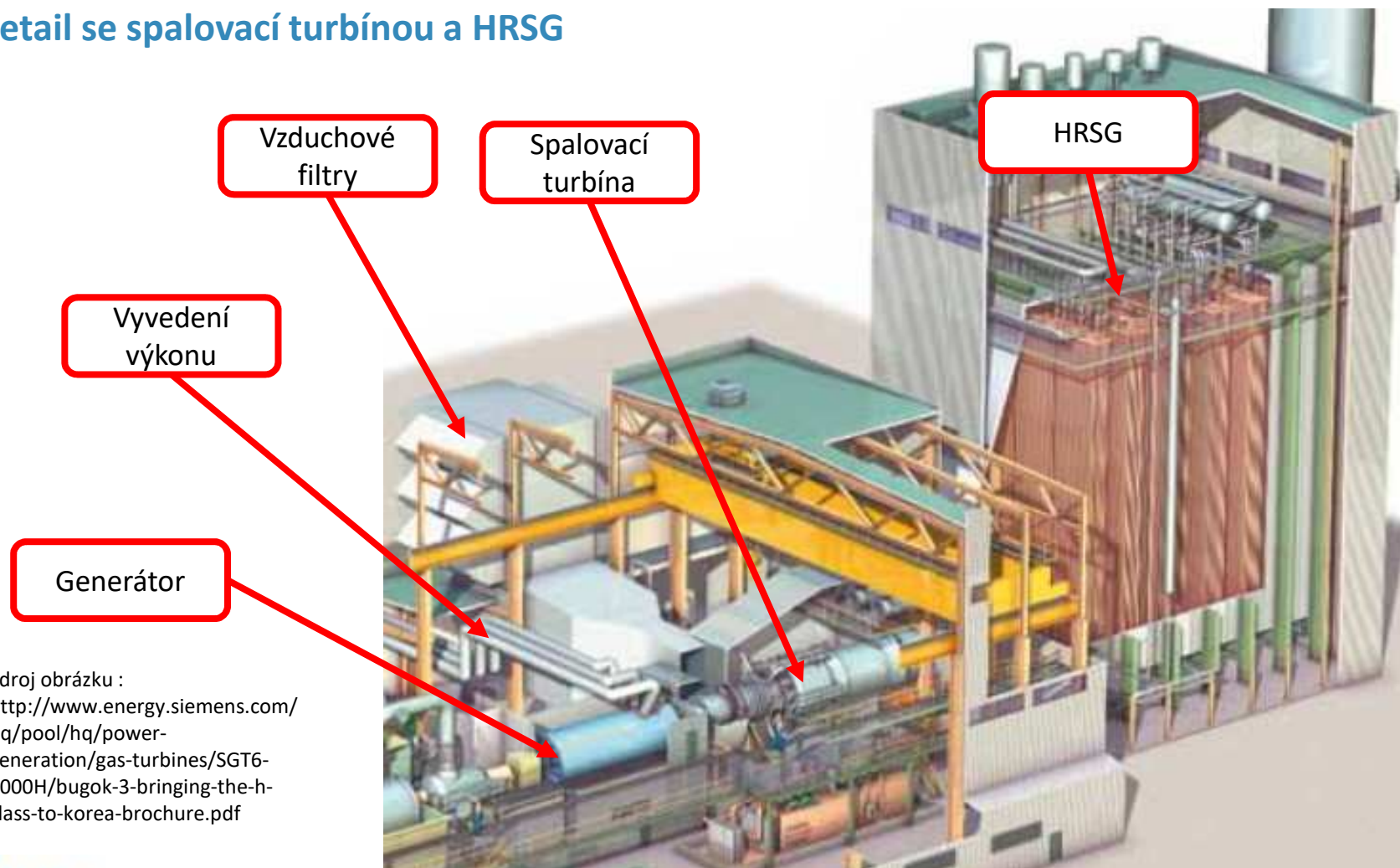


Pohled na elektrárnu ze strany vzduchových filtrů



Zdroj obrázku :  
<http://www.energy.siemens.com/hq/po ol/hq/power-generation/gas-turbines/SGT6-8000H/bugok-3-bringing-the-h-class-to-korea-brochure.pdf>

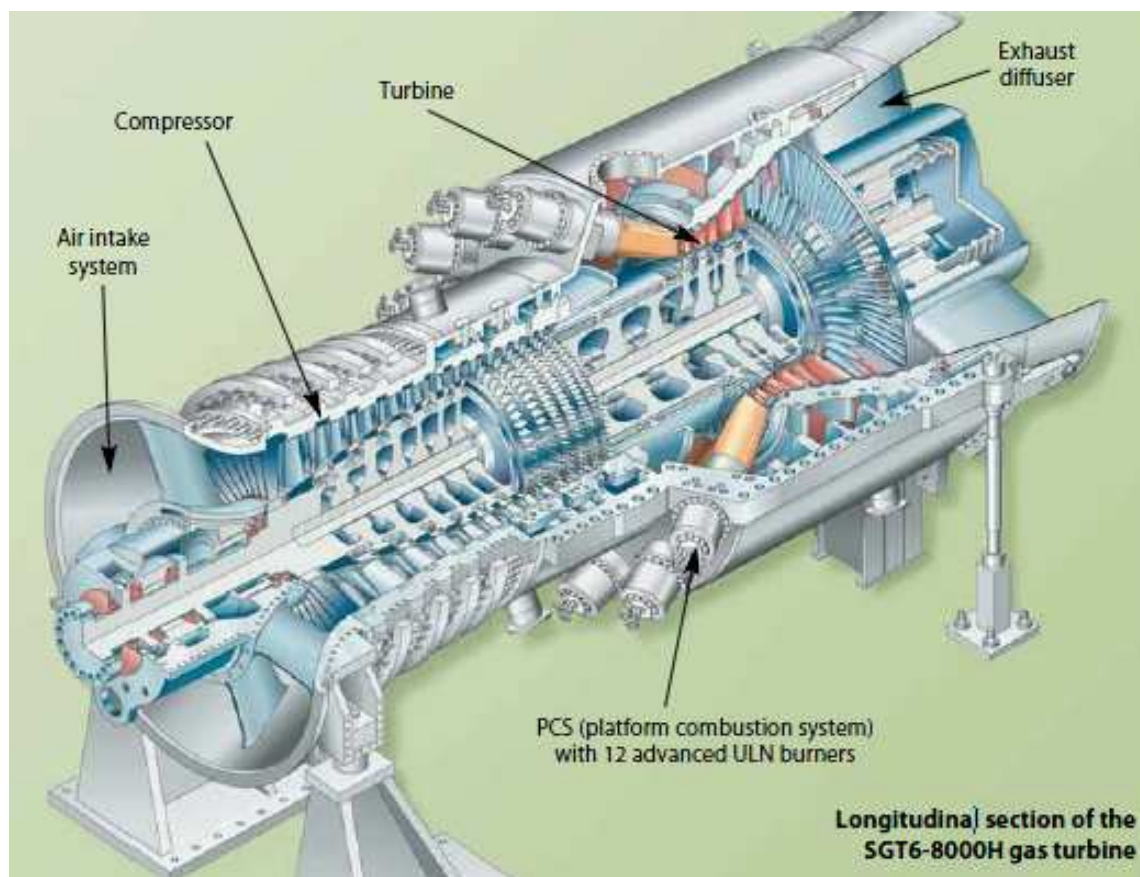
## Detail se spalovací turbínou a HRSG



Zdroj obrázku :  
<http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/gas-turbines/SGT6-8000H/bugok-3-bringing-the-h-class-to-korea-brochure.pdf>

### Detail spalovací turbíny

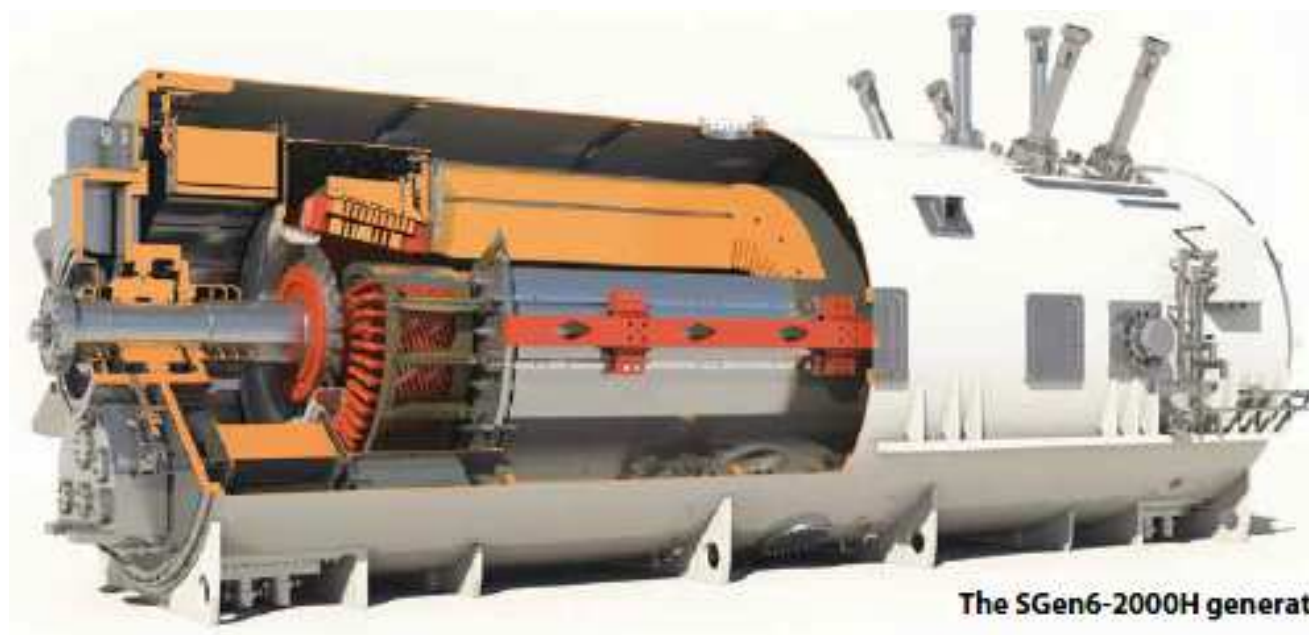
- Výrobce Siemens typ SGT6-8000H (tj. 60 Hz) přímo scalovaná z 50 Hz typu SGT5-8000H.
- 12 obvodově uspořádaných spalovacích komor



Zdroj obrázku :  
<http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/gas-turbines/SGT6-8000H/bugok-3-bringing-the-h-class-to-korea-brochure.pdf>

## Detail generátoru

- Výrobce Siemens typ SGen6-2000H
- 60 Hz, dvoupólový
- vodíkem chlazený
- se statickou (tyristorovou) budicí soupravou
- *jeden společný generátor slouží pro spalovací i parní turbínu - tj. jednohřídelové uspořádání s parní turbínou připojenou přes samo-synchronizační SSS spojku.*

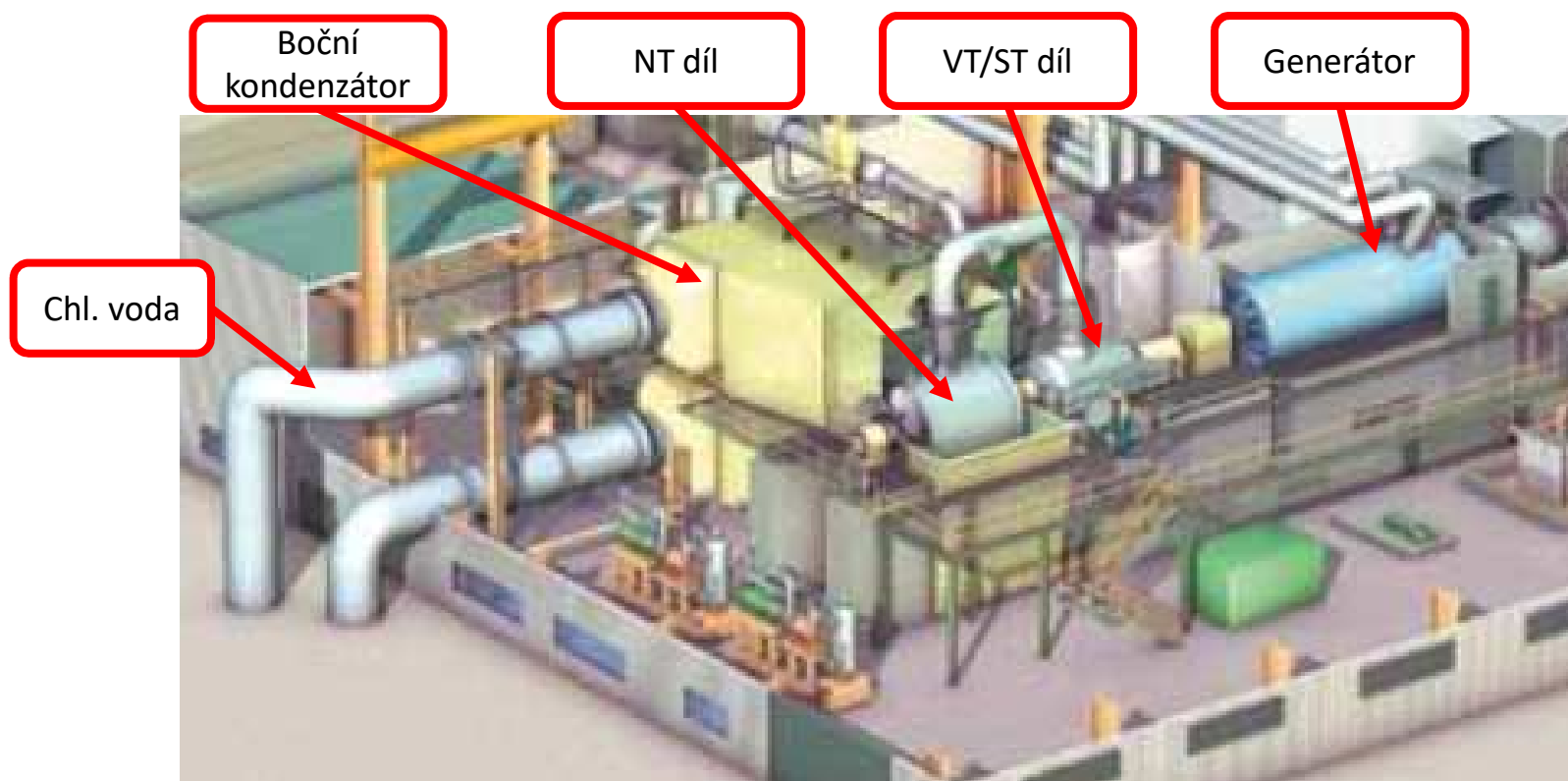


The SGen6-2000H generator

Zdroj obrázky :

<http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/gas-turbines/SGT6-8000H/bugok-3-bringing-the-h-class-to-korea-brochure.pdf>

## Detail s parní turbínou

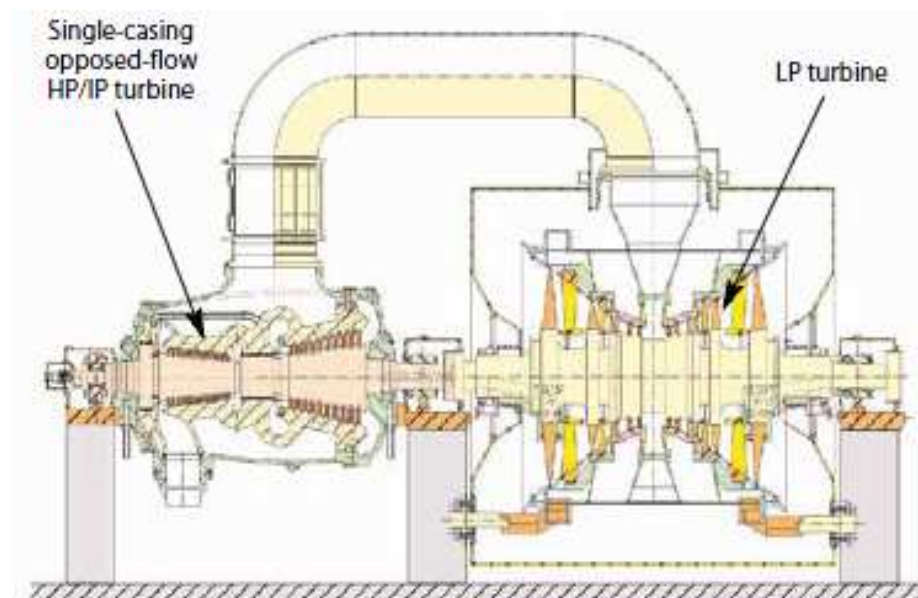


Zdroj obrázku :

<http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/gas-turbines/SGT6-8000H/bugok-3-bringing-the-h-class-to-korea-brochure.pdf>

## Detail parní turbíny

The SST6-5000  
steam turbine



- Výrobce Siemens typ SST6-5000
- kombi VT/ST a dvou Proudý NT díl
- bokový výstup do vodou chlazeného kondenzátoru
- připojovaná ke generátoru přes SSS spojku, která spojí parní turbínu s generátorem v momentě, kdy otáčky turbíny dosáhnou 3600 ot/min

Zdroj obrázku :

<http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/gas-turbines/SGT6-8000H/bugok-3-bringing-the-h-class-to-korea-brochure.pdf>

# SW nástroje pro výpočty pokročilých cyklů

## SW nástroje pro výpočty pokročilých cyklů

Existuje celá řada SW nástrojů pro výpočty pokročilých cyklů :

→ 1) SW nástroje vyvíjené a používané výrobci kotlů, parních a plynových turbín, tzv. „OEM“ pro interní potřebu tzv. „in-house SW“

→ 2) SW nástroje od firem, které je prodávají jako komerční „produkt“

Thermoflow (<http://www.thermoflow.com/>)

EBSILON ([https://www.steag-systemtechnologies.com/ebsilon\\_professional.html](https://www.steag-systemtechnologies.com/ebsilon_professional.html))

AxCYCLE (<http://www.softinway.com/en/software-applications/heat-balance-design-analysis/>)

Cycle-Tempo (<http://www.asimptote.nl/software/cycle-tempo/>)

→ 3) SW nástroje vyvíjené v rámci akademické sféry (např. v rámci diplomové nebo doktorské práce)

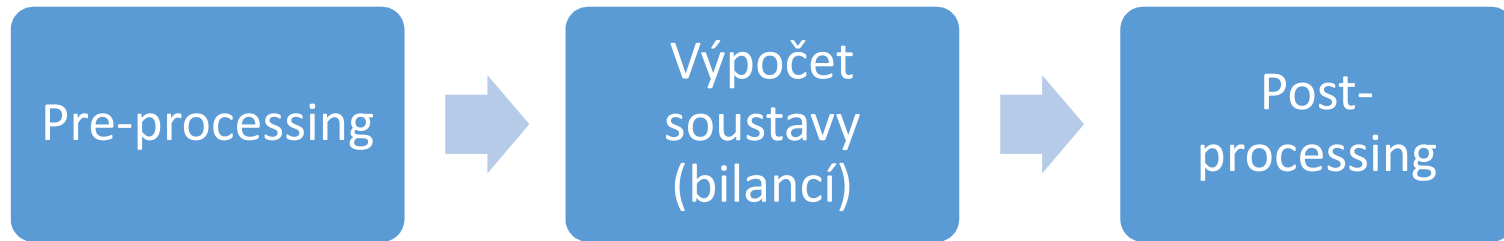


### Společné charakteristiky SW nástrojů pro výpočty pokročilých cyklů :

Přes určité rozdíly lze mezi SW nástroji pro výpočet cyklů najít celou řadu společných rysů :

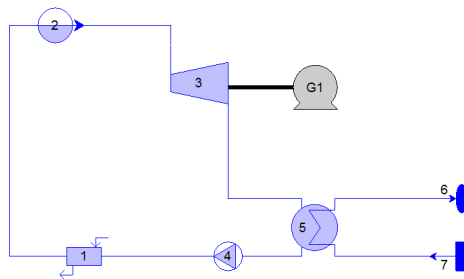
- model systému (cyklu) je složen z modelů elementárních komponent („uzlů“)
- uzly jsou vzájemně propojeny a vytváří tak síťový graf
- spojnice síťového grafu představují „toky“ média v cyklu - na spojnici se průtok ani stav média nemění (*resp. výjimečně v některých SW může být uvažováno, že tlak mezi vstupem a výstupem se může snížit, tzv. „proškrtit“*)
- vyřešit cyklus pak v podstatě znamená vyřešit rovnost bilancí (průtokových a energetických), rovnost tlaků a průtoků na spojnících a rovnice popisující děje na úrovni jednotlivých komponent - z hlediska matematiky to vede k masivní soustavě lineárních (i nelineárních) rovnic, která se řeší iteračními metodami
- nezbytnou součástí SW jsou podprogramy „knihovny“, které vyčíslují termodynamické vlastnosti média (tj. teplota, tlak, entalpie, entropie, měrný objem, suchost a jejich vzájemné vztahy)

## Obecný popis procesu výpočtu prostřednictvím SW nástrojů pro výpočty pokročilých cyklů :



### tvorba vstupních souborů =>

- tvorba síťového grafu z uzlů a hran (spojnic) - tj. tvorba topologie cyklu
- definování interních parametrů (vlastností) jednotlivých uzlů
- definování okrajových podmínek (=> definování požadavků na řešení)



### spuštění řešiče, který iterativními metodami usiluje o docílení :

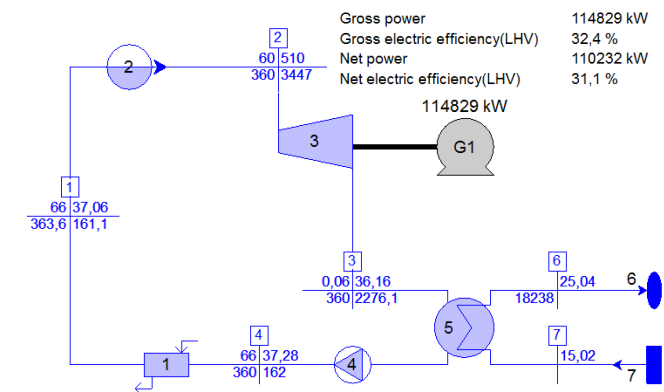
- rovnosti bilancí (průtokových a energetických)
- rovnosti tlaků, průtoků a entalpií na spojnicích
- splnění fyzikálních rovnic popisujících uzly
- splnění okrajových podmínek

```

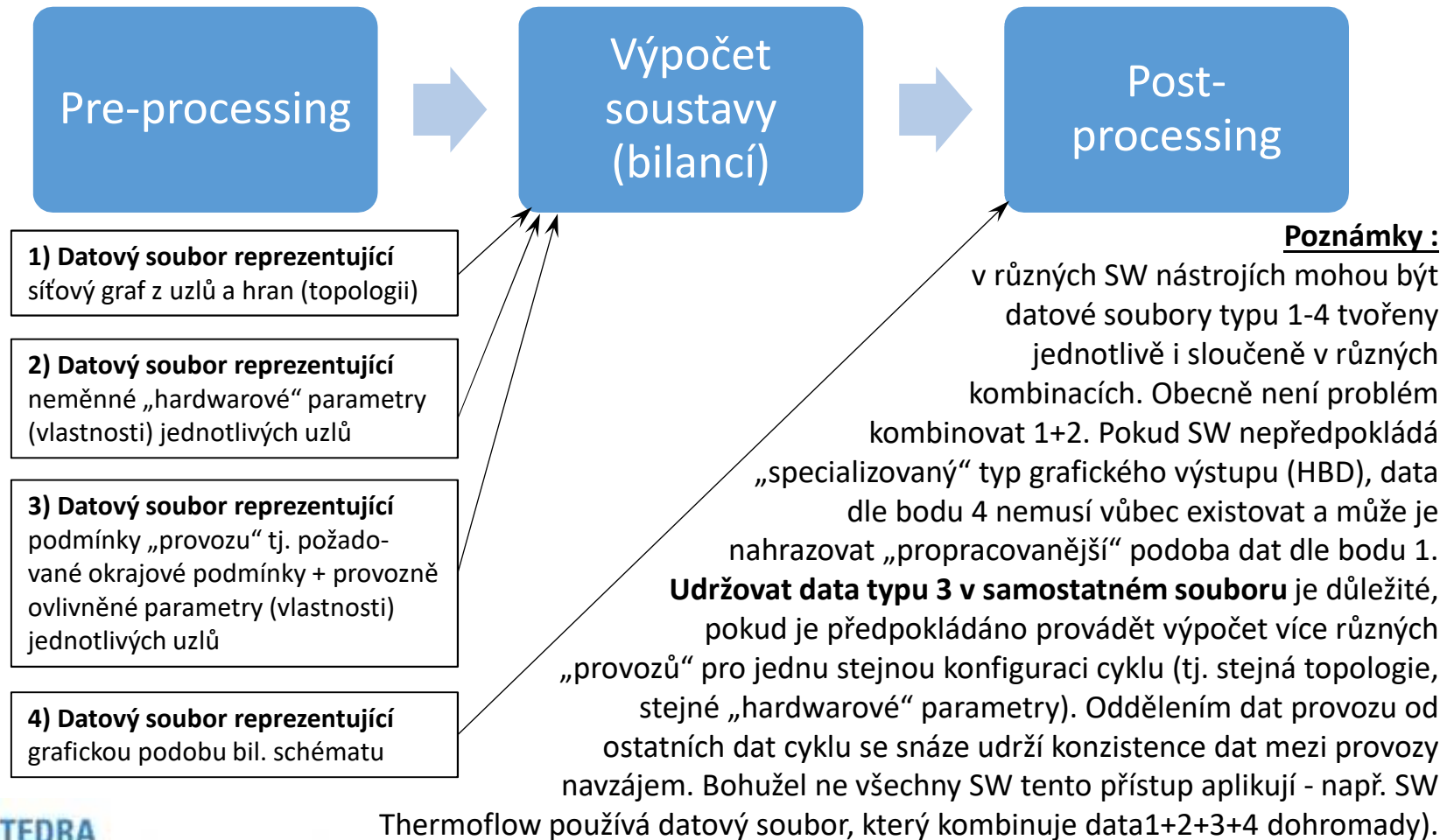
    Computing flow      ... done.
    Computing enthalpy ... done.
    *****
    Loop 4 Delta      Delta      Stream      Type
    24  0.24115-03    -2.4115     13          H
    *****
    Computing flow      ... done.
    Computing enthalpy ... done.
    *****
    Loop 4 Delta      Delta      Stream      Type
    25  0.24225-03    -2.4223     13          H
    *****
  
```

### zpřístupnění / vizualizace spočtených výsledků formou :

- textových souborů
- vyplnění křížů bilančních schémat
- zobrazení děje v T-s, h-s nebo T-Q diagramu
- výpočet výkonů, účinností apod.



## Popis datových toků při výpočtu prostřednictvím SW nástrojů pro výpočty pokročilých cyklů :



## Výpočty termodynamických vlastností média

Nezbytnou součástí SW nástrojů pro výpočty pokročilých cyklů jsou podprogramy „knihovny“, které vyčíslují termodynamické vlastnosti média (tj. teplota, tlak, entalpie, entropie, měrný objem, suchost a jejich vzájemné vztahy).

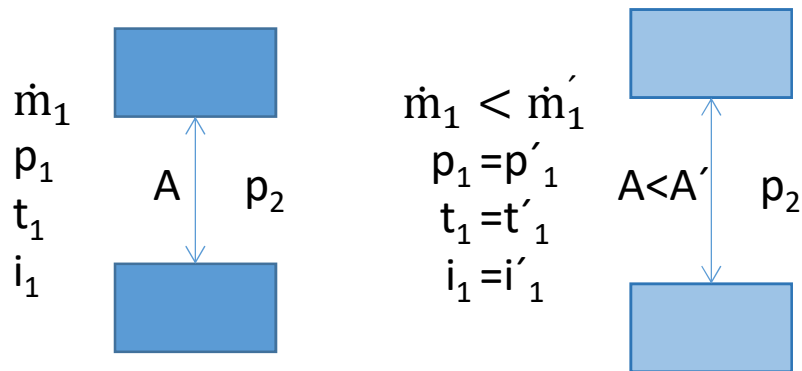
- pro vodu / vodní páru jsou to formulace dle IAPWS IF 97 (The International Association for the Properties of Water and Steam - Industrial Formulation 1997)
- pro vzduch/spaliny je možné vycházet z teorie směsi plynů →  

Viz např. Konečný V. : Návrh paroplynového zařízení, str.77
- pro ostatní plyny, látky pro ORC tj. „chladiiva“ a nadkritický CO<sub>2</sub> je možné např. využít vlastnosti širokého spektra látek popsanych programem NIST/REFPROP (National Institute Of Standards and Technology / Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database )
  - bezplatnou alternativou k NIST/REFPROP jsou knihovny vlastnosti „CoolProp“ (<http://www.coolprop.org>) dostupné např. pro Python, Matlab, C# i jako doplněk do Excelu
- pro teplotnosné látky - termální oleje, roztavené kovy a soli se vychází zpravidla z údajů přímo od dodavatelů těchto látek nebo z chemických příruček

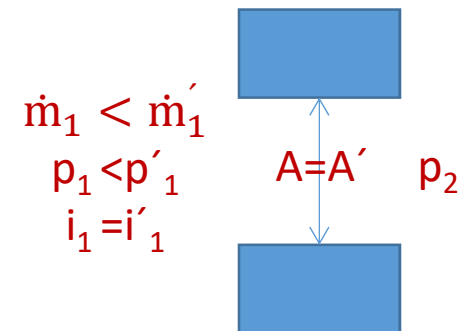
## Návrhové vs. nenávrhové provozy

I když z hlediska přístupu k průtokovým energetickým bilancím není rozdíl mezi výpočty návrhových a nenávrhových provozů, zásadní rozdíl mezi nimi je v přístupu k výpočtům na úrovni jednotlivých komponent a především v logice „diktátorů“ tlaků a průtoků (*bude vysvětleno v prezentaci dále*).

### Návrhový provoz :



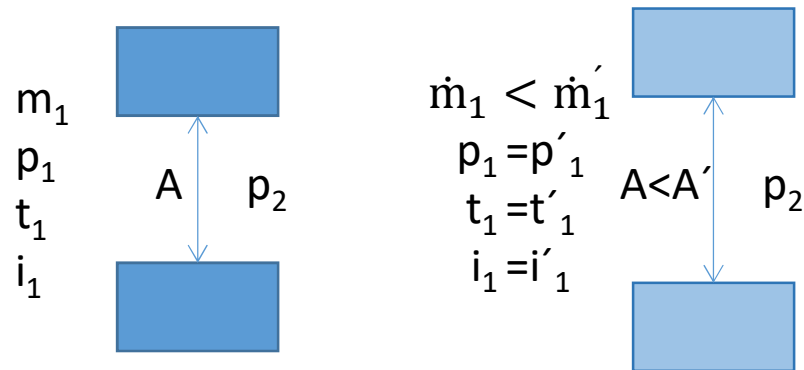
### Nenávrhový provoz :



## Návrhové vs. nenávrhové provoz

### Návrhový provoz :

Předpokládá se, že tepelný cyklus je definován uživatelem, včetně tlaků, průtoků atd. „**Hardwarový**“ design jednotlivých komponent (úseků expanze v turbíně, kondenzátoru, ohříváků atp.) je v této fázi výpočtu volný a **pružně se přizpůsobuje aktuálním podmínkám** vyplývajícím ze zadání návrhového provozu (např. průtočné průřezy v turbíně, velikost teplosměnných ploch kondenzátoru, ohříváků atd.).

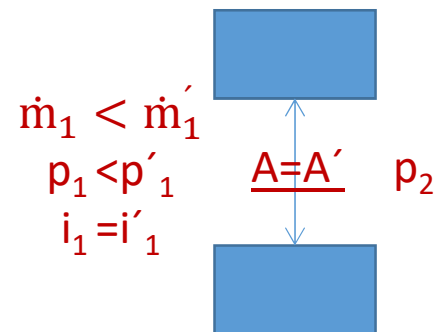


## Návrhové vs. nenávrhové provoz

### Přechod od návrhového k nenávrhovým provozům :

Po úspěšném dokončení bilančních výpočtů návrhového provozu se „hardwarový“ design jednotlivých komponent „zafixuje“

=> spočtené interní výsledky komponent (např. průtočné konstanty expanze v turbíně, teplosměnné plochy kondenzátoru, ohříváků atp.) se těmto komponentám přiřadí jako jejich fixní vlastnosti.



### Návrhové vs. nenávrhové provoz

#### Přechod od návrhového k nenávrhovým provozům (pokračování) :

Provoz se po zafixování vlastností verifikuje, a to přepočtením **postupem výpočtu pro nenávrhové provoz** (změna **postupu výpočtů dějů v komponentách, změna „diktátorů“ tlaků a průtoků**), ale vzhledem k tomu, že nebylo změněno zadání, výsledek bilančního výpočtu by měl být blízký výsledku původního návrhového provozu.

**Pak je možno přistoupit k výpočtu dalších (nenávrhových) provozů pro dané zařízení.**

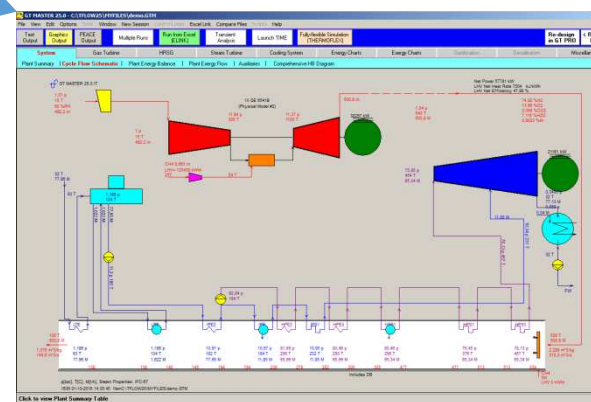
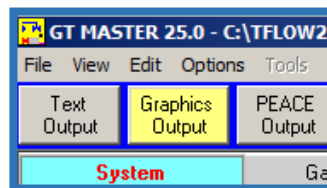
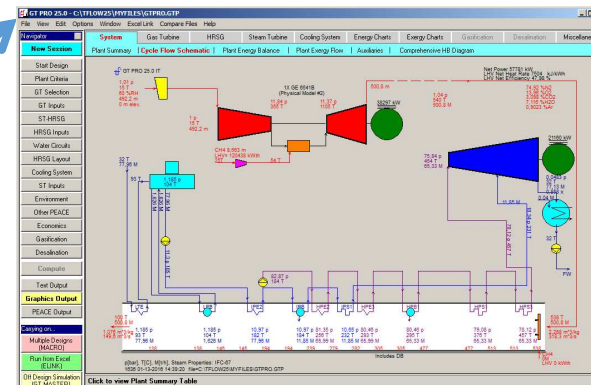
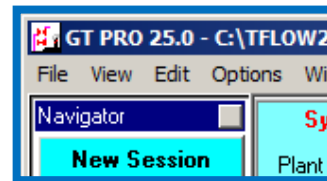
**Nenávrhových provozů může být celá řada** ve smyslu různých změněných provozních podmínek a jejich kombinací. Změněné provozní podmínky typicky zahrnují : provoz se změněnou teplotou okolního vzduchu, různé částečné provoz (tj. se sníženým příívodem páry do turbíny), provoz s různými průtoky a tlaky páry v procesních odběrech (pokud jsou použity) atp.



## Návrhové vs. nenávrhové provozy

### Doplňující poznámky :

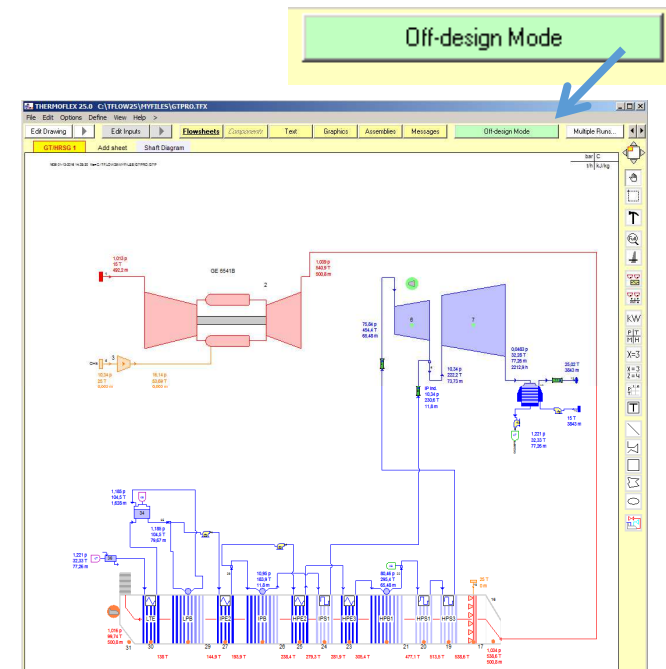
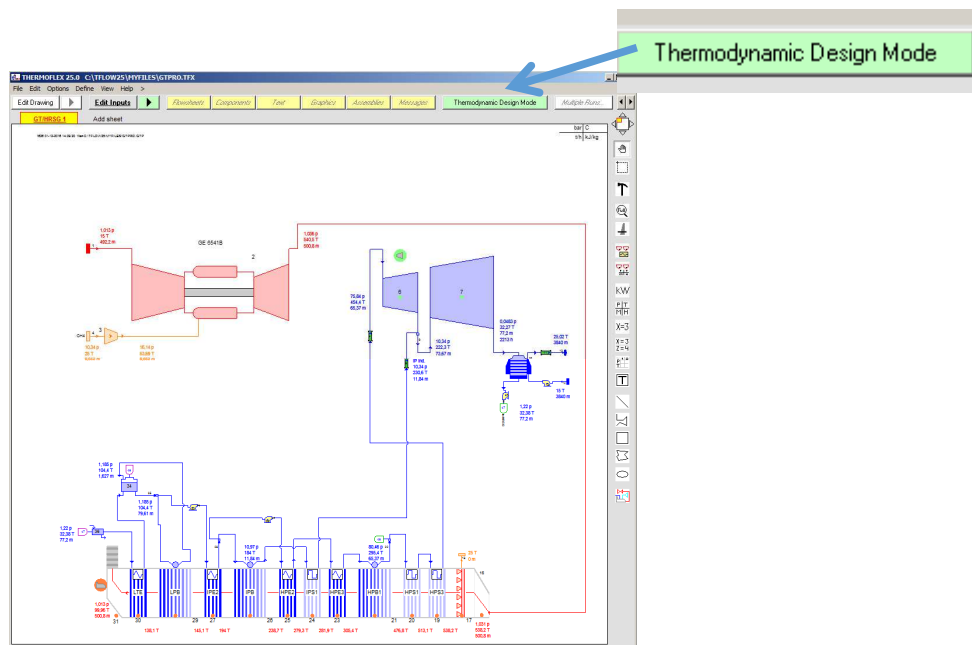
- Výpočty návrhových provozy jsou jednodušší, proto některé SW vypočítají jenom návrhové provozy.
- V některých SW je specializovaná část soustředující se na návrh hardwarové konfigurace vyplývající z návrhového provozu a druhá část počítající už jenom nenávrhové provozy (příklad – Thermoflow / GT Pro / GT Master)



## Návrhové vs. nenávrhové provozy

### Doplňující poznámky :

- *V jiných SW se změna mezi návrhovým a nenávrhovým provozem řeší změnou módu výpočtu (příklad – Thermoflow / Thermoflex).*



### Přenosy tlaků a průtoků

Z hlediska řešení obecného systému (popsaného síťovým grafem) nemusí být zřejmé, které uzly jsou určující z hlediska generování informace o tlaku a průtoku - ví se jenom, že tlaky a průtoky musí být nakonec vybalancovány v celém systému.

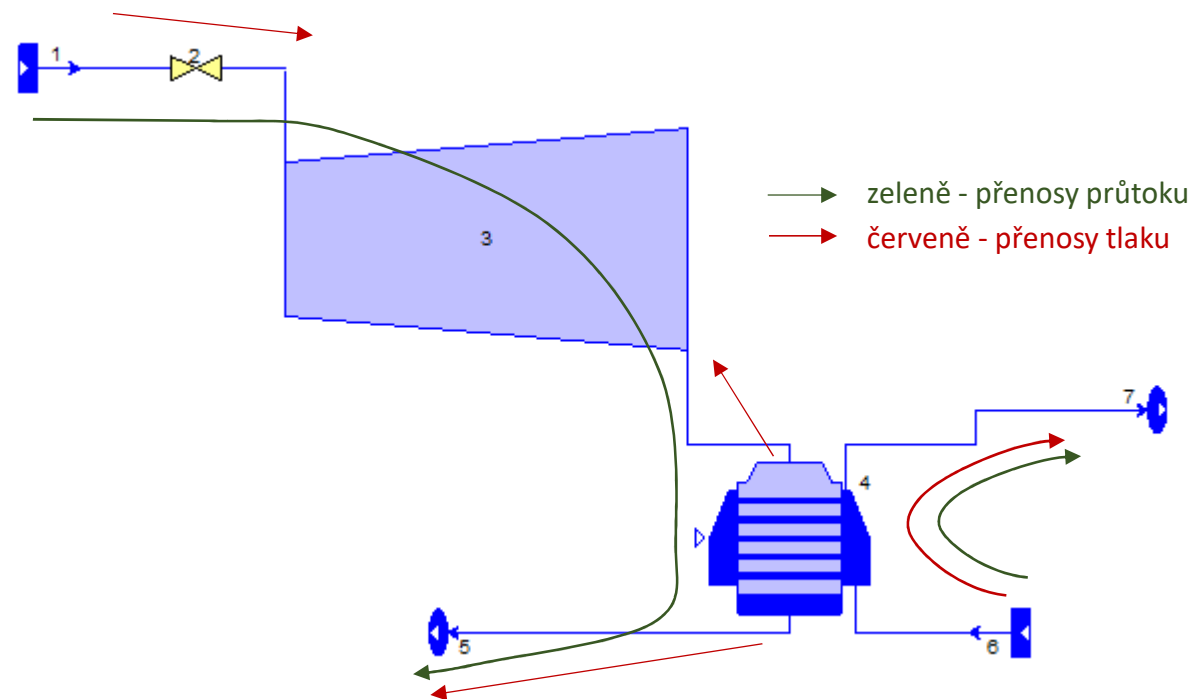
Proto pozornost musí být věnována sledování systému generování přenosu tlaku a průtoků.

Tato problematika se většinou řeší metodou **stanovení tzv. diktátorů**, tj. uzlů, které generují (stanovují) informaci o tlaku nebo průtoku (ať již proto, že tuto informaci zadal uživatel, nebo proto, že je daná fyzikálními zákony). V pokročilejších systémech může být i stanoven určitý seznam priorit ve věci toho, jak vysokou má daný uzel prioritu jako diktátor tlaku nebo průtoku.

Tlakový signál se pak od uzlů - diktátorů šíří prostřednictvím hran k ostatním uzlům, které tento signál přijímají.

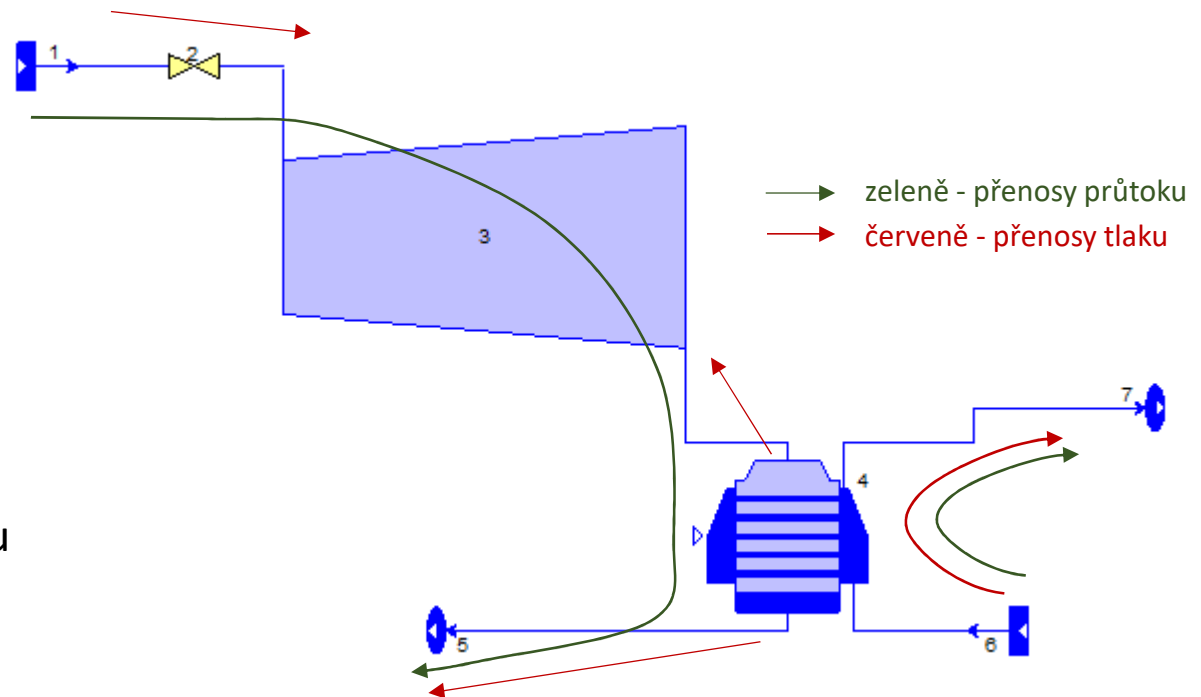
Na ilustračním obrázku je triviální zapojení parní turbíny v SW Thermoflex / Thermoflow. Zdrojový uzel (1) je diktátorem jak tlaku, tak průtoku (tyto hodnoty byly uživatelem zadány). Signál o průtoku pak projde přes turbínu a kondenzátor až do koncového uzlu odvodu kondenzátu (5).

## Přenosy tlaků a průtoků - jednoduchý příklad

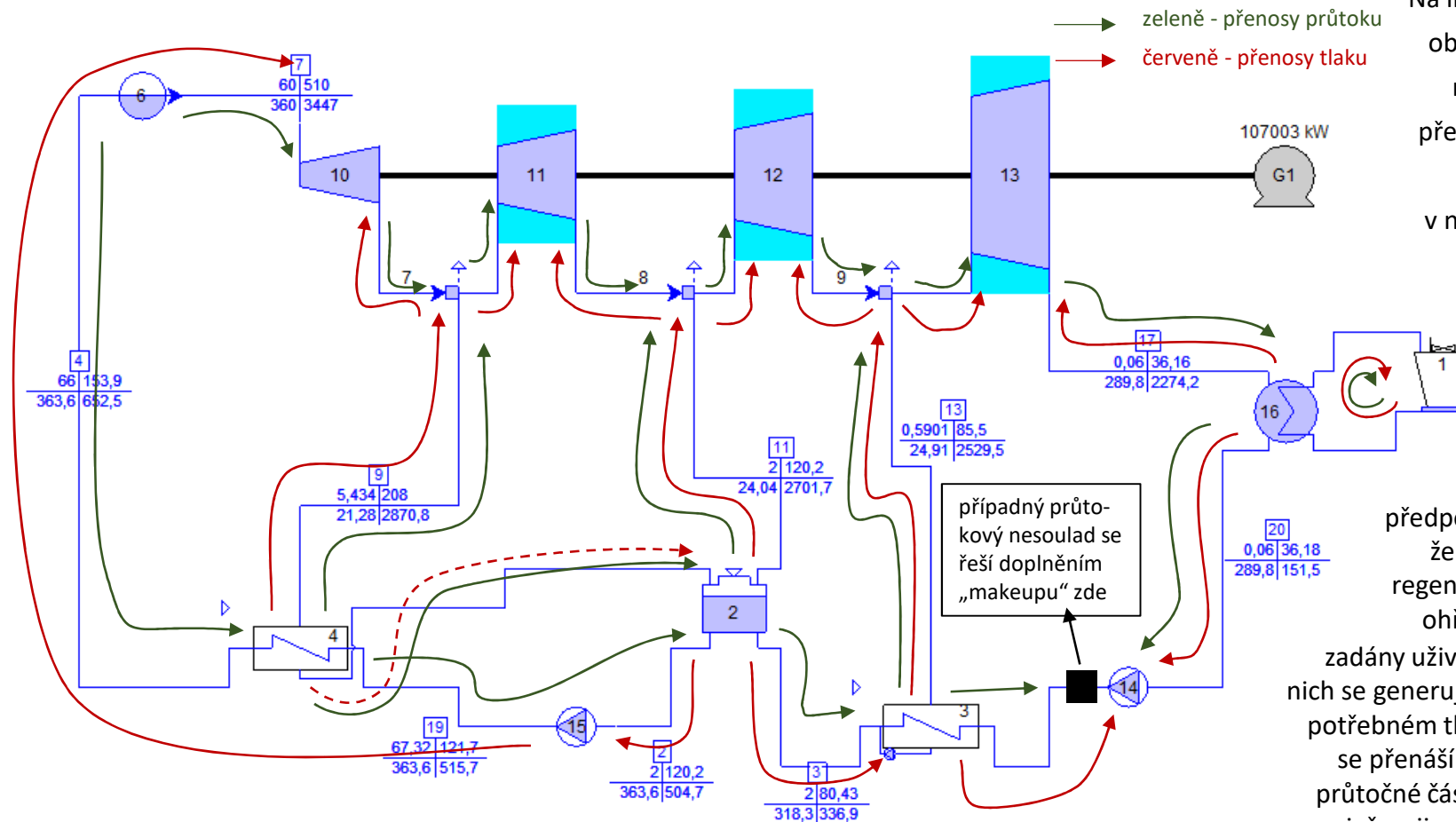


Na straně chladicí vody je diktátorem tlaku i průtoku zdrojový uzel (6) - opět obě hodnoty zadány uživatelem. Z hlediska tlaku páry za turbínou a tlaku kondenzátu je ale diktátorem kondenzátor (4). Signál o tlaku od něj jde jak k výstupu z turbíny (3), tak i ke koncovému uzlu odvodu kondenzátu (5).

## Přenosy tlaků a průtoků - jednoduchý příklad



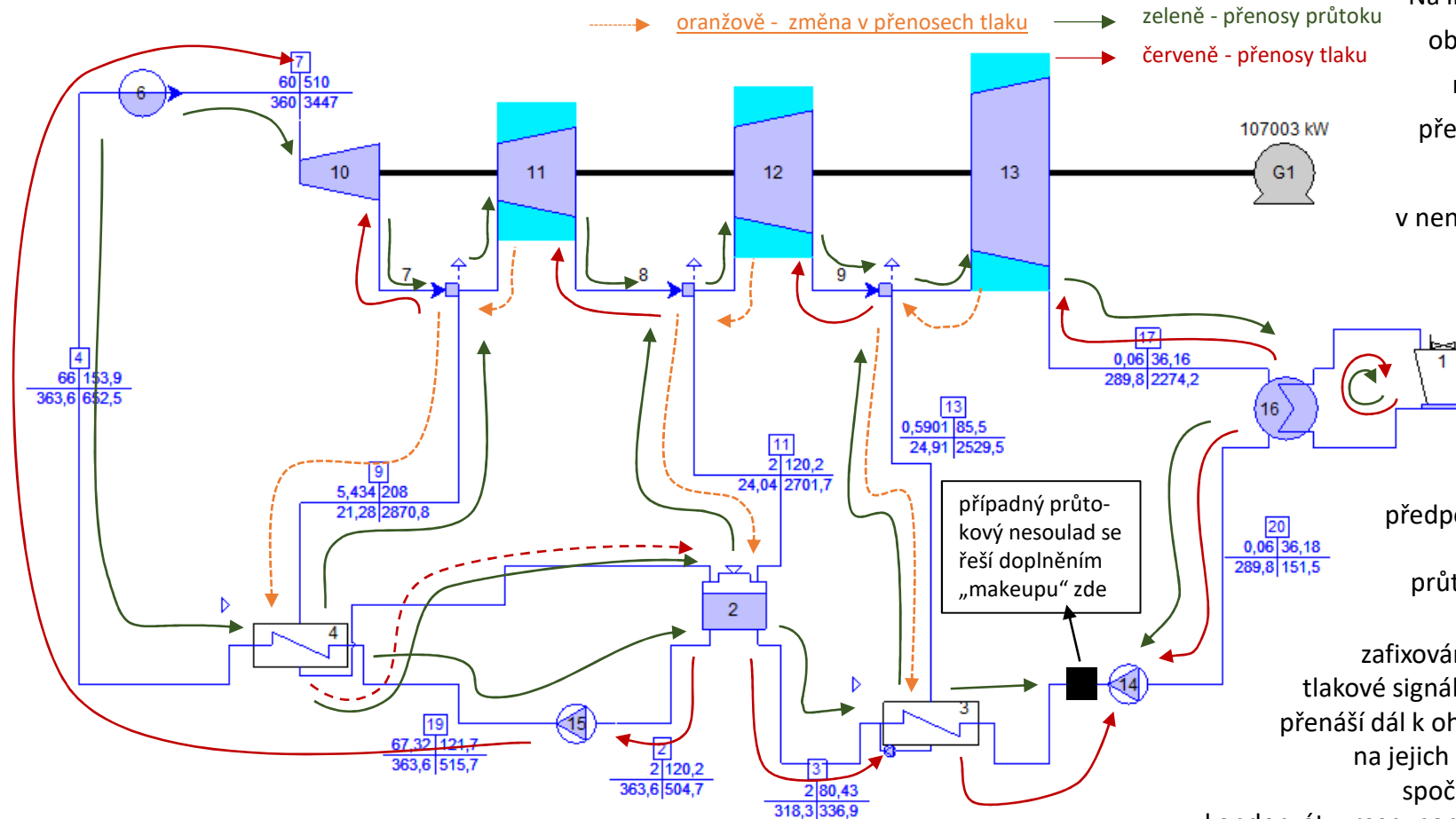
## Přenosy tlaků a průtoků - příklad „design provozu“



Na ilustračním obrázku jsou naznačeny přenosy tlaků a průtoků v návrhovém provozu.

V příkladu předpokládáme, že teploty za regenerativními ohříváky jsou zadány uživatelem a z nich se generují signály o potřebném tlaku, které se přenáší směrem k průtočné části turbíny, jež se jim adaptivně přizpůsobuje.

## Přenosy tlaků a průtoků - příklad „off-design provozu“



Na ilustračním obrázku jsou naznačeny přenosy tlaků a průtoků v nenávrhovém provozu.

případný průtokový nesoulad se řeší doplněním „makeupu“ zde

V příkladu předpokládáme, že design průtočné části turbíny je zafixován a diktuje tlakové signály, které se přenáší dál k ohřívákům a na jejich základě se spočítá teplota kondenzátu, resp. napájecí vody a spotřeba páry do ohříváků.



FAKULTA STROJNÍ  
ZÁPADOČESKÉ  
UNIVERZITY  
V PLZNI

**KATEDRA**

ENERGETICKÝCH STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

---

**Děkuji za pozornost**