ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Semestrální práce z předmětu ELEKTRÁRNY I

Exkurze elektrárnami TUŠIMICE, VŘESOVÁ, ŽELINA
Tepelný výpočet 200 MW bloku ETU II
Korekce spotřební charakteristiky 200 MW bloku ETU II

Datum: 5. 12. 2006
Školní rok: 2006 / 2007
Ročník: 1. NMgr.
Vypracoval: Sirový Martin (E06059)

Obsah

OBSAH **2**

1. MALÁ VODNÍ ELEKTRÁRNA ŽELINA **3**

2. PAROPLYNOVÁ ELEKTRÁRNA VŘESOVÁ **4**

3. TEPELNÁ ELEKTRÁRNA TUŠIMICE II **5**

PROVOZY ELEKTRÁRNY 6
Kotelna *6*
Strojovna *7*
Bloková dozorna *7*
Elektrostatické odlučovače *8*
Odsíření *8*
Chemická úpravna vody CHÚV *9*
TEPELNÝ VÝPOČET 200 MW BLOKU ELETRÁRNY TUŠIMICE II 12
Zjednodušené tepelné schéma bloku *12*
Průběh tepelného cyklu bloku v I-S diagramu *13*
Analytický výpočet množství páry Mp z energetických a množstevních bilancí jednotlivých uzlů tepelného oběhu *14*
Výpočet s reálnými parametry, výpis výpočtového dokumentu *17*
Zhodnocení výsledku, porovnání vypočteného množství páry se skutečnou hodnotou *20*
KOREKCE SPOTŘEBNÍ CHARAKTERISTIKY BLOKU 200 MW 21
Vztahy pro korekční charakteristiku *21*
Výpočet korekční charakteristiky *23*
Výsledná korekční charakteristika 200 MW bloku elektrárny Tušimice II *24*

1. Malá vodní elektrárna Želina

Malou vodní elektrárnu Želina postavila v roce 1908 na řece Ohři obec Kadaň. Elektrárna byla v provozu do roku 1925, kdy se její provoz ukončil po vystavění nové elektrárny v Lomazicích.

V 90. letech svěřilo elektrárnu město Kadaň do trvalého užívání Elektrárnám Tušimice. Elektrárna prošla celkovou rekonstrukcí a od roku 1994 je opět v provozu. V závislosti na průtoku vody dodává 300 – 450 kW elektřiny.

Technologické zařízení dodala německá firma VOITH. Elektrárna obsahuje 2 Francisovy turbíny, které pohání asynchronní generátory o jmenovitém výkonu 315 kW a jmenovitých otáčkách 1011 ot/min.

2. Paroplynová elektrárna Vřesová

Elektrárnu vlastní společnost Sokolovská uhelná a.s.

Základním palivem elektrárny je energoplyn získávaný přímo v areálu elektrárny tlakovým zplynováním uhlí. Doplňkovým palivem umožňující rychlé změny výkonu je zemní plyn.

Obě paliva jsou spalována ve spalovacích komorách plynové turbíny. Vzduch pro spalování a pro chlazení průtočné části turbíny je dodáván turbokompresorem, který je napojen na jedné hřídeli s turbínou. Na vstupu do turbíny mají spaliny teplotu 1100 °C, na výstupu 540 °C a jsou vedeny do kotle na odpadní teplo.

Kotel je dvoutlaký, bez přitápění. Pára je vedena do dvoutělesové dvoutlaké kondenzační parní turbíny se dvěma regulovanými odběry, která pohání vlastní generátor. Teplo obsažené ve spalinách je před výstupem na komín využito pro předohřev vody pro vytápění karlovarské aglomerace.

Spaliny vypouštěné z kotle plně vyhovují všem normám pro ochranu ovzduší. Pro snížení tvorby kysličníků dusíku při spalování plynu je použito nástřiku vodní páry do spalovacích prostor plynové turbíny.

Termodynamická účinnost plynové turbíny je 34,8 %, účinnost bloku při kondenzačním provozu parní turbíny je 50,5 % a s využitím tepla spalin pro předohřev síťové vody činí účinnost 54,5 %.

Elektrárna je rozdělena na dva identické bloky o výkonu 2 x 200 MW. Plynové turbíny dosahují výkonu až 154,5 MW, parní turbíny až 48,5 MW.

Pro pružnost regulace výkonu je elektrárně hojně využívána ke krytí odběrových špiček. I díky špičkové regulaci je ekonomická bilance elektrárny velmi dobrá. Průměrný čistý zisk elektrárny po zdanění za poslední 3 roky je 520 mil. Kč. za rok.

3. Tepelná elektrárna Tušimice II.

Elektrárna Tušimice II byla uvedena do provozu v roce 1974. Majitelem je ČEZ a.s. Obsahuje 4 bloky, každý o výkonu 200 MW.

Elektrárna je umístěna přímo u povrchového uhelného dolu Nástup Tušimice. Díky tomu jsou ušetřeny náklady na dopravu paliva do elektrárny a řadí se tak k ekonomicky nejvýhodnějším tepelným elektrárnám u nás. Zásobování vodou je zajištěno z nedaleké řeky Ohře. Vápenec na odsíření je dovážen železniční dopravou především z oblasti Českého krasu.

PROVOZY ELEKTRÁRNY

Kotelna

Pohled z venku

Parovody

Mlýn na uhlí

Kotle jsou vyrobeny Železárnami Vítkovice, jsou průtočné, dvoutahové s granulačním ohništěm a přihříváním páry. Rozdrcené a vysušené uhlí je vháněno do kotle spolu se vzduchem 6 ventilátory. Kotle jsou vysoké 65m. Teplotní dilatace kotlů je až 35 cm, z toho důvodu jsou zavěšeny za strop kotelny. Každý kotel je napájen vlastní turbonapáječkou, v záloze má 2 elektronapáječky.

Parametry kotle

typ	průtočný parní kotel
množství páry za hodinu	650 – 660 tun páry za hodinu
teplota v kotli	1400 °C
parametry přehřáté páry	17,5 MPa, 540 °C
parametry přihřáté páry	4,3 MPa, 540 °C
teplota napájecí vody	253 °C
zapalovací hořáky	plynové (zemní plyn)

Parametry paliva

výhřevnost	9840+-1050 kJ/kg
obsah sýry v sušině	2,61 %
obsah popelu v sušině	32 – 42 %
obsah vody	35 – 50 %

Strojovna

Pohled na turbosoustrojí a kondenzátor

Turbosoustrojí dodala firma Škoda. Parametry jsou uvedeny níže. Chlazení je kombinované – rotorové vinutí je chlazeno povrchově vodíkem, statorové vinutí je chlazeno kondenzátem proudícím v dutých vodičích.

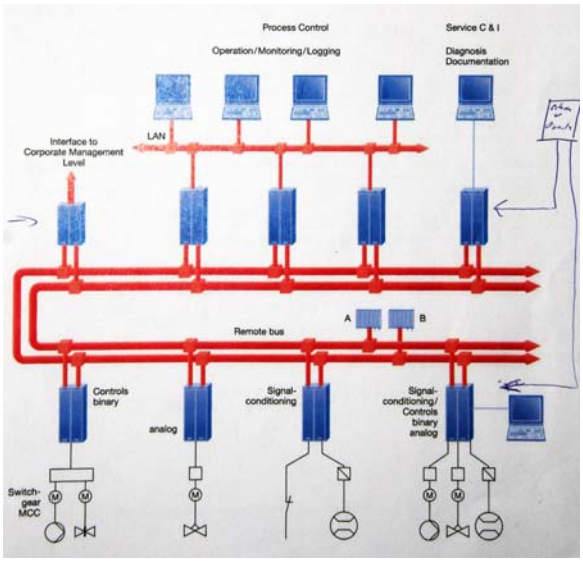
Parametry alternátoru

výkon S	235 MVA
činný výkon P	200 MW
jmenovitý proud In	8,76 kA
jmenovité napětí Un	15,75 kV
otáčky w	3000 / min
$\cos\varphi$	0,85

Bloková dozorna

Ovládání celého komplexu elektrárny se provádí z blokové dozorny. V elektrárně jsou nainstalovány dva řídící systémy Procontrol P13 a Procontrol P14, oba od firmy ABB. Systém P13 slouží pouze pro řízení turbosoustrojí díky kratké době odezvy. Zbylé procesy zajišťuje systém P14.

Schéma systému Procontrol



Systém Procontrol je decentralizovaný. Každý jeho řídící modul je samostatná jednotka, která je v případě poruchy jednoduše vyměnitelná. Modulem může být jednoduché čidlo nebo i komplexnější řídící jednotka. Moduly jsou seskupovány ve skříních, které jsou napojeny na centrální sběrnici. Provoz na sběrnici řídí tzv. master servery. Ty „ošahávají“ jednotlivé skříně a zajišťují vzájemné předávání dat. Mezi moduly navzájem a na řídící servery, na které jsou napojeny uživatelské monitorovací a řídící stanice.

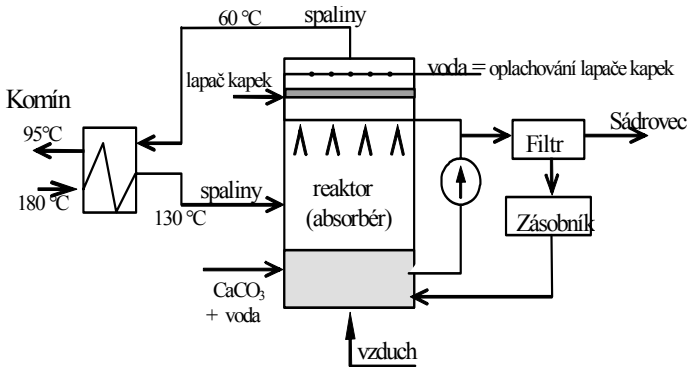
Systém je ovládán operátory. Jejich činnost je zaznamenávána chybovým hlásičem, který zaznamená každý nestandardní stav a reakci operátora.

Elektrostatické odlučovače

Odstranění popílku a pevných částí se provádí v elektrostatických odlučovačích. Do trubkovité nádoby vstupují ze spodní části spaliny z kotle a proudí vzhůru. Uvnitř nádoby jsou elektrody s napětím 50 kV. Částice jsou průchodem nádoby ionizovány a usazují se na elektrodách odkud jsou sklepávány na dno nádoby. Poté jsou pneumaticky dopravovány do zásobníkových sil. Účinnost elektrostatických odlučovačů je cca 99 %.

Odsíření

Princip odsíření



Procesy v reaktoru

$$Ca(CO_2)_2 + SO_2 \rightarrow CaSO_2 + CO_2$$

$$SO_2 + CaO \rightarrow CaSO_3$$

$$CaO + CO_2 \rightarrow CaCO_3$$

$$SO_2 + CaCO_3 + H_2O \rightarrow 0{,}5 \cdot O_2 + CaSO_3 + CaSO_4 \cdot 2H_2O + CO_2$$

Sádrovec – produkt odsíření

Jako $CaCO_3$ se používá vápenec, který se těží v Českém krasu na Dole mořina. Vápenec se mele na prach a míchá s vodou - vznniká 70 % suspenze.

Vzniklá směs má
- vysokou sedimentaci ⇒ nutno míchat
- velké opotřebení pří pohybu částic ⇒ nutné použití gumových stěn

Při přebytku vzduchu v procesu, nebo při vhánění vzduchu do jímky - vzniká $CaSO_4$ (sádra).

$$O + CaSo_3 \rightarrow CaSO_4$$

Sádrovec se ukládá na skládku. Do budoucna se předpokládá výroba energosádrovce, sádrokartonu.

Chemická úpravna vody CHÚV

Slouží pro úpravu vody na požadované vlastnosti do jednotlivých procesů v elektrárně. Rozlišujeme následující druhy vody.

1. surová voda - tato voda se získává z povrchových toků (z řeky, z vodní nádrže, z přehrady...).V ETU II se voda získává z řeky Ohře. Tato voda není vhodná pro přímý provoz elektrárny, je to roztok silně zředěných solí, plynů, kyselin, zásad, koloidních a suspendovaných látek oxidu vodíku H_2O. Při čerpání se mechanicky zbavuje nečistot pomocí hrubých a jemných česlí a dopravuje se potrubím do ETU II., kde se dále zpracovává.

2. napájecí - používá se k napájení a k doplňování vody v kotli, která ubývá v důsledku netěsností. Napájecí voda je směs kondenzátu a přídavné vody. Musí se sledovat jakostní parametry dle ČSN - tvrdost vody, pH, vodivost a obsah nejdůležitějších prvků: O_2, CO_2, Fe, FeCu, SiO_2. Na kvalitativních vlastnostech napájecí vody závisí čistota páry a tedy spolehlivost a životnost provozů kotlů a turbín.

Soli z odpařené vody zůstávají v kotelní vodě, která se tak zhušťuje. Aby koncentrace soli v kotelní vodě nevzrostla nad přípustnou mez, musí se část vody trvale (odluh) nebo nárazovitě (odkal) odvádět. Aby nedocházelo k případné korozi kotle, provádí se tzv. alkalizace kotelní vody (alkalizace kotelní vody se u průtočných kotlů ETU II. provádí přidáním alkalizačních prostředků - čpavku.)

3. vstřikovací voda - používá se pro vstřikovou regulaci teploty přehřáté a přihřáté páry. Má stejné parametry jako napájecí voda (tzn. musí mít takové jakostní ukazatele, u kterých se po smíšení s parou nesníží jakost páry).

4. přídavná voda - kryje ztráty vody v okruhu kotle - turbíny. Spotřeba přídavné napájecí vody je rozhodující pro dimenzování velikosti úpravny vody.

5. kondenzát - voda vzniklá kondenzací páry po průchodu turbínou, popřípadě výměníky tepla.

6. chladící voda - je používána k chlazení technologických zařízení. Převážná část chladící vody v elektrárně je použita pro odvod tepla při kondenzaci páry z turbíny.V hlavním chladícím okruhu musí být voda upravená tak, aby nedošlo k zanášení teplosměnných ploch, tvorbě nánosů, korozí...

7. tranportní voda - používá se jako dopravní prostředek u hydraulického odpopílkování a odstruskování, nároky na jakost této vody nejsou žádné.

8. odpadní voda - dle použití v technologickém procesu elektrárny má voda změněnou jakost - může ohrozit kvalitu povrchových nebo podzemních vod. Tyto vody musí být čistěny podle druhu převažujícího znečištění.

Do stanice CHÚV přichází surová voda z řeky Ohře zbavená hrubých nečistot (hrubé, jemné česle). Ve stanici probíhají následující procesy.

1) Předúpravna vody

Zajišťuje odstranění organických látek. Je sestavená z čiření a mechanické filtrace. Číření se provádí v čiřicích reaktorech, kde je využíváno vlastností hydroxidu nebo síranu železitého,a to vytvoření vločkového mraku, který slouží jako filtr. Po průchodu vody tímto mrakem vzniká chemický proces - vlivem elektrostatických sil dochází k absorbci organických látek, probíhá shlukování koloidních dispenzí na velikost částic schopných sedimentace a vločky klesají ke dnu, kde jsou odváděny odkalováním. Do čiřicího reaktoru se přivádí 3% $Ca(OH)_2$ pro alkalizaci, která zabraňuje korozi. Za čiřicími reaktory jsou pískové filtry (zrna 2 mm), které mechanicky zachycují nečistoty a vločky prošlé čiřicím reaktorem. Po určité době se pískové filtry zanášejí a je nutno je čistit protiproudou vodou.

2) Úprava v ionexech

Ukázka katexu

Ionexy jsou měniče iontů, kde dochází chemickou reakcí k odstranění nežádoucích iontů, resp. k výměně za aktivní látku ionexu. Z vody odstraňujeme látky, které by mohly ve vodě tvořit jemný keříčkovitý kal nebo tvrdý kotelní kámen (např. vápník, hořčík atd.) a tedy i zanášení soustavy $\Rightarrow$ vodu změkčujeme.

Ionexy jsou makromolekulární sloučeniny, jehož základ tvoří 3-rozměrný skelet, na kterém jsou umístěny aktivní skupiny. Používají se zpravidla ve formě kuliček (0,5 ÷ 1 mm). Umožňují odstraňovat z vody nežádoucí ionty výměnou za ty, kterými byly funkční skupiny ionexu nasyceny a které pro dané použití nejsou na závadu. Na ionex v pracovním cyklu přivádíme vodu, která protéká ionexovým ložem tlakového filtru. Podle druhu použitého ionexu, jsou jim zachycovány ionty obsažené ve vodě a výměnou, za zachycené ionty se do vody dostává pohyblivý iont z ionexu. Jsou-li ionexem zachycovány kationty, jde o katex, při zachycování aniontů anex.U katexů můžeme vyměňovat kationt za iont Na^+ nebo za iont H^+. U anexů jsou anionty z vody vyměněny za OH^- ionty. Jsou-li všechny volné ionty z ionexu vyčerpány, nedochází již k další absorpci iontů z vody a ty procházejí ionexovým ložem bez zachycení.

Použitím ionexů docilujeme změkčení, deionizaci nebo demineralizaci vody. Pro změkčení vody, odstranění iontů tvořících tvrdost (Ca^{++} a Mg^{++}) a všech vícemocných iontů je použit katex v Na^+ formě. Používají se silně kyselé katexy,regenerované roztokem NaCl.

Při deionizaci odstraňujeme z vody všechny kationty a z aniontů ionty silných kyselin (HCl, H_2SO_4 a HNO_3).

Upravená voda jde do dvou zásobních nádrží DEMI vody. Kvalita deionizované vody odpovídá přibližně kvalitě destilované vody, ale obsahuje volný CO_2 a SiO_2.Volný CO_2 můžeme z vody odstranit buď odvětráním nebo jeho vázáním na silně bazickém anexu. Z těchto důvodů bývá někdy zařazována za slabě bazický anex odvětrávací věž.

Při výrobě demineralizované vody je jako koncový stupeň zařazen silně bázický anex (v OH^- formě), který odstraní všechny anionty. Solnost výstupní demineralizované vody je velmi nízká

Regenerace silně bazického anexu se provádí 4% NaOH o teplotě cca. 40 °C promícháváním zeshora v dvouproudých regeneračních filtrech. Regenerace katexu se provádí 8% HCL promícháváním zespoda z důvodu úspory chemikálií. V jednom filtru jsou kombinovány slabě a silně disociované ionexy regenerované týmž regenerantem.

Při požadavku na ještě vyšší čistotu vody (např. napájení vysokotlakých průtočných kotlů) se zařazuje směšný filtr. Jeho náplní je silně kyselý katex v H^+ formě a silně bázický anex v OH^- formě. Voda je zaváděna do filtru horem, střídavě protéká přes zrna katexu a anexu, která jsou při pracovním cyklu navzájem promíchána. U směsného filtru se provádí regenerace katexu a anexu odděleně, po rozplavení jednotlivých ionexových složek. Technologie směsného filtru se používá i při úpravě kondenzátu. Směsný filtr zde nahrazuje celou demineralizační stanici. U průtočných kotlů se obvykle provádí bloková úprava kondenzátu, která zajišťuje trvale nízké koncentrace nečistot v parovodním okruhu a v případě zvýšení koncentrací nečistot tyto účinně odstraní. Nutnou podmínkou pro úspěšnou funkci směsných filtrů při úpravě kondenzátu je co nejdokonalejší odstranění suspendovaných látek v předřazeném zařízení.

3) Bloková úprava kondenzátu - BUK

Surový kondenzát proudí nejprve do náplavného filtru složeného z tzv. svíček. Na svíčky se naplaví perlit a přes tuto látku dochází k filtraci kondenzátu. Součástí BUK je též směsný filtr. Po průchodu kondenzátu směsným filtrem dochází k alkalizaci vody. U průtočných kotlů se alkalizace provádí čpavkem. Alkalizací se provádí úprava pH vody na zásaditý charakter - protikorozní opatření.

Vně CHÚV jsou zásobníky na 45% NaOH, 31% HCl, 40% $FeCl_3$, čpavek V objektu jsou 3 DEMI linky (1-provoz, 2-záloha, 3-regenerace).

CHÚV pro svoji činnost využívá též chemických laboratoří, ve kterých je prováděna kontrola parametrů jednotlivých druhů vod v elektrárně. V chemických laboratořích se dělá také rozbor paliva, především určování množství síry v palivu, rozbor strusky apod.

Dozorna CHÚV

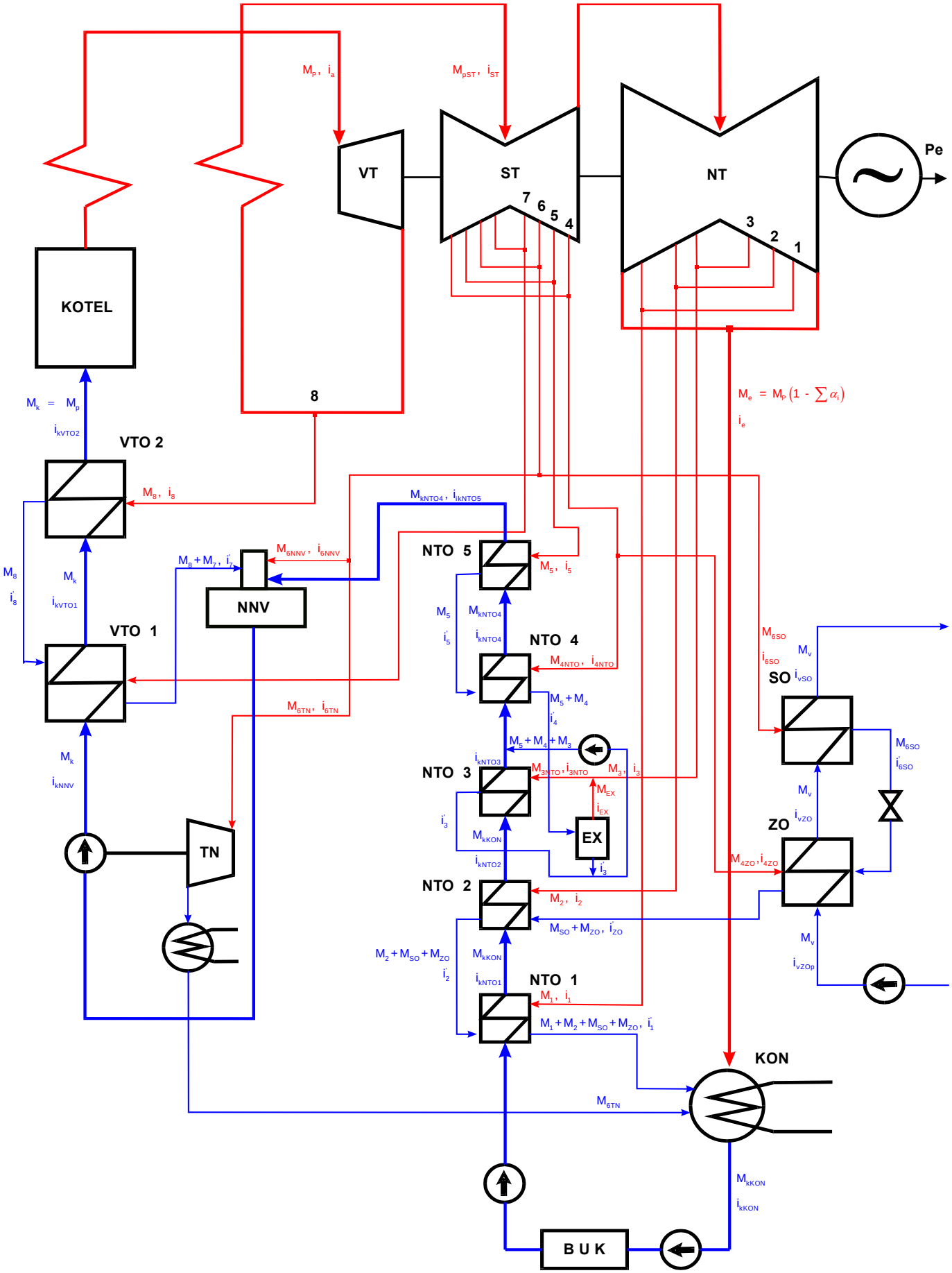
Zásobníky chemikálií pro CHÚV

Vybavení chemické laboratoře.
Rozbor paliva.

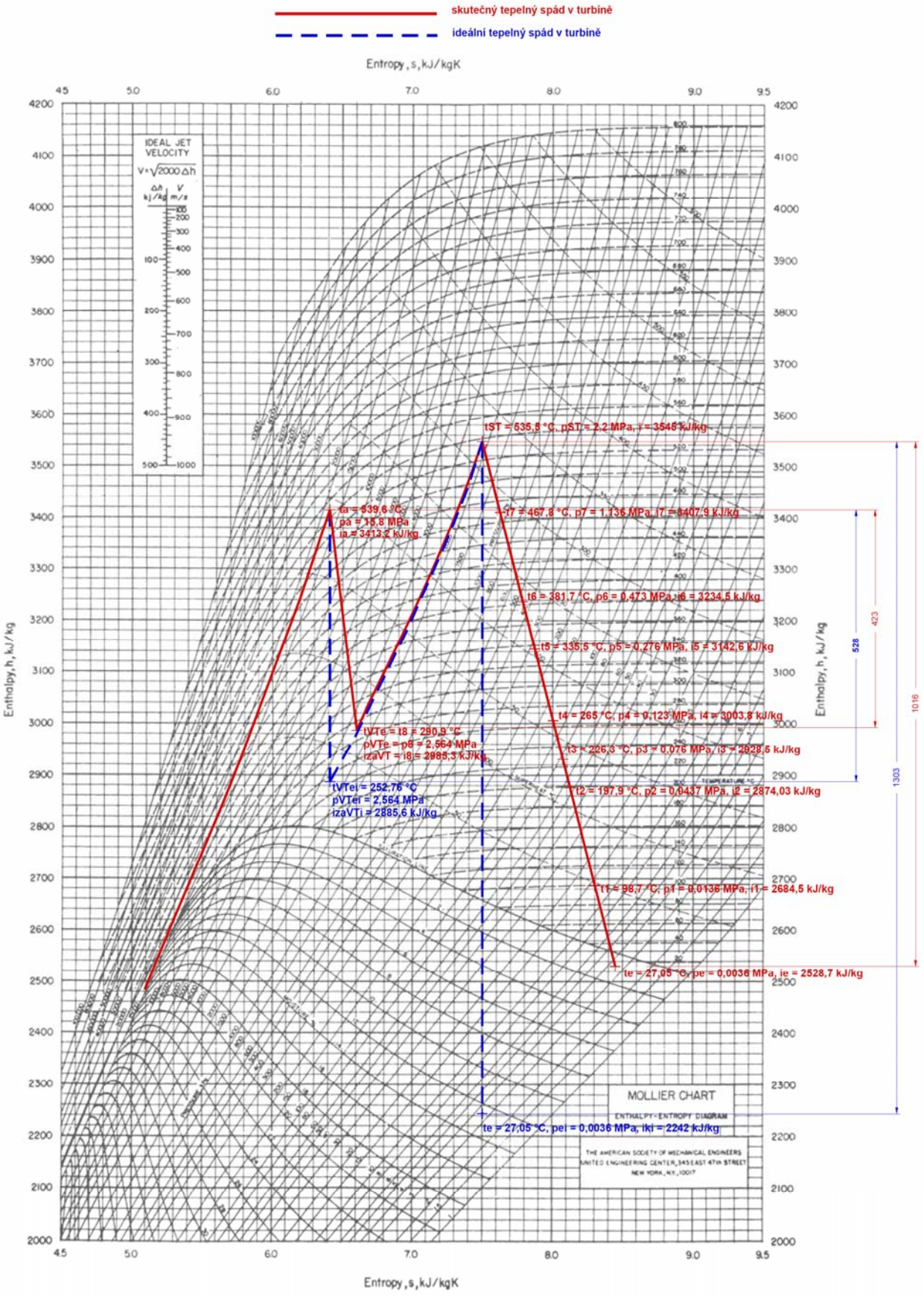
Vybavení chemické laboratoře.
Spektrometr – určí chemické složení látky z barvy roztoku.

TEPELNÝ VÝPOČET 200 MW BLOKU ELETRÁRNY TUŠIMICE II

Zjednodušené tepelné schéma bloku



Průběh tepelného spádu v turbíně v I-S diagramu



Analytický výpočet množství páry Mp z energetických a množstevních bilancí jednotlivých uzlů tepelného oběhu

Pro určení celkového množství páry Mp určíme množství páry v jednotlivých odběrech. Jednotlivé odběry vyjádříme z bilančních rovnic analyticky v poměrných množstvích α k celkovému množství páry Mp.

$$\alpha_i = \frac{M_i}{M_p}$$

Uzel VTO2

$$M_p.i_{kVTO1} + M_8.i_8 = M_p.i_{kVTO2} + M_8.i'_8$$

$$\alpha_8 = \frac{i_{kVTO2} - i_{kVTO1}}{i_8 - i'_8}$$

Uzel VTO1

$$M_p.i_{kNNV} + M_8.i'_8 + M_7.i_7 = M_p.i_{kVTO1} + (M_8 + M_7).i'_7$$

$$\alpha_7 = \frac{i_{kVTO1} - i_{kNNV} + \alpha_8.(i'_7 - i'_8)}{i_7 - i'_7}$$

Uzel NNV

$$(M_p - M_8 - M_7 - M_{6NNV}).i_{kNTO5} + M_{6NNV}.i_{6NNV} + (M_8 + M_7).i'_7 = M_p.i_{kNNV}$$

$$\alpha_{6NNV} = \frac{i_{kNNV} + i_{kNTO5}.(\alpha_8 + \alpha_7 - 1) - i'_7.(\alpha_8 + \alpha_7)}{i_{6NNV} - i_{kNTO5}}$$

Uzel NTO5

$$M_{kNTO4} = M_p - M_8 - M_7 - M_{6NNV}$$

$$\alpha_{kNTO4} = 1 - \alpha_8 - \alpha_7 - \alpha_{6NNV}$$

$$M_5.i_5 + M_{kNTO4}.i_{kNTO4} = M_{kNTO4}.i_{kNTO5} + M_5.i'_5$$

$$\alpha_5 = \frac{\alpha_{kNTO4}.(i_{kNTO5} - i_{kNTO4})}{i_5 - i'_5}$$

Uzel NTO4

$$M_{kNTO4}.i_{kNTO3} + M_{4NTO}.i_{4NTO} + M_5.i'_5 = i'_4.(M_5 + M_{4NTO}) + M_{kNTO4}.i_{kNTO4}$$

$$\alpha_{4NTO} = \frac{\alpha_{kNTO4}.(i_{kNTO4} - i_{kNTO3}) + \alpha_5.(i'_4 - i'_5)}{i_{4NTO} - i'_4}$$

Uzel EX

$$(M_4 + M_5).i'_4 = M_{EX}.i_{EX} + (M_4 + M_5 - M_{EX}).i'_3$$

$$\alpha_{EX} = \frac{(\alpha_{4NTO} + \alpha_5).(i'_4 - i'_3)}{i_{EX} - i'_3}$$

Uzel NTO3

$$M_{3NTO} = M_3 + M_{EX}$$

$$i_{3NTO} = \frac{M_3.i_3 + M_{EX}.i_{EX}}{M_3 + M_{EX}}$$

$$M_{3NTO}.i_{3NTO} + \left(M_{kNTO4} - M_3 - M_{4NTO} - M_5\right).i_{kNTO2} = \left(M_{kNTO4} - M_3 - M_{4NTO} - M_5\right).i_{kNTO3} + M_{3NTO}.i'_3$$

z předchozích tří rovnic

$$\alpha_3 = \frac{\left(\alpha_{kNTO4} - \alpha_{4NTO} - \alpha_5\right).\left(i_{kNTO3} - i_{kNTO2}\right) + \alpha_{EX}.\left(i'_3 - i_{EX}\right)}{i_3 - i_{kNTO2} + i_{kNTO3} - i'_3}$$

Uzel SO

$$M_{6SO}.i_{6SO} + M_v.i_{vZO} = M_v.i_{vSO} + M_{6SO}.i'_{6SO}$$

$$M_{6SO} = \frac{M_v.\left(i_{vSO} - i_{vZO}\right)}{i_{6SO} - i'_{6SO}}$$

Uzel ZO

$$M_{4ZO}.i_{4ZO} + M_{6SO}.i'_{6SO} + M_v.i_{vZOp} = M_v.i_{vZO} + \left(M_{6SO} + M_{4ZO}\right).i'_{ZO}$$

$$M_{4ZO} = \frac{M_{6SO}.\left(i'_{ZO} - i'_{6SO}\right) + M_v.\left(i_{vZO} - i_{vZOp}\right)}{i_{4ZO} - i'_{ZO}}$$

Uzel NTO2

$$\left(M_{kNTO4} - M_3 - M_{4NTO} - M_5\right).i_{kNTO1} + M_2.i_2 + \left(M_{6SO} + M_{4ZO}\right).i'_{ZO} =$$

$$\left(M_{kNTO4} - M_3 - M_{4NTO} - M_5\right).i_{kNTO2} + \left(M_{6SO} + M_{4ZO} + M_2\right).i'_2$$

$$\alpha_{2-1} = \frac{\left(\alpha_{kNTO4} - \alpha_3 - \alpha_{4NTO} - \alpha_5\right).\left(i_{kNTO2} - i_{kNTO1}\right)}{i_2 - i'_2}$$

$$\alpha_{2-2} = \frac{\left(M_{6SO} + M_{4ZO}\right).\left(i'_2 - i'_{ZO}\right)}{i_2 - i'_2} \cdot \frac{1}{M_p}$$

$$\alpha_2 = \alpha_{2-1} + \alpha_{2-2}$$

Uzel NTO1

$$\left(M_{6SO} + M_{4ZO} + M_2\right).i'_2 + M_1.i_1 + \left(M_{kNTO4} - M_3 - M_{4NTO} - M_5\right).i_{kKON} =$$

$$\left(M_{kNTO4} - M_3 - M_{4NTO} - M_5\right).i_{kNTO1} + \left(M_{6SO} + M_{4ZO} + M_2 + M_1\right).i'_1$$

$$\alpha_{1-1} = \frac{\left(\alpha_{kNTO4} - \alpha_3 - \alpha_{4NTO} - \alpha_5\right).\left(i_{kNTO1} - i_{kKON}\right) + \alpha_{2-1}.\left(i'_1 - i'_2\right)}{i_1 - i'_1}$$

$$\alpha_{1-2} = \frac{\left(M_{6SO} + M_{4ZO} + \alpha_{2-2}\right).\left(i'_1 - i'_2\right)}{i_1 - i'_1} \cdot \frac{1}{M_p}$$

$$\alpha_1 = \alpha_{1-1} + \alpha_{1-2}$$

Uzel KON

$$M_e + M_1 + M_2 + M_{4ZO} + M_{6SO} + M_{TN} = M_{kNTO4} - M_3 - M_{4NTO} - M_5$$

$$\alpha_{e-1} = \alpha_{kNTO4} - \alpha_3 - \alpha_{4NTO} - \alpha_5 - \alpha_3 - \alpha_{1-1} - \alpha_{2-1}$$

$$\alpha_{e-2} = \left(- \alpha_{1-2} - \alpha_{2-2} - M_{6SO} - M_{4ZO}\right).\frac{1}{M_p}$$

$$\alpha_e = \alpha_{e-1} + \alpha_{e-2}$$

Výsledná energetická bilance a určení množství páry Mp

Pro zjednodušení zápisu výsledné bilance sloučíme dílčí odběry 4 a 6.

$$\alpha_{4-1} = \alpha_{4NTO}$$

$$\alpha_{4-2} = M_{4ZO}.\frac{1}{M_p}$$

$$\alpha_4 = \alpha_{4-1} + \alpha_{4-2}$$

$$\alpha_{6-1} = \alpha_{6NNV}$$

$$\alpha_{6-2} = \left(M_{6SO} + M_{6TN}\right).\frac{1}{M_p}$$

$$\alpha_6 = \alpha_{6-1} + \alpha_{6-2}$$

Energetická bilance turbíny

$$M_p.i_a + \left(M_p - M_8\right).i_{ST} = M_p.\left(i_8 + \sum_{i=1}^{7}\left(\alpha_i.i_i\right) + \alpha_e.i_e\right) + \frac{3600.P_e}{\eta_m.\eta_g}$$

$$M_p = \frac{\frac{3600.P_e}{\eta_m.\eta_g} + \alpha_{1-2}.i_1 + \alpha_{2-2}.i_2 + \alpha_{4-2}.i_4 + \alpha_{6-2}.i_6 + \alpha_{e-2}.i_e}{i_a + i_{ST} - \alpha_8.i_{ST} - i_8 - \alpha_{1-1}.i_1 - \alpha_{2-1}.i_2 - \alpha_3.i_3 - \alpha_{4-1}.i_4 - \alpha_5.i_5 - \alpha_{6-1}.i_6 - \alpha_7.i_7 - \alpha_{e-1}.i_e}$$

Výpočet s reálnými parametry, výpis výpočtového dokumentu

Pro výpočet s konkrétními parametry jsem využil softwaru MS Excel.

Výpis z výpočtového dokumentu

Zadání			
Elektrické parametry			
Činný výkon	Pe	141,8	MW
Uvažované účinnosti			
Účinnost generátoru	ng	99	%
Mechanická účinnost	nm	98	%
Termodynamická účinnost VT dílu turbíny	ntdVT	81	%
Termodynamická účinnost ST a NT dílu turbíny	ntdSTNT	78	%
Základní parametry páry			
Množství přehřáté páry za kotlem	Mp	436,8	t/h
Admisní tlak	pa	15,8	MPa
Admisní teplota	ta	539,6	°C
Emisní teplota	te	27,05	°C
Teplota páry na vstupu do ST dílu turbíny	tST	535,5	°C
Tlak páry na vstupu do ST dílu turbíny	pST	2,2	MPa
Parametry vody a páry v RO a NNV			
Teplota nap. vody za VTO2	tkVTO2	220,3	°C
Teplota nap. vody za VTO1	tkVTO1	180,5	°C
Teplota nap. vody před VTO1	tkVTO1p	149,7	°C
Teplota nap. vody za NNV	tkNNV	148,5	°C
Teplota páry v 6. odběru před NNV	t6NNV	324,6	°C
Teplota nap. vody za NTO5	tkNTO5	127,7	°C
Teplota nap. vody za NTO4	tkNTO4	102,5	°C
Teplota nap. vody před NTO4	tkNTO4p	89	°C
Teplota kondenzátu a nap. vody za NTO3	tkNTO3	89,1	°C
Teplota nap. vody za NTO2	tkNTO2	75	°C
Teplota nap. vody za NTO1	tkNTO1	48,9	°C
Teplota nap. vody před NTO1	tkNTO1p	35	°C
Parametry vody a páry v tepelných ohřívácích			
Teplota páry v 6. odběru před SO	t6SO	329,2	°C
Tlak páry v 6. odběru před SO	p6SO	0,3	Mpa
Tlak páry před ZO	pZO	0.0078	MPa
Teplota páry před ZO	tZO	219,5	°C
Teplota topné vody před ZO	tvZOp	66,6	°C
Teplota topné vody za ZO	tvZO	90,1	°C
Teplota topné vody za SO	tvSO	130,2	°C
Množství topné vody	Mv	230,4	t/h
Parametry páry Turbonapáječky			
Tlak páry v 6. odběru před TN	p6TN	0,3	MPa
Teplota páry v 6. odběru před TN	t6TN	331,9	°C
Tlak páry v 8. odběru před TN	pTNp8	2,4	MPa
Teplota páry v 8. odběru před TN	tTNp8	225,6	°C
Množství páry pro TN	mpTN	18,8	t/h
Parametry vstřiků			
Množství vstřikované vody do ST	mvstřST	4,4	t/h

Množství vstřikované vody do VT	mvstřVT	30,2	t/h
Parametry vzduchu a spalin			
Teplota vzduchu před vzduchovými ventilátory	tvzVVp	9,8	°C
Teplota spalin za LJ	tspLJ	152,45	°C
Obsah kyslíku ve spalinách		5,5	%
Doplňující údaje			
Teplota chladící vody do KON	tKON	12,7	°C
Rozdíl teplot ohřívací a ohřévané vody v NTO	dtNTO	3	°C
Rozdíl teplot ohřívací a ohřévané vody ve VTO	dtVTO	5	°C
Rozdíl teplot ohřívací a ohřévané vody ve SO, ZO	dtSO = dtZO	3	°C

Řešení [1] - odečtení parametrů tep. schématu z tab. a i-s diag.

Odečtení tlaků v jednotlivých odběrech				
Teplota ohřívacího kondenzátu	[°C]		**Tlak**	**[MPa]**
tkNTO1 + dtNTO	51,9	[tab] ==>	p1 = p1'	0,0136
tkNTO2 + dtNTO	78	[tab] ==>	p2 = p2'	0,0437
tkNTO3 + dtNTO	92,1	[tab] ==>	p3 = p3'	0,0760
tkNTO4 + dtNTO	105,5	[tab] ==>	p4 = p4'	0,1230
tkNTO5 + dtNTO	130,7	[tab] ==>	p5 = p5'	0,2760
			p6TP = p6SOp	0,3000
tkNNV	148,5	[tab] ==>	p6NNVp	0,4730
tkVTO1 + dtVTO	185,5	[tab] ==>	p7 = p7'	1,1360
tkVTO2 + dtVTO	225,3	[tab] ==>	p8 = p8'	2,5640
tkNTO1p	35	[tab] ==>	pk = p6TN	0,0560
tvZO + dtZO	93,1	[tab] ==>	pZO'	0,0789
Odečtení enthalpií v jednotlivých uzlech schématu				
Výchozí veličiny	Hodnoty		**Enthalpie**	**[kJ / kg]**
tkVTO2	220,3	[tab] ==>	ikVTO2	945
tepelný spád v is diagramu		[is] ==>	i8	2985,3
p8	2,5640			
tkVTO2 + dtVTO	225,3	[tab] ==>	i8'	968,2
tkVTO1	180,5	[tab] ==>	ikVTO1	765
tepelný spád v is diagramu		[is] ==>	i7	3407,9
p7	1,1360			
tkVTO1 + dtVTO	185,5	[tab] ==>	i7'	788
tkNNV	148,5	[tab] ==>	ikNNV	626
p6NNVp	0,473	[is] ==>	i6NNV	3116
t6NNVp	324,6			
tkNTO5	127,7	[tab] ==>	ikNTO5	537
tepelný spád v is diagramu		[is] ==>	i5	3142,6
p5	0,276			
tkNTO5 + dtNTO	130,7	[tab] ==>	i5'	549
tkNTO4	102,5	[tab] ==>	ikNTO4	430
tepelný spád v is diagramu		[is] ==>	i4NTO	3004
p4	0,123			
tkNTO4 + dtNTO	105,5	[tab] ==>	i4'	442

tkNTO3	89,1	[tab] ==>	ikNTO3	373
tepelný spád v is diagramu		[is] ==>	i3	2928,5
p3	0,076			
tkNTO3 + dtNTO	92,1	[tab] ==>	i3'	386
Výpočet		rovnice	i3NTO	2909,709
p3	0,076	[tab] ==>	iEX	2663
p3	0,076	[tab] ==>	ikEX	386
tkNTO2	75	[tab] ==>	ikNTO2	314
tepelný spád v is diagramu		[is] ==>	i2	2874
p2	0,0437			
tkNTO2 + dtNTO	78	[tab] ==>	i2'	327
tkNTO1	48,9	[tab] ==>	ikNTO1	205
tepelný spád v is diagramu		[is] ==>	i1	2685
p1	0,0136			
tkNTO1 + dtNTO	51,9	[tab] ==>	i1'	217
t6SOp	329,2	[is] ==>	i6SO	3129
p6SOp	0,3			
tSO + dtSO	133,2	[tab] ==>	i6SO'	560
tvSO	130,2	[tab] ==>	ivSO	547,2
pZOp	0.0078	[is] ==>	i4ZO	2914
tZOp	219,5			
pZOp => tZO	293,2	[tab] ==>	iZO'	388,8
tvZO	90,1	[tab] ==>	ivZO	377,4
tvZOp	66,6	[tab] ==>	ivZOp	278,8
p6TN	0,3	[is] ==>	i6TN	3134,8
t6TN	331,9			
pa	15,8	[is] ==>	ia	3413,2
ta	539,6			
tst	535,5	[is] ==>	ist	3545
pst	2,2			
p4	0,1230	[is] ==>	i4	3003,8
tepelný spád v is diagramu				
p6NNV	0,4730	[is] ==>	i6	3234,5
tepelný spád v is diagramu				
te	27,05	[is] ==>	ie	2528,7
tepelný spád v is diagramu				
tkNTO1p	35	[tab] ==>	ikKON	146,6

Řešení [2] - Bilanční rovnice uzlů tep. schématu				
Uzel VTO2				
Poměrné množství páry odběru č. 8	a8	0,089237		[-]
Uzel VTO1				
Poměrné množství páry odběru č. 7	a7	0,046918		[-]
Uzel NNV				
Poměrné množství páry odběru č. 6_NNV	a6NNV	0,021258		[-]
Poměrné množství kondenzátu za NTO4	akNTO4	0,842587		[-]
Uzel NTO5				
Poměrné množství páry v odběru č. 5	a5	0,034761		[-]
Uzel NTO4				
Poměrné množství páry v odběru č. 4	a4NTO	0,017294		[-]
Uzel EX				
Poměrné množství páry z expandéru	aEX	0,00128		[-]
Poměrné množství kondenzátu z expandéru	akEX	0,050775		[-]
Uzel NTO3				
Poměrné množství páry v odběru 3	a03	0,016808		[-]
Uzel SO				
Množství páry v odběru č. 6 do SO	M06SO	15,22846		t/h
Uzel ZO				
Množství páry v odběru č. 4 do ZO	M04ZO	7,963855		t/h
Uzel NTO2				
Poměrné množství páry v odběru č. 2	a2	0,033112	+ -0,562731/Mp	[-]
Uzel NTO1				
Poměrné množství páry v odběru č. 1	a1	0,016833	+ -1,008611/Mp	[-]
Odběr 6				
Suma poměrných množství odběru 6	a6	0,021258	+ 34,028461/Mp	[-]
Odběr 4				
Suma poměrných množství odběru 4	a4	0,017294	+ 7,9638551/Mp	[-]
Uzel KON				
Poměrné množství kondenzátu z turbíny	ae	0,723779	+ -40,4211/Mp	[-]
VÝSLEDNÉ MNOŽSTVÍ PÁRY				
Čitatel Mp	Mpč	553608,5		
Jmenovatel Mp	Mpj	1246,914		
Množství páry	**Mp**	**443,9831**		**t/h**
Odchylka oproti měřené hodnotě v zadání	dMp	1,64		%

Zhodnocení výsledku, porovnání vypočteného množství páry se skutečnou hodnotou

Skutečné množství Mp je dle zadání 436,8 t/h. Vypočtené množství je **444 t/h.** Chyba výpočtu 1,64 % může být zapříčiněna nepřesnými čidly, především čidly měřící množství páry a ztrátami. K získání entalpií jsem využil software společnosti ČEZ, který pracuje se zanedbatelnou chybou.

KOREKCE SPOTŘEBNÍ CHARAKTERISTIKY BLOKU 200 MW

Vztahy pro korekční charakteristiku

Reálná základní spotřební charakteristika bloku:

$$\mathbf{Q_Z = 23{,}556 + 0{,}101\ P + 7{,}012\ .10^{-4}\ P^2} \qquad \text{[tmp/h]}$$

Skutečná spotřební charakteristika bloku:

$$\mathbf{Q_S = (S^{do}_{pals} + \sum_{i=1}^{10} k_i) \cdot \frac{P}{k_{eS}} (1 + k_{eS} - k_{eZ})} \qquad \text{[tmp/h]}$$

- spotřebované množství tepla na dodaný výkon do sítě

$$S^{do}_{pals} = 0{,}61489 - 0{,}00246\ P + 6{,}3125.10^{-6}\ P^2 \qquad [-]$$

$\mathbf{k_{eS}}$ - koeficient vlastní spotřeby - skutečný

$k_{eS} = 1 + p_{vs}$ (p_{vs} - vlastní spotřeba bloku)

$\mathbf{k_{eZ}}$ - koeficient vlastní spotřeby - základní

$k_{eZ} = 1{,}125 - 5{,}2286.10^{-4}\ P + 1{,}083.10^{-6}\ P^2$

$\mathbf{k_i}$ - korekční činitelé mající největší vliv na změnu spotřební charakteristiky

1. $\mathbf{k_1}$ - respektuje vliv změny tlaku páry do VT dílu turbíny

$k_1 = 0{,}000115.(16{,}18 - p_{1S})$

$$p_{1S} = \frac{p_{1P} + p_{1L}}{2}$$

2. $\mathbf{k_2}$ - respektuje vliv změny teploty vstupní páry do VT dílu

$k_2 = 0{,}00015.(540 - t_{1S})$

$$t_{1S} = \frac{t_{1P} + t_{1L}}{2}$$

3. $\mathbf{k_3}$ - respektuje vliv změny teploty přihřáté páry

$k_3 = 0{,}0001.(540 - t_{2S})$

$$t_{2S} = \frac{t_{2P} + t_{2L}}{2}$$

4. $\mathbf{k_4}$ - respektuje změnu množství vstřikované vody do přihřáté páry

$k_4 = q_Z .(M_S - M_Z)$

$q_Z = 0{,}000371 - 0{,}0000013\ P$

$M_Z = -19 + 0{,}15\ P$

$\mathbf{q_Z}$ - součinitel udávající množství vstřikované vody na 1 t/h

$\mathbf{M_S}$ - množství vstřikované vody do páry - skutečné

$\mathbf{M_Z}$ - množství vstřikované vody do páry – základní

5. $\mathbf{k_5}$ - respektuje změnu teploty emisní páry (na výstupu z NT dílu turbíny)

$$k_5 = - 1{,}283.10^{-4} + 1{,}136.10^{-3} (\Delta t_e) + 1{,}127.10^{-5} (\Delta t_e)^2$$

$$\Delta t_e = t_{eS} - t_{eZ}$$

$$t_{eS} = \frac{t_{eP} + t_{eL}}{2}$$

$$t_{eZ} = 22{,}4676 + 0{,}06666\ P$$

6. $\mathbf{k_6}$ - respektuje změnu teploty napájecí vody

$$k_6 = -5{,}857.10^{-4} - 2\ .10^{-4} (\Delta t_{nv}) - 6{,}31.10^{-7} (\Delta t_{nv})^2$$

$$\Delta t_{nv} = t_{nvS} - t_{nvZ}$$

$$t_{nvZ} = 191{,}3 + 0{,}283\ P$$

7. $\mathbf{k_7}$ - respektuje změnu teploty nasávaného vzduchu

$$k_7 = - 0{,}00025.(t_{vzS} - 20)$$

$$t_{vzS} = \frac{t_{vzP} + t_{vzL}}{2}$$

8. $\mathbf{k_8}$ - respektuje změnu teploty kouřových plynů

$$k_8 = 0{,}00025.(t_{spS} - t_{spZ})$$

$$t_{spZ} = 177 - 0{,}336\ P + 0{,}00143\ P^2$$

$$t_{spS} = \frac{t_{spP} + t_{spL}}{2}$$

9. $\mathbf{k_9}$ - respektuje změnu obsahu kyslíku ve spalinách

$$k_9 = -1{,}9.10^{-4} + 1{,}757.10^{-3} (\Delta O_2) + 1{,}774\ .10^{-4} (\Delta O_2)^2$$

$$\Delta O_2 = O_{2S} - O_{2Z}$$

$$O_{2Z} = 5{,}5\ \% = 0{,}055$$

10. $\mathbf{k_{10}}$ - respektuje změnu procentního nedopalu ve škváře

$$k_{10} = -4{,}021.10^{-5} + 4{,}229.10^{-4}\ \Delta S + 6{,}671\ .10^{-6}\ \Delta S^2$$

$$\Delta S = S_S - S_Z$$

$$S_Z = 93{,}428 - 0{,}776\ P + 0{,}0019\ P^2$$

Pro výpočet potřebujeme tyto naměřené hodnoty:

P - výkon na svorkách generátoru		[MW]
$\mathbf{p_{1L}}$, $\mathbf{p_{1P}}$	- tlak páry do VTTG L a P	[MPa]
$\mathbf{t_{1L}}$, $\mathbf{t_{1P}}$	- teplota páry do VTTG L a P	[^{O}C]
$\mathbf{t_{2L}}$, $\mathbf{t_{2P}}$	- teplota páry do STTG L a P	[^{O}C]
$\mathbf{M_S}$	- množství vstřikované vody do VS 4	[t/h]
$\mathbf{t_{eL}}$, $\mathbf{t_{eP}}$	- teplota páry za NTTG L a P	[^{O}C]
$\mathbf{t_{nvS}}$	- teplota vody před EKO	[^{O}C]
$\mathbf{t_{vzL}}$, $\mathbf{t_{vzP}}$	- teplota vzduchu před VV L a P	[^{O}C]
$\mathbf{t_{spL}}$, $\mathbf{t_{spP}}$	- teplota spalin za Ljungstremy L a P	[^{O}C]
$\mathbf{O_{2S}}$	- obsah kyslíku ve spalinách	[%]
$\mathbf{S_S}$	- procentní obsah nedopalu ve škváře (CHÚV)	[%]
$\mathbf{P_{vs}}$	- vlastní spotřeba bloku (odečet na elektroměrech v dozorně)	[MW]

Výpočet korekční charakteristiky

Hodnoty potřebné pro korekci

Tlak páry do VT dílu TG (L,P)	15,8 Mpa
Teplota páry do VT dílu TG (L,P)	539,6 °C
Teplota páry do ST dílu TG (L,P)	535,6 °C
Množství vstřikované vody do ST	4,4 t/h
Teplota emisní páry	27,05 °C
Teplota nap. vody před koltem	220,3 °C
Teplota vzduchu před koltem (L,P)	9,8 °C
Teplota spalin za Lunstremy (L,P)	154,3 °C a 150,6°C
Obsah kyslíku ve spalinách	5,5 %
Obsah nedopalu ve spalinách	8 %
Vlastní spotřeba bloku	9 %

Výpočet jsem provedl v programu Matlab v. 7 R14

Výpis zdrojového kódu

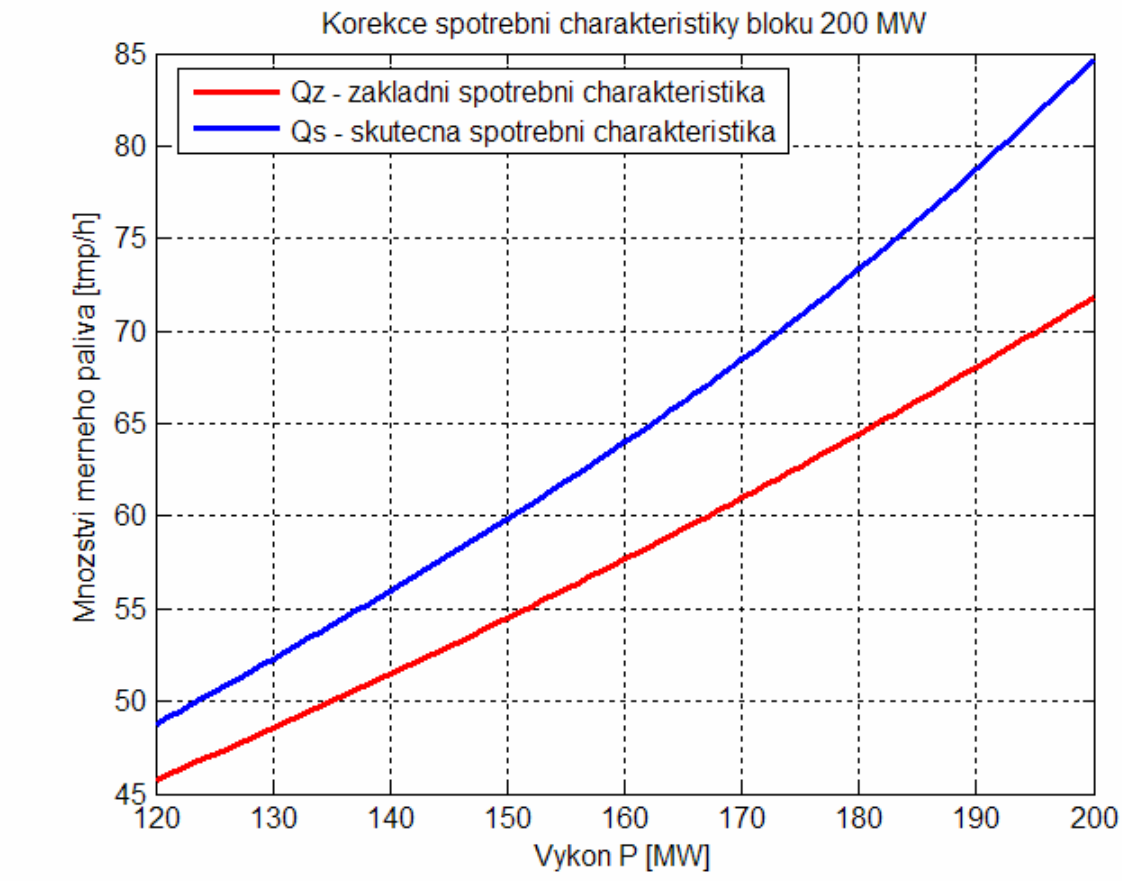
```
%Script pro vypocet korekcni charakteristiky 1 200MW bloku tepelne
%elektrarny Tusimice
clear;
clc;
%Potrebne parametry
p1L = 15.8;                         % Tlak pary do VT (MPa)
p1P = 15.8;
t1L = 539.6;                        % Teplota pary do VT (C)
t1P = 539.6;
t2L = 535.5;                        % Teplota pary do ST (C)
t2P = 535.5;
Ms  = 4.4;                          % Mnozstvi vstrikovane vody do ST (t/h)
teL = 27.05;                        % Teplota emisni pary (C)
teP = 27.05;
tnvS = 220.3;                       % Teplota napajeci vody pred kotlem (C)
tvzL = 9.8;                         % Teplota vzduchu pred kotlem (C)
tvzP = 9.8;
tspL = 154.3;                       % Teplota spalin za lungstremy (C)
tspP = 150.6;
O2S = 5.5;                          % Obsah kysliku ve spalinach (%)
Ss  = 8;                            % Procento nedopalu ve spalinach (%)
pVS = 9;                            % Vlastni spotreba bloku (%)
%Vypocet zakladni a skutecne spotrebni charakteristiky, vypoctove koeficienty

Pstart = 120;
Pend   = 200;
P = Pstart;
i = 1;
while P <= Pend
    kes = 1 + pVS/100;
    kez = 1.125 - 5.2286E-4*P + 1.083E-6*P^2;
    k(1) = 0.000115*(16.18-(p1P+p1L)/2);
    k(2) = 0.000115*(540-(t1P+t1L)/2);
    k(3) = 0.0001*(540-(t2P+t2L)/2);
    k(4) = (0.000371 - 0.0000013*P)*(Ms + 19 - 0.15*P);
    dte = (teP+teL)/2-22.4676 - 0.066666*P;
    k(5) = -1.283E-4 + 1.136E-3*dte + 1.127E-5*dte^2;
    dtnv = tnvS - 191.3 - 0.283*P;
    k(6) = -5.857E-4 - 2E-4*dtnv - 6.31E-7*dtnv^2;
    k(7) = -0.00025*((tvzP+tvzL)/2 - 20);
    k(8) = 0.00025*((tspP+tspL)/2 - 177 + 0.336*P - 0.00143*P^2);
    dO2 = O2S/100 - 0.055;
    k(9) = -1.9E-4 + 1.757E-3*dO2 + 1.774E-4*dO2^2;
    dS = Ss - 93.428 + 0.0776*P - 0.0019*P^2;
    k(10) = -4.021E-5 + 4.229E-4*dS + 6.671E-6*dS^2;

    Sdp = 0.61489 - 0.00246*P + 6.3125E-6*P^2;
    Qz(i) = 23.556 + 0.101*P + 7.012E-4*P^2;
    Qs(i) = (Sdp + sum(k))*P/kes*(1 + kes - kez);

    P = P + 1;
    i = i + 1;
end
%Vykresleni charakteristiky
plot(Pstart:Pend,Qz,'r',Pstart:Pend,Qs,'b','Linewidth',2);
xlabel('Vykon P [MW]');
ylabel('Mnozstvi merneho paliva [tmp/h]');
legend('Qz - zakladni spotrebni charakteristika','Qs - skutecna spotrebni charakteristika',2);
title('Korekce spotrebni charakteristiky bloku 200 MW')
grid on;
```

Výsledná korekční charakteristika 200 MW bloku elektrárny Tušimice II



Poznámka: výhřevnost měrného paliva je 29 300 kJ / kg