

# Použití pokročilých metod k vyhodnocování tepelné výkonnosti jaderné elektrárny

Jiří Pliska, Jaroslav Rubek

Prvořadým požadavkem při provozování jaderné elektrárny je zajistit jadernou bezpečnost. Po splnění této podmínky je dalším důležitým úkolem docílit optimální hospodárnosti provozu. Jedním ze způsobů, jak tohoto cíle dosáhnout, je zajistit takové provozní podmínky, při nichž je účinnost transformace tepelné energie na mechanickou práci co nejlépe maximální aktuálně dosažitelné hodnotě. Platí, že maximální aktuálně dosažitelná tepelná účinnost závisí na režimu provozu elektrárny a stavu jejího okolního prostředí, jako je např. teplota vzduchu. Optimalizace provozu je činnost, kterou se provozovatelé elektráren zabývají v praxi dlouhodobě, po celou dobu provozního života výrobního zařízení. Tento článek prezentuje použití nových metod určených k dosažení lepších hodnot výkonnostních parametrů elektrárenských bloků v porovnání s hodnotami, kterých bylo možné dosáhnout dosavadními metodami.

Článek navazuje na [1], [2], [3] a popisuje tzv. *Systém monitorování a hodnocení tepelné výkonnosti bloku JE Dukovany*.

## 1. Tepelná výkonnost

### 1.1 Tepelná účinnost

V tepelných elektrárnách se tepelná energie na mechanickou práci přeměňuje při použití parního Rankinova-Clausiova cyklu, který je realizován zařízeními sekundárního okruhu.

V jaderných elektrárnách je používán parní cyklus se sytou párou na výstupu z parogenerátorů, s přihříváním mokré páry mezi vysokotlakým a nízkotlakým dílem parní turbíny a s několikastupňovou regenerací napájecí vody. Typický tepelný cyklus jaderné elektrárny je ukázán na obr. 1.

Kvalita transformace energie – tepelná účinnost – je definována jako poměr mezi mechanickou prací na hřídeli parní turbíny a teplem přivedeným do sekundárního okruhu jaderné elektrárny. V praxi se často používá převrácená hodnota tepelné účinnosti, kterou je měrná spotřeba tepla.

### 1.2 Určování tepelné účinnosti

Tepelná výkonnost bloku jaderné elektrárny se měří a vyhodnocuje s cílem určit aktuální hodnotu tepelné účinnosti parního cyklu a porovnat ji s hodnotou, která je za daných podmínek dosažitelná. Řešení tedy obsahuje dvě základní úlohy:

- určení aktuální hodnoty tepelné účinnosti parního cyklu výpočtem z naměřených hodnot,
- porovnání takto zjištěné hodnoty tepelné účinnosti s její etalonovou hodnotou (etalonem).

Jednotlivé metody používané v současné době se vzájemně odlišují způsobem re-

alizace uvedených úloh, tj. podle toho, zda se v principu opírají o:

- a) zajištění specifických podmínek provozu,
- b) zajištění dodatečného a přesnějšího měření,
- c) způsob zpracování naměřených údajů, např. použití metody vyrovnání naměřených hodnot (dat),
- d) způsob určení etalonové hodnoty.

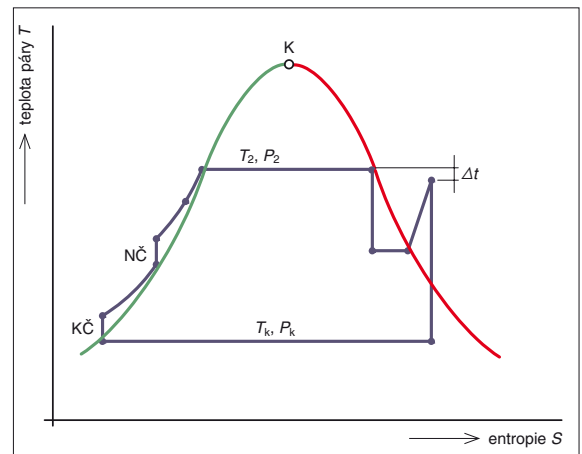
Použití *specifických definovaných podmínek provozu* – shora ad a) – na jedné straně zvyšuje přesnost určení aktuální tepelné účinnosti tím, že jsou eliminovány určité vedlejší vlivy. Na straně druhé však obsahuje přísné požadavky na provozní režim v době určování tepelné výkonnosti. Takto se např. postupuje při garančních a referenčních měřeních.

Použití *dodatečných a přesnějších měření* – ad 2) – souvisí s garančními a referenčními měřeními, v jejichž rámci jsou dočasně nainstalovány přesnější (a tedy dražší) snímače a rovněž se měří i v takových místech sekundárního okruhu, která za standardního provozu zařízení nejsou osazena snímači. Tato metoda umožňuje přesněji určit aktuální tepelnou účinnost, přičemž její omezení je zřejmé – je použitelná pouze po tu dobu, po kterou jsou nainstalovány dodatečné snímače.

Podstata *metody vyrovnání dat* – ad 3) – a její přednosti jsou popsány ve [2]. Tato

metoda se v současné době stává standardem používaným v jaderných elektrárnách v zahraničí i v ČR k vyhodnocování naměřených hodnot pro bilanční účely.

Ovšem teprve *porovnáním měřením určené hodnoty tepelné účinnosti s etalonem* – ad d) – dává odpověď na otázku o kvalitě provozu a stavu jednotlivých zařízení sekundárního okruhu (v článku dále označovaných jako *tepelný cyklus parní turbíny*) a o případných rezervách a možnostech jejich využití, a tedy optimalizaci provozu. Klíčové postavení přitom má způsob určení *etalonové hodnoty*

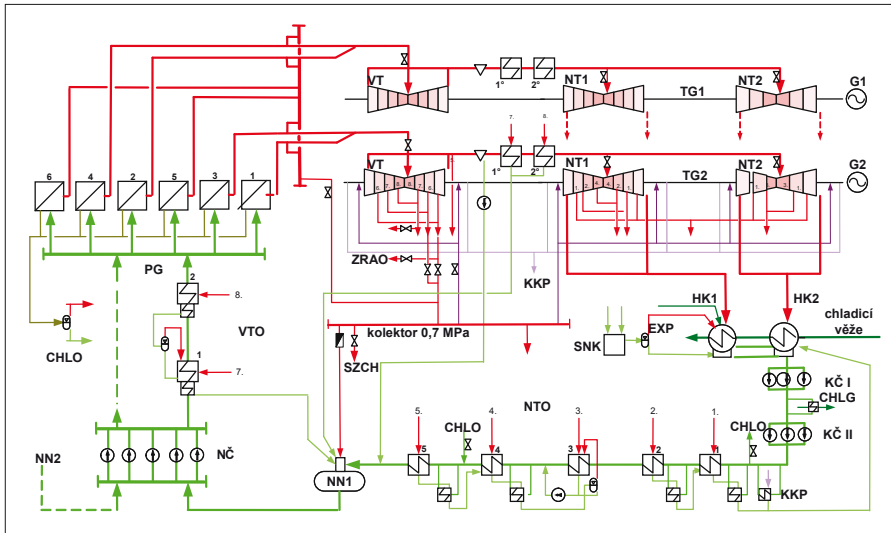


Obr. 1. Rankinův-Clausiovův cyklus jaderné elektrárny ( $T_2, P_2$  – teplota varu, popř. tlak v parogenerátoru;  $T_{kr}, P_{kr}$  – teplota kondenzace, popř. tlak v kondenzátoru;  $\Delta t$  – rozdíl teplot;  $KČ$  – čerpadlo kondenzátu;  $NČ$  – napájecí čerpadlo;  $K$  – kritický bod)

ty, kterou může být buď hodnota stanovená v projektu (popř. korigovaná na aktuální podmínky provozu použitím korekčních křivek, obvykle dodaných výrobcem), nebo hodnota aktuálně vypočítaná (tepelná účinnost dosažitelná při aktuálních provozních podmínkách určená při použití *simulačního modelu*).

## 2. Popis technologického zařízení JE Dukovany

Technologické zařízení JE Dukovany se skládá z jaderného reaktoru a šesti chladicích smyček se šesti parogenerátory, které vyrábějí sytou páru pro dvě identické parní turbíny, každou o projektovaném elektrickém výkonu 220 MW, jak ukazuje obr. 2 (v současné



Obr. 2. Tepelný cyklus parní turbíny v JE Dukovany (EXP – expandér, G – generátor, CHLG – chladič generátoru, CHLO – chladič odluhů, KKP – kondenzátor komínkové páry, PG – parogenerátor, SNK – sběrná nádrž kondenzátu, SZCH – stanice zdroje chladu, TG – turbogenerátor, ZRAO – zpracování radioaktivních odpadů)

době se realizuje projekt zvyšování výkonu a dosahovaný výkon je vyšší).

Tepelný cyklus každé parní turbíny společně vytvářejí tato základní zařízení:

- vysokotlaký díl parní turbíny VT,
- separátor a dvoustupňový přehříváč páry,
- dva nízkotlaké díly parní turbíny NT1 a NT2,
- dvoukomorový kondenzátor HK1 a HK2,
- dvoustupňová čerpadla kondenzátu KČ I a KČ II,
- nízkotlaký ohřívák NTO1, 2, 3, 4, 5,
- napájecí nádrž NN,
- napájecí čerpadla NČ,
- vysokotlaký ohřívák VTO1, 2.

Složitost celého tepelného cyklu, skládajícího se ze dvou tepelných cyklů obou parních turbín, spočívá v tom, že parní cykly turbín jsou na několika místech propojeny na vodní i parní straně, a že tato propojení nejsou osazena měřicími obvody. Nízkotlaké díly turbíny NT1 a NT2 jsou navíc propojeny v místě neregulovaných odběrů páry I.

### 3. Motivace k použití Systému monitorování a hodnocení tepelné výkonnosti bloku JE Dukovany

Jaderná elektrárna v Dukovanech s reaktory typu VVER 440 patří k nejlépe provozovaným elektrárnám ve světě. Díky velkému výkonu vede však i velmi malý nárůst tepelné účinnosti k významnému nárůstu elektrického výkonu v řádu jednotek megawattů.

Motivací k použití Systému monitorování a hodnocení tepelné výkonnosti bloku JE Dukovany (dále jen systém) je záměr získávat v téměř reálném čase informace o kvalitě provozu a stavu zařízení a o vývoji těchto ukazatelů v čase a využívat tyto informace k:

- diagnostice provozu a na základě jejich výsledků k návrhům jeho korekcí s cílem trvale dosahovat ekonomického optima,

- diagnostice zařízení a na základě jejich výsledků k přípravě opatření cílených na snížení nákladů na údržbu,
- tvorbě podkladů pro projekty modifikací zařízení a ověřování efektivity těchto modifikací,
- diagnostice měřicí techniky s cílem zvýšit její přesnost a zjišťovat vadné snímače (čidla).

Diagnostika zařízení, měřících řetězců a zvýšení přesnosti měření současně souvisí s problematikou zajištění jaderné bezpečnosti elektrárny.

## 4. Funkce systému

### 4.1 Systém jako celek

Funkce obsažené v systému jako celek řeší již uvedené dvě základní úlohy:

- určují aktuální hodnotu tepelné účinnosti z naměřených hodnot,
- porovnávají takto zjištěnou hodnotu tepelné účinnosti s etalonovou hodnotou a vyhodnocují zjištěné rozdíly.

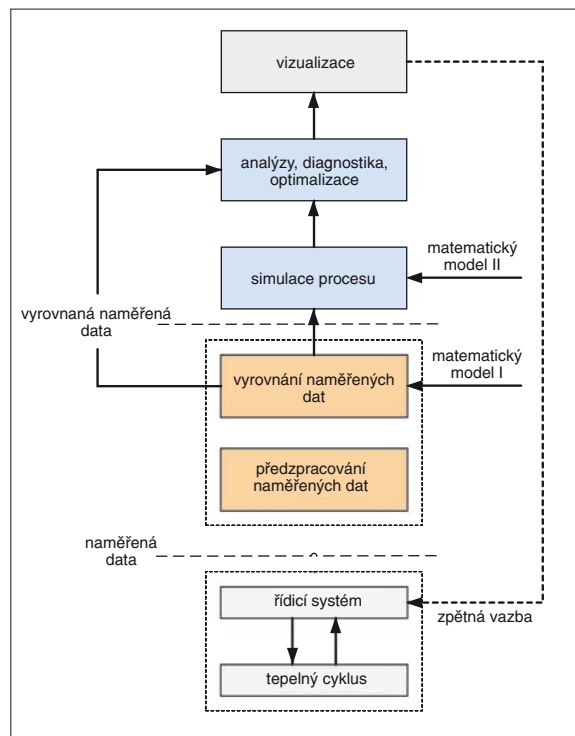
S odkazem na informace uvedené v kap. 1.2 lze metodu použitou v systému charakterizovat takto:

1. Určení aktuální hodnoty tepelné účinnosti je založeno na použití dat získaných standardními snímači a jejich vyrovnání. Lze ji tudíž určovat v reálném, resp. v téměř reálném čase.

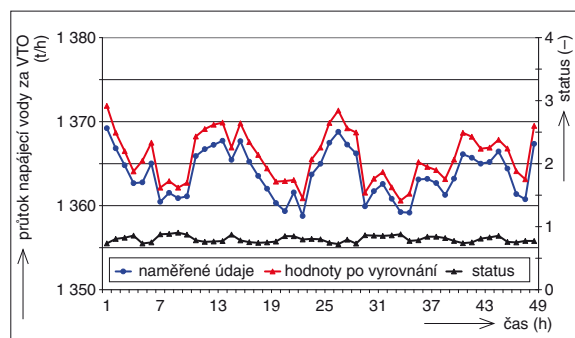
2. Etalonová hodnota je určována s použitím simulačního modelu umožňujícího počítat etalonovou hodnotu se zahrnutím vlivu jak aktuálního provozního režimu technologického zařízení jaderné elektrárny, tak i aktuálního stavu okolí tepelného cyklu parní turbíny. Aktuální provozní režim technologického zařízení i aktuální stav okolí jsou potom určovány z naměřených hodnot po jejich vyrovnání.

Systém tedy dovoluje sledovat a vyhodnocovat tepelnou výkonnost bez nutnosti instalovat dodatečné měřicí řetězce či zajišťovat specifické provozní podmínky a současně v téměř reálném čase získávat cenné informace pro diagnostiku a optimalizaci provozu i pro diagnostiku stavu zařízení, včetně diagnostiky měřících řetězců a zvýšení přesnosti měření.

Daný systém lze použít za předpokladu, že technologický proces jaderné elektrárny se nachází v ustáleném stavu. Vzhledem



Obr. 3. Funkční diagram systému hodnocení tepelné výkonnosti bloku jaderné elektrárny



Obr. 4. Vyrovnání naměřených hodnot a status vyrovnání

k tomu, že jaderná elektrárna pracuje převážně v základním zatížení při jmenovitém výkonu, je tento předpoklad ve většině případů splněn. Na obr. 3 je funkční schéma systému a v dalším textu jsou podrobněji popsány některé jeho vybrané funkce.

#### 4.2 Předzpracování naměřených údajů

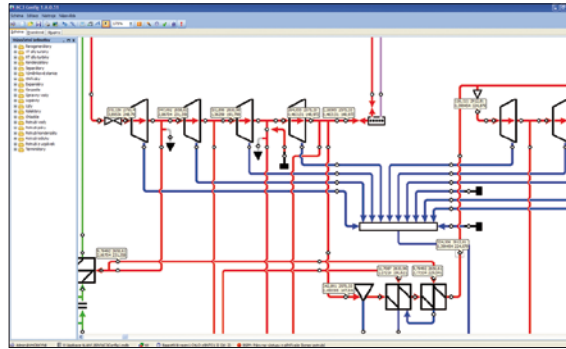
Předzpracování naměřených údajů spočívá v provedení příslušných korekcí a výpočtu průměrné hodnoty měřené veličiny ve zvoleném časovém intervalu.

Korigují se především údaje o průtoku měřeného média na jeho stav, tj. teplotu a tlak. Tyto korekce zahrnují i vliv stavu měřeného média na materiálové a geometrické charakteristiky měřicího prvku.

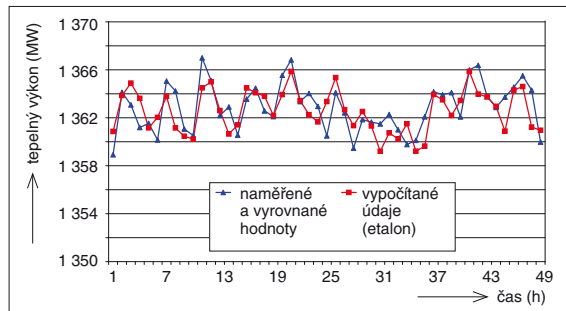
Výpočet průměrné hodnoty měřené veličiny ve zvoleném časovém intervalu je určen k omezení vlivu náhodných chyb v naměřených údajích.

#### 4.3 Vyrovnání naměřených hodnot

Cílem vyrovnání naměřených hodnot je zvýšit přesnost měření a eliminovat naměřená data zatížená hrubými chybami. Metoda vyrovnání naměřených hodnot je založena na jejich korekci tak, aby platily bilanční rovnice hmoty a energie a současně vážený součet čtverců odchylek naměřených údajů



Obr. 5. Příklad zobrazení v grafickém editoru simulačního modelu



Obr. 6. Naměřená a vypočítaná (etalonová) průběh tepelného výkonu parogenerátoru

od vyrovnané hodnoty byl minimální (matematický model I v obr. 3).

Pro JE Dukovany byl vyvinut matematický model zahrnující tepelné cykly obou parních turbín, který obsahuje:

- 139 uzlů,
- 320 proudů,
- 208 měřených hodnot,
- 277 neměřených hodnot.

Po představu je na obr. 4 ukázán průběh průtočného množství napájecí vody za vysokotlakým regenerátorem – hodnota mě-

řená, hodnota vyrovnaná a hodnota statusu vyrovnání vyjadřující pravděpodobnost výskytu hrubé chyby v celém souboru naměřených hodnot (hodnota statusu menší než 1 znamená, že v souboru měření není obsažena hrubá chyba). Více informací o problematice vyrovnání naměřených hodnot poskytuje např. [2].

#### 4.4 Simulační model

Simulační model se využívá k výpočtu etalonové hodnoty. Zahrnuje aktuální provozní režim technologického zařízení jaderné elektrárny a aktuální stav okolí tepelného cyklu parní turbíny. Simulační model tak nahrazuje dosavadní korekční křivky a tabulky výrobce používané pro určení etalonu.

Etalonem je především za daných podmínek dosažitelná (očekávaná) tepelná účinnost cyklu, která má globální význam a charakterizuje tepelný cyklus jako celek.

Pro podrobnější analýzy a pro diagnostické účely jsou jako součást výpočtu etalonu s použitím simulačního modelu vypočítány hodnoty:

- stavu pracovního média voda-pára ve zvolených místech tepelného cyklu parní turbíny (tj. teplota, tlak, průtok, entalpie a popř. vlhkost páry),
- klíčových ukazatelů indikujících výkonost jednotlivých zařízení.

Simulační model technologického zařízení je sestaven z dílčích matematických modelů se soustředěnými parametry vytvořených pro jednotlivé komponenty a tzv. výpočetních jednotek, které popisují fyzikální děje probíhající v jednotlivých zařízeních.

Jednotlivé výpočetní jednotky jsou tvořeny soustavami algebraických rovnic sestavenými s použitím prvního zákona termodynamiky a dalších termodynamických rovnic pro konkrétní podmínky. Konstantní parametry, které jsou součástí algebraických rovnic, jsou podle povahy určeny na základě údajů obsažených v projektu elektrárny, údajů od výrobce zařízení anebo na základě hodnot naměřených na zařízení.

Základní výpočetní jednotky použité v simulačním modelu technologického zařízení JE Dukovany jsou uvedeny v tab. 1.

Celý tepelný cyklus obou parních turbín je vytvořen s použitím grafického editoru (obr. 5). Výpočet celého tepelného cyklu je prováděn iterační metodou. Okrajové podmínky jsou určeny z vyrovnaných naměřených hodnot.

Na obr. 6 je ukázán časový průběh tepelného výkonu parogenerátoru určený z naměřených a vyrovnaných hodnot a současně průběh těžé veličiny, jak ji počítá simulační model (tj. etalonová hodnota). Výpočet byl prováděn v režimu „od elektrického generátoru k parogenerátoru“. Rozdíly mezi výkonem určeným na základě měření a vypočítanou etalonovou hodnotou se nacházejí v rozmezí 0,2 až 0,4 % jmenovité maximální hodnoty,

Tab. 1. Základní výpočetní jednotky použité v simulačním modelu

Typ zařízení	Zařízení	Matematický popis (příklad klíčového ukazatele výkonnosti)
turbína	turbínový prvek	Stodolova rovnice (výkon, průtočné množství, entalpie)
	nízkotlaký díl	
	vysokotlaký díl	
výměník tepla	kondenzátor	standard HEI (koeficient průstupu tepla, předané teplo, koncový rozdíl teplot)
	obecný	hmotová a energetická bilance (koeficient průstupu tepla, předané teplo, koncový rozdíl teplot)
	nízkotlaký ohřívák 1, 2, 3, 4, 5	
	vysokotlaký ohřívák 1, 2	
napájecí nádrž	hmotová a energetická bilance (předané teplo, průtočné množství páry)	
čerpadlo	kondenzátní čerpadlo, napájecí čerpadlo	charakteristika průtok – dopravní výška
rozdělovač	expandér	hmotová a energetická bilance
parogenerátor	-	
okrajové podmínky	teplo přiváděné do cyklu	vyrovnané naměřené hodnoty, údaje z projektu
	tlak admisní páry	
	pára a voda odváděné mimo cyklus	
	teplota chladicí vody	
	voda doplňovaná do cyklu	
ztráty páry a vody		

což v současné době představuje dosaženou přesnost simulačního modelu.

#### 4.5 Vizualizace, analýzy, diagnostika

Pro analýzy a diagnostiku procesu a zařízení byl vytvořen soubor zobrazení uspořádaných do tří úrovní podrobnosti. První úroveň je přehledová, třetí úroveň obsahuje informace potřebné pro podrobnou diagnostiku. Příklad zobrazení druhé úrovně je na obr. 7, třetí úroveň na obr. 8.

Systém pro hodnocení výkonnosti bloku JE Dukovany je integrován do celoelektrárenského technologického informačního systému a nabízí tři režimy práce:

- režim *on-line* pro výpočet tepelné účinnosti a její etalonové hodnoty v téměř reálném čase,
- režim *přepočet* určený pro zpětnou korekci výpočtů při výskytu hrubé chyby měření,
- režim *lokální* pro provádění analýz, diagnostiky a optimalizace.

#### 5. Dosažené výsledky

Použitím metody vyrovnání naměřených hodnot bylo dosaženo větší přesnosti měření. Při uvádění systému do provozu byly rovněž odhaleny systematické chyby měření, které do té doby používané postupy neumožňovaly zjistit.

Přesnost určené tepelného výkonu parogenerátorů dosáhla hranice 0,6 % ze jmenovité maximální hodnoty, což představuje významné zlepšení.

Prací se systémem byly také získány hlubší znalosti o tocích hmot a energií, postupně využívané k realizaci různých provozních zdokonalení, např.:

- úprava v zapojení potrubí turbínového kondenzátu z chladiče odluhů,
- identifikace provozních netěsností (tzv. podcházení) armatur,
- úprava napájení kolektoru 0,7 MPa (viz obr. 2).

Systém je dále využíván k přípravě podkladů pro technické řešení rekonstrukcí a pro zadání projektu zvyšování výkonu (využití projektových rezerv).

Systém poskytuje věrohodné údaje pro dlouhodobé provozní analýzy, diagnostiku zařízení a optimalizaci procesu. Důležitou podmínkou je ovšem průběžná péče o sní-

mače (kontrola správné činnosti a odstraňování závad).

#### 6. Závěr

Systém monitorování a hodnocení tepelné výkonnosti bloku JE Dukovany popsany v článku byl vyvinut a je dále rozvíjen společností I&C Energo a. s. Pro validaci naměřených hodnot byl do systému integrován program Recon od firmy Chemplant. Na vývoji simulačního modelu se významně podílela firma Euromatic.

Systém je v současné podobě určen především pro tepelné techniky. Další vývoj a ověřování systému budou zaměřeny na zpřesnění simulačního modelu, poskytování údajů o službě blokových dozoren (určování ztraceného výkonu) a dokonalejší propojení mezi simulací a identifikací parametrů modelu i mezi simulací a optimalizací provozu bloku.

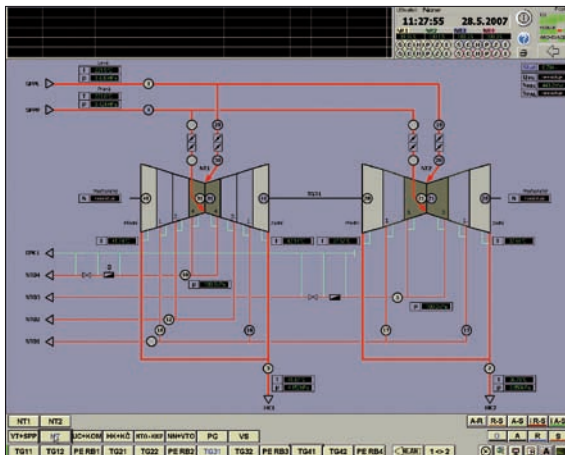
Na základě dosavadních zkušeností lze konstatovat, že systém je vhodný k použití v jaderných i klasických tepelných elektrárnách. Pro klasické elektrárny musí být systém rozšířen o problematiku měření na kotli a modelech kotle. Na tomto doplnění spolupracuje I&C Energo.

Při vývoji systému a jeho uvádění do provozu byly využity dílčí výstupy projektu MPO FI-IM3/226 *Vytvoření pokročilých metod a nástrojů ke zvýšení termické účinnosti elektráren a tepláren.*

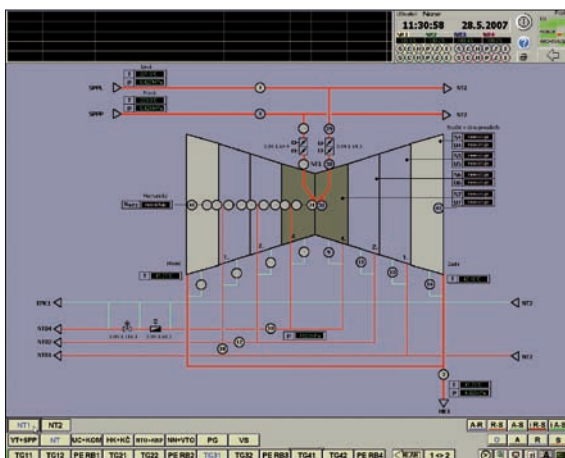
#### Literatura:

- [1] RUBEK, J. – PLISKA, J.: *Moderní trendy v optimalizaci provozu elektráren a tepláren.* Automa, 2007, roč. 13, č. 5, s. 28–30.
- [2] RUBEK, J. – LEPOLD, M. – PLISKA, J.: *Zvýšení přesnosti měření a její využití pro optimalizaci provozu.* Automa, 2007, roč. 13, č. 7, s. 36–38.
- [3] RUBEK, J. – HANZAL, L. – PLISKA, J.: *Matematické modelování v energetice a jeho využití.* Automa, 2007, roč. 13, č. 8-9, s. 106–110.

Ing. Jiří Pliska,  
Ing. Jaroslav Rubek, CSc.,  
I&C Energo a. s.  
(jpliska@ic-energo.cz)



Obr. 7. Příklad zobrazení na druhé úrovni detailu



Obr. 8. Příklad zobrazení na třetí úrovni detailu

### ► Uzávěrka referátů na ŘÍP 2008 se blíží

Koncem ledna 2008 vyprší lhůta pro přihlášení referátů na osmý ročník konference Řízení procesů (ŘÍP), kterou pořádá Česká společnost průmyslové chemie při Univerzitě Pardubice ve dnech 9. až 12. června 2008 v hotelu Dlouhé Stráně v Koutech nad Desnou. Tato vědeckotechnická konference s mezinárodní účastí si klade za cíl poskytnout široké odborné veřejnosti prostor

k výměně názorů a poznatků o řízení procesů. Proto je v jejím programu dána přednost vývěskové formě prezentace. Jako přednášky v sekcích budou z nabídek vybrány nebo vyžádány prezentace, které zevšeobecňují výzkumné výsledky nebo úlohy využívající progresivní prostředky. Konference ŘÍP je určena odborným a vědeckým pracovníkům výzkumných ústavů, Akademie věd, projektových organizací, odborníkům z průmyslu, dodavatelských firem, vysokých a středních škol. Program konference zahrnuje šest tematických celků:

- metody řízení systémů,
- modelování a identifikace,
- umělá inteligence,
- informační a komunikační technologie v řízení, virtuální laboratoře,
- průmyslové řídicí systémy,
- technické a programové prostředky řízení.

V programu konference ŘÍP je pamtováno i na možnost prezentace výrobků, programového vybavení řídicích systémů a propagace odborné a studijní literatury. Jednacím jazykem konference je čeština, slovenština nebo angličtina. (ed)

krátké zprávy