

# Rozvoj řídicích systémů Elektrárny Opatovice a souvislost s využíváním tréninkových a inženýrských (výukových) simulátorů, včetně výuky regulace

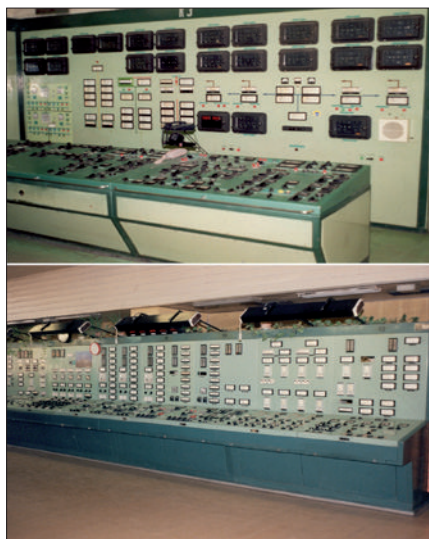
## 1. Úvod

Elektrárna Opatovice, a. s., (EOP) je významný dodavatel tepla a elektrické energie. Je schopna poskytovat také podpůrné služby (primární regulace frekvence bloku, sekundární regulace výkonu bloku, patnáctiminutová záloha). Po roce 1998 zahájila EOP intenzifikaci řízení technologie s cílem uspořít obslužný personál. Hlavním prostředkem bylo plné využití propojených řídicích systémů a jejich nadstavby. Byla sloučena operátorská pracoviště a přemístěna do společného velínu. Aby byly obsluhy připraveny na zvládnání dvou a více pracovišť, bylo rozhodnuto vytvořit výukový simulátor (*learning simulator*) a tréninkový simulátor (*operators training simulator*) pro nácvik identifikace a řešení nestandardních provozních stavů, jako je najíždění a odstavování zařízení a poruch.

K tomu byl vytvořen trenažér pracoviště dvou kotlů G 250 EOP včetně ovládacích prvků „mozaika“. Jde o trenažér simulačního typu, tzn. že dva parní kotle se společnou parní sběrnou a dva turbogenerátory jsou počítačově simulovány a k nim jsou emulovány řídicí automaty Sandra od firmy ZAT. Jde o model jedné parní technologické sekce. Reálná teplárna zahrnuje tři takové sekce, které se liší typem zapojených parních turbín (turbíny kondenzační, odběrová a protitlaká). Monitorovací a ovládací systém na simulátorech je realizován použitím provozní aplikace systému InTouch (Wonderware), která byla rozšířena vytvořením pracoviště instruktora, z něž je řízení a monitorován výcvik. Dále bylo vytvořeno zjednodušené pracoviště strojníka pro dva kondenzační turbogenerátory, zahrnující dvoumonitorovou operátorskou stanici InTouch.

Obdobně byl realizován trenažér pracoviště operátora všech elektrárenských rozvodů EOP R110kV a R6kV, včetně vyvedení výkonu do distribuční soustavy ČEZ Distribuce (dříve VČE), který je využíván pro výcvik a přezkušování elektromanipulantů. Tento trenažér je založen na třífázovém modelu šesti generátorů a rozvodů a umožňuje modelování manipulací a poruchových stavů v distribuční rozvodně a rozvodnách vlastní společnosti. Pracoviště sestává z operátorských stanic InTouch, projekce informačního panelu

(emulace nástěnného panelu od firmy Apel) a instruktorské stanice, ze které instruktor řídí a monitoruje činnost obsluhy. Na operátorském pracovišti je paralelně připojen i systém automatické regulace napětí a jalových výkonů (ASRU) koordinovaný s dispečerským pracovištěm ČEZ Distribuce.



Obr. 1. Do roku 1991 byla technologie EOP řízena sekvenčními automaty na bázi reléové techniky a regulace byly realizovány elektronickým systémem VTI (SSSR)

Jako poslední byly realizovány trenažéry pro výcvik obsluh záložních kotlů, které fungují jako záložní zdroje tepla v Hradci Králové, Pardubicích a v Chrudimi. Jde o plynové kotle, pro jejichž obsluhu je povinné provozovat kotel po minimální předepsanou dobu během roku. Hlavním smyslem trenažérů je možnost zajistit tuto povinnost bez nutnosti najetí kotlů. Pracoviště přímo využívá operátorské stanice kotlů (InTouch), které se pro potřebu výcviku odpojí od sběrnice automatů a připojí se k modelu kotle a řídicího systému, který je nainstalován na přenosném notebooku. Jde o inovativní řešení výrazně snižující investiční náklady na realizaci trenažérů.

Jednou z inženýrských úloh simulátorů a inženýrských trenažérů je výuka a školení metod automatizace a procesu ladění parametrů regulátorů s využitím modelu bloku

elektrárny a dynamických simulací. V článku je popsán „simulační“ postup ladění regulátoru pro stavový Luenbergerův regulátor s pozorovatelem aplikovaný na regulaci teploty přehřáté páry na uhlénném parním kotli. Příslušnou teorii a užitím pokročilých metod řízení, včetně stavových, citlivostních a inteligentních regulátorů, snímačů a akčních členů, se zabývá i moderní česká literatura (budou uvedeny příklady). Jako zajímavost bude popsán regulační příklad tzv. „efektu nafouknutého balonku, který je též nazýván „efekt vodní postele“ či „efekt přeházeného sněhu“.

## 2. Základní údaje Elektrárny Opatovice

Technologie EOP je tvořena šesti uhlénnými kotli (tepelný výkon do soustavy zásobování teplem 698 MW) a šesti turbogenerátory 60 až 65 MW (celkový elektrický výkon je 363 MW). Instalované turbogenerátory jsou poháněny třemi kondenzačními turbínami, dvěma turbínami odběrovými a jednou turbínou protitlakou.

Čtyři kotle jsou retrofitované s emisí  $\text{NO}_x$  pod  $200 \text{ mg/Nm}^3$  a látkovými filtry s emisí tuhých znečišťujících látek pod  $10 \text{ mg/Nm}^3$ .



Obr. 2. V letech 1991 až 1998 byla EOP kompletně osazena řídicím systémem ZAT E a ZAT D s operátorskými stanicemi Geadat Z300, později InTouch

Dva kotle jsou vybaveny původními elektrofiltry. Elektrárna má dvě odsiřovací linky.

Neblokové provozy tvoří hlavní výměňková stanice, chemická úprava vody, suchá doprava popela, míchací centrum, zauhlování, chladič věže, distribuční rozvodna R110kV, rozvodny vlastní spotřeby 6 kV a soustava zásobování teplem pro Hradec Králové, Pardubice, Chrudim a Bohdaneč.

## 2.1 Řízení EOP v letech 1958 až 1991

Do roku 1991 byla technologie EOP řízena sekvenčními automaty na bázi reléové techniky a regulace byly realizovány elektronickým systémem VTI (SSSR). Modernější technologie byly regulovány za pomoci modulárního systému Modin (TG5 a K5, od roku 1985) a kompaktních regulátorů Notrik (TG6 a hlavní výměňková stanice, od roku 1978). Modin i Notrik byly tuzemské výroby (ZPA). Výcvik obsluh probíhal ad hoc metodou „otec – syn“.

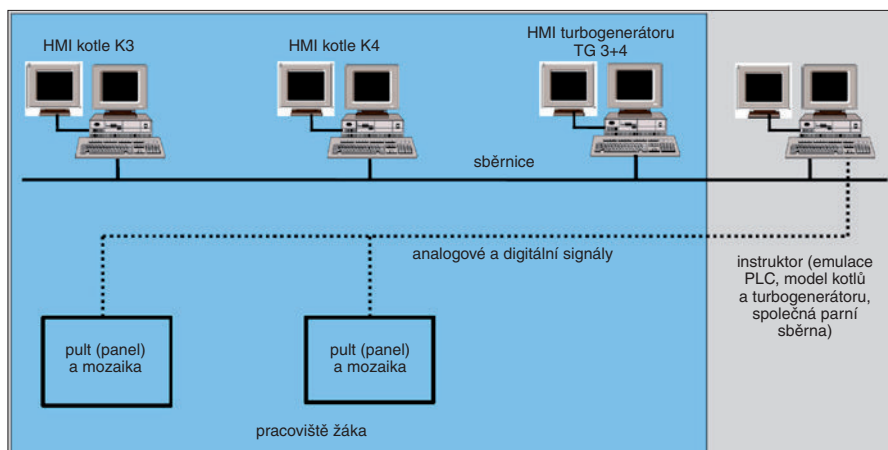
## 2.2 Řízení EOP v letech 1991 až 1998

V letech 1991 až 1998 byla EOP kompletně osazena řídicím systémem ZAT E a ZAT D s operátorskými stanicemi Geatd Z300 (AEG Schneider Automation), později, od roku 1994, InTouch (Wonderware).



Obr. 3. V letech 1998 až 2012 byla sloučena operátorská pracoviště (z jednoho pracoviště se řídily dva kotle nebo dva turbogenerátory) a přemístěna do společného velínu

Řídicí systém ZAT E řídil kotle, turbogenerátory, hlavní výměňkovou stanici, odsíření, chemickou úpravnu vody, suchou dopravu popela, míchací centrum, centrální regulátor



Obr. 4. Základní schéma trenážeru dvou kotlů a turbogenerátoru

výkonu, rozvodny elektřiny 110 kV, 10 kV a 6 kV. Řídicí systém ZAT D2 řídil zauhlování a čisticí stanice chladicí vody.

Tyto systémy zajišťovaly funkce regulací, sekvenčního řízení, zabezpečovacích systémů, HMI a historizace dat.

Výcvik obsluh systémem „otec – syn“ byl doplněn kompletními provozními předpisy MaR popisujícími funkce řídicího systému. Vznikl také první trenážer pro výcvik v ovládní PC. Plnohodnotná grafika systému InTouch však přináší první problém: obsluhy místo řízení technologie „hrají hru technologie“.

## 2.3 Řízení EOP v letech 1998 až 2012

Po roce 1998 zahájila EOP intenzifikaci řízení technologie s cílem uspořít obslužný personál. Hlavním prostředkem bylo plné využití propojených řídicích systémů a jejich nadstavby. Byla sloučena operátorská pracoviště (z jednoho pracoviště se řídily dva kotle nebo dva turbogenerátory) a přemístěna do společného velínu. Značně tím vzrostly požadavky na obsluhu především v nestandardních provozních stavech, které se nevyskytují často. Původní systém výcviku proto již nevyhovoval. Řešením byl pouze trenážer s plnohodnotnou grafikou operátorské stanice a funkcemi co nejvíce podobnými skutečné technologii. Komplikací se však ukázala ovládací pracoviště typu „mozaika“ – viz obr. 2.

Byly instalovány nové řídicí systémy pro systémovou podporu přenosové soustavy, podpůrné služby primární regulace frekvence bloku a ostrovní provoz.

## 2.4 Výcvik obsluh v letech 2001 až 2012

Pro požadované snížení stavu obsluh bylo nutné zavést zcela jinou koncepci výcviku. Bylo třeba vytvořit pracoviště pro výcvik činnosti obsluh při nestandardních provozních stavech, jako jsou poruchy, najíždění a odstávování, a zpracovat kompletní program výcviku obsluh s dopadem na hodnocení a odměňování pracovníků.

### 2.4.1 Trenážer kotlů a turbogenerátoru

Zadání pro výběrové řízení trenážeru kotlů stanovovalo rozsah požadovaných funkcí modelu kotle, turbogenerátoru a společné parní sběrný včetně funkční „mozaiky“ pro trenážer. Vybraná nabídka obsahovala tři operátorské stanice InTouch (dva kotle a jeden



Obr. 5. Pracoviště trenážeru kotlů

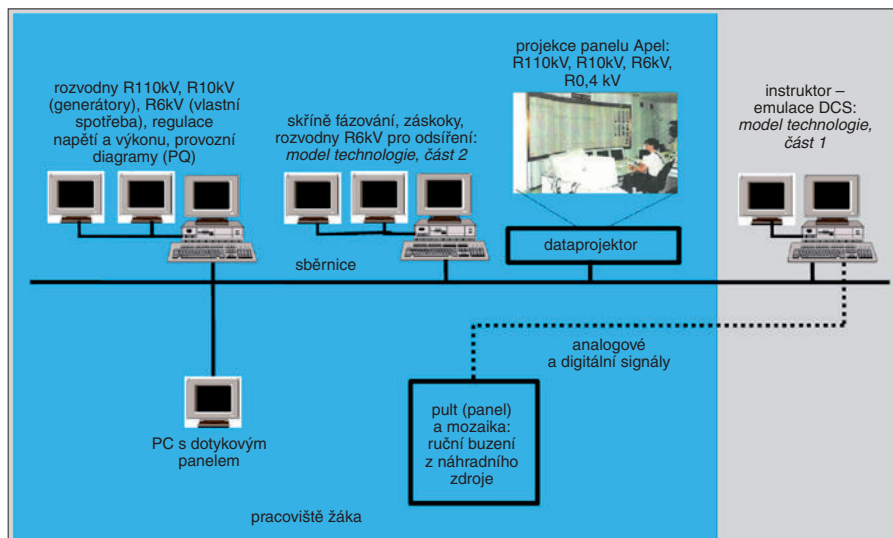
turbogenerátor), kompletní pracoviště „pult/ mozaika“ dvou kotlů a pracoviště instruktora. Základní schéma trenážeru je na obr. 4, pracoviště trenážeru kotlů je na obr. 5.

### 2.4.2 Dispečerský trenážer elektrorozvoden

Dispečerský trenážer elektrorozvoden byl určen pro standardní i nestandardní manipulace prováděné prostřednictvím řídicího systému ZAT nebo mimo něj (hardwarové ovládací prvky, regulace buzení). Bylo nutné na-

Tab. 1. Hypotetické dosažitelné výsledky pro jednotlivé skupiny školených pracovníků

Hodnocení	1	2	3	4	Průměr
Generický simulátor		začátečníci ze všech elektráren		zkušení pracovníci všech divizí	3,0
Generický simulátor a školicí středisko		všichni operátoři ze všech elektráren			2,0
Specifický simulátor	zkušení operátoři ze specifických bloků	začátečníci ze specifických bloků	začátečníci ze všech elektráren		2,0
Specifický simulátor a školicí středisko	zkušení operátoři ze všech elektráren	začátečníci ze všech elektráren			1,5



Obr. 6. Základní schéma trenažéru rozveden

cvičit koordinaci činností se strojníkem při fázování turbogenerátoru, činnost při poruchách typu jedno-, dvou- či třífázových zkratů v různých místech rozveden, řízení napětí v rozvodně R110kV a v rozvodnách 6 kV vlastní spotřeby, změny frekvence, ostrovní provoz a změny spotřeby v síti 110 kV dané změnou zátěžného úhlu.



Obr. 7. Pracoviště trenažéru rozveden

Sestavu trenažéru tvořily dvě operátorské stanice PC pro manipulanta se třemi monitory, jedna stanice PC pro instruktora, data-projektor pro projekci funkčního obrazu mozaiky od firmy Apel a hardwarové prvky pro ovládání náhradního buzení turbogenerátoru.

Základní schéma trenažéru je na obr. 6, pracoviště trenažéru rozveden je na obr. 7.

### 2.4.3 Trenažér záložních zdrojů

Trenažér záložních zdrojů (jediný, který se dosud plně využívá) obsahuje simulační model PLC a technologie záložních zdrojů K13 Chrudim a K15 a K16 Hradec Králové. Trenažér využívá operátorskou stanici příslušného zdroje, kterou, po odpojení od provozní sběrnice, připojuje k modelu PLC a technologii instalovanému na přenosném notebooku. Na operátorské stanici se pro výcvik spouští instruktorská aplikace, výcvik probíhá při odstaveném technologickém zařízení a nahrazuje povinné hodiny obsluhy na jedoucím zařízení. Přínosem je úspora paliva kotlů při povinném výcviku obsluh a nízké investiční náklady na trenažér díky využití reálného pra-

coviště. Základní schéma trenažéru je na obr. 8, pracoviště trenažéru topiče je na obr. 9.

### 2.5 Současný stav

Současný stav je ovlivněn těmito skutečnostmi:

- retrofit čtyř kotlů, instalace nového řídicího systému ZAT Sandra na čtyřech kotlích, hlavní výměňkové stanici a šesti turbogenerátorech,
- instalace nových ochran a řídicího systému na rozvodnách 110 kV, 10 kV a 6 kV,
- výstavba nového odsíření.

Trenažér kotlů a turbogenerátorů je tedy pro výcvik nepoužitelný, protože neodpovídá nové skutečnosti. O realizaci nového trenažéru zatím nebylo rozhodnuto.

Trenažér rozveden lze nyní využívat v omezeném rozsahu (jako generický – výukový, viz dále klasifikace trenažérů), neboť po rekonstrukci rozveden neodpovídá nové realitě (není to výcvikový trenažér typu replika). Upgrade je zařazen v investičním plánu 2018 a v současnosti probíhá jeho realizace.

Trenažéry záložních zdrojů jsou plně využívány ke spokojenosti provozovatele.

Informace o trenažérech EOP byly průběžně publikovány v odborných člancích, v prezentacích na seminářích a konferencích. Technické údaje a popisy trenažérů EOP byly uvedeny na konferencích Poděbrady v letech 2003 až 2017 [1], [2], [3], [4], [5], [6], [7].

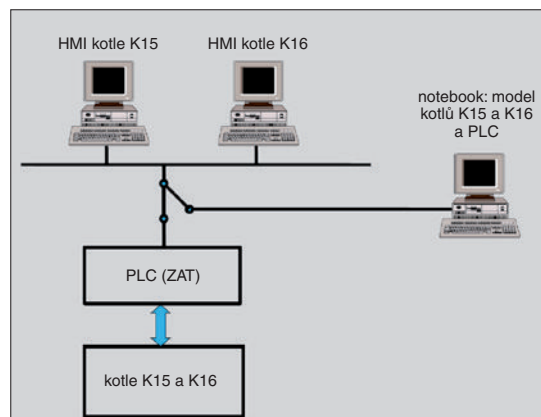
### 3. Inženýrské využití simulátorů a trenažérů v oblasti regulace a automatizace

Inženýrské porozumění technologickému procesu a jeho správné operátorské provozování jsou prostředky pro optimalizaci provozu (ekonomickou i technologickou). Do-

mluva mezi objednatelem (provozovatelem) výrobní a dodavatelem simulátoru je však komplikovaná a zdouhavá (zejména je-li jeden z partnerů „nováčkem“). V rámci inženýrského si objednatel a provozovatel simulátoru (např. elektrárenská nebo teplárenská společnost) musí položit několik otázek.

*Otázka 1:* Jaký je cíl výuky, školení a tréninku? Je to trénink všech operátorů (topičů, strojníků, manipulantů a elektrodispečerů), nebo pouze jedné skupiny operátorů? Je to trénink operátorů z více elektráren, nebo pouze operátorů jednoho bloku?

*Otázka 2:* Jaký má být rozsah školení a tréninku? Bude simulátor pouze školicí pomůckou, nebo bude využíván v uceleném systému výuky, včetně učebnicové výuky teorie fyzikálně-tepelných procesů, nebo psychologických testů školených žáků? Bude využíván pouze generický zjednodušený trena-



Obr. 8. Základní schéma trenažéru záložních kotlů

žér, nebo specifický trenažér typu replika plného rozsahu?

*Otázka 3:* Jakých výsledků chce objednatel dosáhnout školením a tréninkem?

### 3.1 Klasifikace simulátorů a trenažérů

Obecně se rozeznávají tři základní typy simulátorů a trenažérů.

První jsou výukové simulátory (*learning simulators*). Ty jsou určeny pro výuku základních principů, provozních jevů a dynamických charakteristik typických technologických zařízení, např. uhlého parního bloku či distribuční nebo přenosové sítě. Jako výukové simulátory se mohou použít zjednodušené generické modely.



Obr. 9. Pracoviště trenažéru topiče záložních kotlů

Tab. 2. Informativní cena dodávky simulačního trenážeru (v normovaných cenových jednotkách)

Typ	Blok 200 MW nebo 100 MW	Dva kotle a dva turbogenerátory (60 MW)	Jeden kotel a jeden turbogenerátor (60 MW)	Kotel 250 t/h	Turbogenerátor 60 MW
generický model a generický systém SCADA (odpovídá realitě z 50 %)	4,00	3,00	2,00	1,20	0,80
generický model a specifický systém SCADA (odpovídá realitě ze 75 %)	6,40	4,80	3,20	1,92	1,28
specifický model a generický systém SCADA (odpovídá realitě z 90 %)	7,20	5,40	3,60	2,16	1,44
specifický model a specifický systém SCADA (odpovídá realitě z 99 %)	8,00	6,00	4,00	2,40	1,60

Druhé jsou inženýrské simulátory (*engineering simulators*), které jsou určeny např. pro zjištění vlivu změny konstrukčních parametrů na dynamiku bloku, ověření vhodných regulačních smyček a nastavení parametrů regulátorů, pro analýzu přechodových a jiných dějů apod. V tomto případě mohou být použity detailní modely celého zařízení (*full scope*) nebo pouze specifické detailní modely (*part task*) jednoho technologického zařízení. Třetí jsou výcvikové trenážery (*operator training simulators*, OTS), určené pro periodické školení a trénink operátorů, popř. jiného provozního personálu. Pro výcvikové trenážery se používají plnorozsahové modely s věrnou kopií pracoviště obsluhy – replikou.

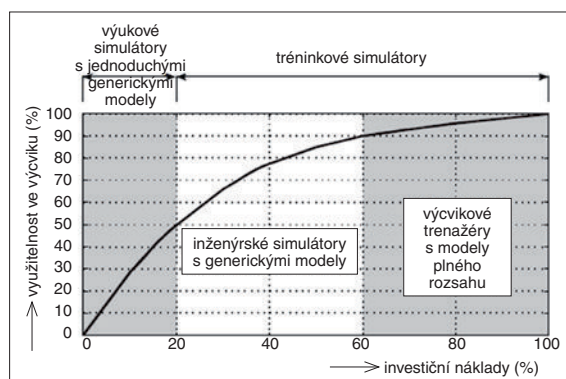
Na obr. 10 je závislost investičních nákladů na typu simulačního trenážeru. V tab. 2 je informativní cena dodávky simulačního trenážeru (v normovaných cenových jednotkách). Je třeba upozornit na to, že z metodických důvodů je použita lineární závislost. Z obr. 10 je zřejmé, že závislost lineární není, a proto údaje v tab. 2 plně neodpovídají skutečnosti.

Indikativní seznam potřebných dokumentů k vývoji modelů energetických zdrojů a trenážerů či simulátorů lze specifikovat takto:

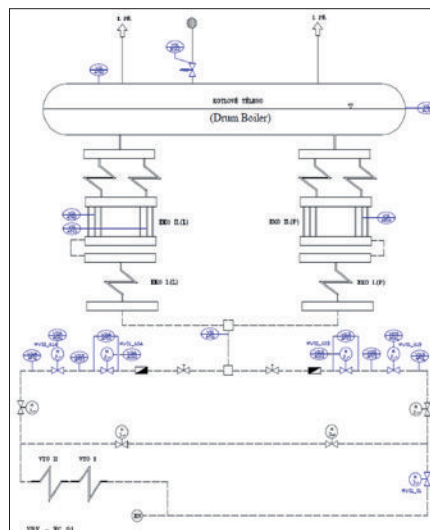
- provozní předpisy – obecné pochopení a scénář vývoje modelu,
- schéma potrubního propojení a provozních přístrojů (*Process & Instrumentation Diagrams*, P & ID) – specifikace měřicích prvků a regulačních obvodů,
- specifikace a parametry řídicích a regulačních smyček,
- SCADA/HMI,
- technologická schémata, např. kotel: voda – pára, vzduch – spaliny, palivo – struska; teplárna: teplárenské kotle – parní sběrna – turbosoustrojí; bloková: kotel – turbosoustrojí; zapojení elektrorozvodu: jednopólová schémata, detailní zapojení, vyvedení elektřiny,
- projekt, projektová schémata (*Basic & Detail Design*, tj. úvodní a prováděcí projekt), konstrukční výkresy,
- výpočty: energetická a hmotnostní bilance, tepelný, hydraulický a aerodynamický výpočet kotle a turbíny, elektrické výpočty generátoru a rozvodny, zkratky,

- provozní měření veličin s periodou měření podle časových konstant přechodových dějů, identifikace parametrů a přenosových funkcí, validace a verifikace modelů.

Příklad podkladové dokumentace je na obr. 11.



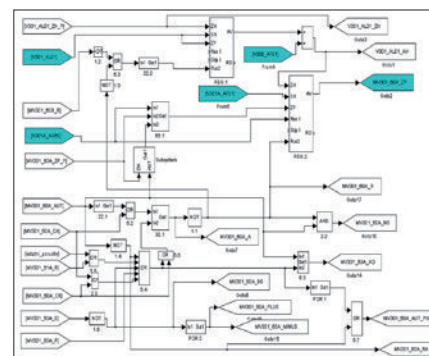
Obr. 10. Závislost investičních nákladů na typu simulačního trenážeru



Obr. 11. Schéma PI & D napájení uhelného bubnového parního kotle v teplárně

### 3.2 Inženýrské ladění parametrů regulátorů

Jednou z inženýrských aplikací je ladění parametrů regulátoru s využitím modelu bloku elektrárny. Základem je emulace základní úrovně řízení. Blokované emulované schéma řídicího systému ZAT je na obr. 12, následný graf na obr. 13 ukazuje jeden simulační krok ladění regulátoru podle vybraného kritéria kvality regulace.



Obr. 12. Blokové schéma řídicího a regulačního systému regulace hladiny v bubnu

Všechny PID regulátory (bloky REG. 1, REG. 2 v obr. 12) jsou realizovány Z-transformací ze spojitého PID regulátoru, který je popsán rovnicí:

$$u(t) = r_0 e(t) + r_0 T_D \frac{de(t)}{dt} + \frac{r_0}{T_I} \int e(\tau) d\tau \quad (1)$$

kde:  
 $u(t)$  je výstup regulátoru,  
 $r_0$  zesílení regulátoru,  
 $e(t)$  regulační odchylka,  
 $T_D$  derivační časová konstanta,  
 $T_I$  integrační časová konstanta.

Tato rovnice je transformována trapezoidní metodou do diskretní verze regulátoru [20] na tvar:

$$u = q_2 z^{-2} + q_1 z^{-1} + q_0$$

$$q_2 = r_0 \frac{T_D}{T}$$

$$q_1 = -r_0 - \frac{2r_0 T_D}{T} + \frac{0,5r_0 T}{T_I}$$

$$q_0 = r_0 + \frac{r_0 T_D}{T} + \frac{0,5r_0 T}{T_I} \quad (2)$$

kde  $T$  je perioda vzorkování.

Na obr. 13 je vybraný simulovaný průběh polohy hladiny v bubnu v průběhu ladění regulátoru hodnocený podle maximálního překmitu, počítáno pro kritérium optimálního modulu. Odpovídající průběh hladiny v bubnu, tak jak ho vidí operátor – topič na reálném monitoru se systémem SCADA (zde použit systém InTouch od firmy Wonderware), je na obr. 14.

Dynamický simulační model může být také využit při vypracovávání návrhu řídicí-