

INŽENÝRSKÉ MODELY A SIMULÁTORY REGULACE UHELNÉHO PARNÍHO KOTLE

Petr NEUMAN
ŠKODA PRAHA, a.s.

Bohumil ŠULC - Aleš JAROLÍMEK
České vysoké učení technické v Praze

Príspevek uvádí aktualizovaný model uhelného parního kotle a popisují se v něm způsob a některé možnosti práce se standardním simulačním programem SIMULINK - MATLAB, je-li použit k vývoji inženýrského simulátoru. Jde o linearizovaný model skutečného parního kotle s práškovým spalovacím uhlím. Vedle použití konvenčních PID regulátorů je testován extrémální regulátor s cílem dosáhnout redukce množství škodlivých emisí nastavováním množství primárního vzduchu. Model je základem pro vývoj inženýrského simulátoru bubnového parního kotle.

Klíčová slova: *tréninkové a inženýrské simulátory, modelování parních kotlů, konvenční PID regulace, extrémální regulace*

The paper presents an update of a coal fired steam boiler model and particularly describes a way and some possibilities how to work with the standard simulation program SIMULINK-MATLAB when these tools are used in preparation of an engineering simulator. This model is a linearized model of a real drum pulverised-coal fired steam boiler. Besides the use of conventional PID controllers, the extremal controller is tested for Optimum Combustion Control with the aim to reduce amount of harmful emissions by controlling the primary air flow. The model is a basis for development of the Steam Drum Boiler Engineering Simulator.

Keywords: *Training Operator and Engineering Simulators, Steam Boiler Modelling, Conventional PID Control, Extremal Control.*

1. Úvod

Tento článek stručně popisuje aktualizovaný model bubnového parního kotle spalujícího práškové uhlí. Do modelu lze zahrnout vliv turbíny (obr.3). Model slouží mimo jiné pro ověření speciální extrémní regulace spalování. Opírá se o výsledky z tvorby modelu uhelného elektrárenského bloku, která byla popsána v článku [4]. Model je realizován číslicově pomocí simulačního programu SIMULINK.

Pro návrh a ověření optimální regulace spalování byl vytvořen inženýrský model, což znamená, že vlastní matematicko-fyzikální model kotle je vybaven i potřebným programovým prostředím (MMI) pro styk s inženýrem či obsluhou. Lze ukázat souvislost jednotlivých typů modelů (nelineárních, kvazilineárních, lineárních) s přesností a pracovním rozsahem simulovaného dynamického chování parního kotle.

- **Nelineární model** - lze použít pro rozsah 0 až 100 % jmenovitého výkonu parního kotle, tzn. včetně najíždění a odstavení, a přesnost modelovaných veličin je téměř neomezená, např. přesnost v rozsahu ± 2 % v porovnání s reálně naměřenými průběhy.
- **Kvazilineární model** - lze použít pro rozsah 20 až 100 % jmenovitého výkonu parního kotle s přesností v rozsahu ± 5 %.
- **Lineární (linearizovaný) model** - lze použít pro rozsah 60 až 100 % jmenovitého výkonu parního kotle a přesnost průběhů v okolí pracovního bodu je menší než ± 5 %.

Všechny uvedené hodnoty a parametry jsou pouze obecné pro objasnění problematiky a v jednotlivých konkrétních projektech se mohou lišit.

Dalším hlediskem, které rovněž nepřímo souvisí se zvolením typu modelu, je typ simulátoru. Zhruba se rozlišují tři typy simulátorů:

- **Výukové simulátory** - slouží pro výuku základních principů a dynamických charakteristik typických technologických zařízení, např. právě parní kotel spalující práškové uhlí (v tomto případě se používají *genericke modely*).
- **Inženýrské simulátory** - slouží pro inženýrské aplikace, např. určení vlivu změny konstrukčních parametrů na dynamiku kotle nebo ověření vhodných regulačních smyček a nastavení parametrů regulátorů (v tomto případě mohou být použity *modely celého zařízení* nebo pouze *částečné modely*).
- **Výcvikové simulátory** - slouží pro výcvik operátorů a obsluhy technologických zařízení (v tomto pří-

padě se používají tzv. *plnorozsahové modely*).

Popis těchto typů simulátorů je podrobněji uveden [2].

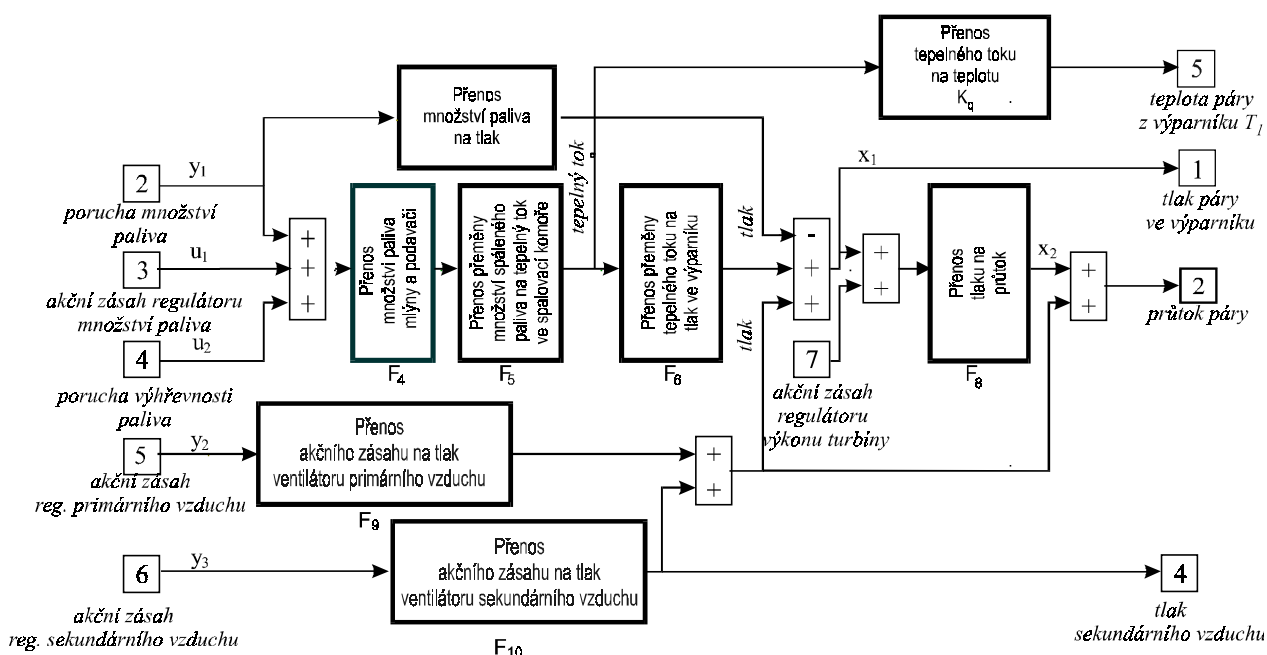
Obecné kroky postupu při tvorbě dynamického modelu kotle pro inženýrské simulátory byly popsány v článku [1]. Zde jsou uvedeny pouze hlavní výsledky založené na lineárním modelu.

2. Lineární model konvenčního bubnového práškového kotle

Jako konkrétní podklad pro model slouží kotel G-230, který spaluje práškové uhlí, je granulární s přirozenou cirkulací. Model je odvozen pro simulovaný pracovní rozsah řízení 150 až 230 t/h, tj. 65 až 100 % nominálního výkonu.

2.1. Model spalovací komory, zauhlování a výparníku

Příklad blokového diagramu částí kotle (podavače uhlí, uhelné mlýny, spalovací komora a výparník) je ukázán na obr. 1. Z uvedeného blokového schématu je patrné, že se jedná o model samotného kotle bez přehřívacího



Obr. 1. Blokové schéma části kotle

traktu, systému napájení atd. Pro tento případ, je tedy modelováno pouze zauhlování, přenos tepla do varných trubek ve spalovací komoře, výparník generující páru určité teploty a průtočného množství a vliv průtoku primárního a sekundárního vzduchu na množství a parametry generované páry.

Zauhlování, spalovací komora, výparník a vzduchy jsou reprezentovány přenosovými funkcemi F_4 až F_{10} , jejichž odvození je nad rámec tohoto textu (tyto přenosy jsou uvedeny v [4]). Konkrétní podobu těchto přenosů demonstrují následující ukázky:

- přenos přeměny spáleného množství paliva na tepelný tok ve spalovací komoře

$$F_5(p) = 0,79e^{-1,2p} \left(\frac{0,5 \cdot 0,18}{0,035p^3 + 0,33p^2 + 0,72p + 0,18} + \frac{0,5 \cdot (5,95p + 0,5)}{268,4p^3 + 239,7p^2 + 29,5p + 0,5} \right)$$

- přenos změn tepelného toku na tlak páry ve výparníku

$$F_6(p) = \frac{1,16}{635p^2 + 290p + 1}$$

- přenos změn tlaku na průtok páry

$$F_8(p) = \frac{1}{35p + 1}$$

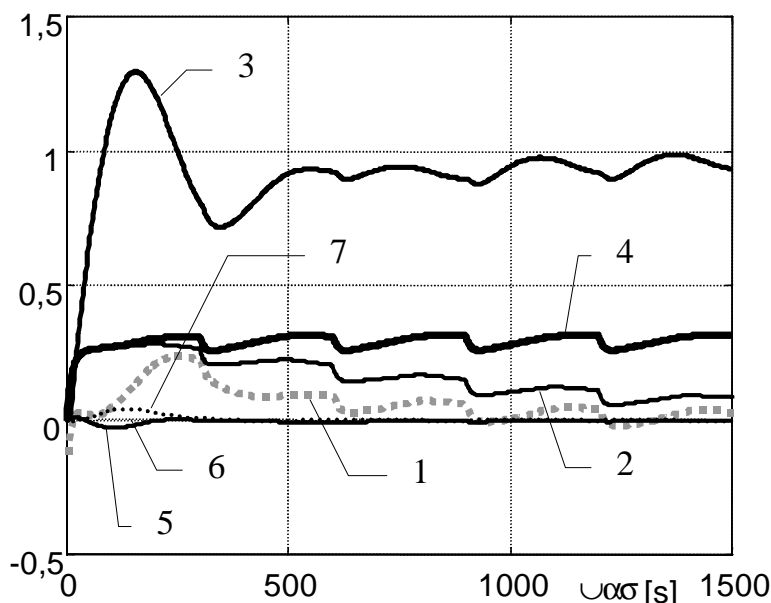
- přenos akčního zásahu regulátoru na tlak primárního vzduchu

$$F_9(p) = \frac{k}{(291p+1)(16,4p+1)^4}$$

- přenos akčního zásahu regulátoru na tlak sekundárního vzduchu

$$F_{10}(p) = \frac{1}{0,2p+1}$$

K tomuto modelu byly při simulaci připojeny tři regulační smyčky. Hlavní smyčka regulace tlaku používala spojitý PID regulátor pro regulaci množství paliva. Obdobný regulátor byl použit v druhé smyčce, která nastavuje průtok primárního vzduchu podle průtoku páry. V třetím regulačním obvodu byl alternativně použit buď spojitý PID regulátor nebo zkušebně extrémální regulátor [4], kterým se dosahovalo optimálního spalování se sníženou emisí škodlivin nastavováním průtoku sekundárního vzduchu. Nastavení všech tří regulátorů PID bylo již popsá-



Obr. 3. Simulované přechodové odezvy elektrárenského bloku na skokovou změnu v dodávce paliva

Legenda k obr. 2

- | | |
|---|-------------------|
| 1 - tlak | 5 - teplota páry |
| 2 - průtok páry | 6 - výkon turbíny |
| 3 - tepelný tok | 7 - hladina vody |
| 4 - zásah regulátoru sekundárního vzduchu | |

no v dřívějších člancích [4]. K nové alternativě náhrady PID regulátoru extrémálním je komentář uveden dále. Spojitý PID regulátor reguluje množství sekundárního vzduchu podle průtoku páry, s žádanou hodnotou odvozenou od výhřevnosti paliva (obr. 3).

Komplexní model kotle vznikne spojením modelů zauhlování, výparníku, spalovací komory s dalšími modely přehříváků, napájení kotle a turbíny, které zde nejsou opisovány.

Na obr. 2 jsou ukázány některé reprezentativní simulační odezvy elektrárenského bloku včetně turbíny s PID regulátory, jejichž nastavování je popsáno v [5].

3. Inženýrský simulátor uhelného parního kotle

Inženýrské simulátory mohou být použity při řešení inženýrských úloh, pro základní zácvik obsluhy, ale a ří při návrhu řídicích obvodů. Umožňují získat znalosti o technologických procesech operátorům - začátečníkům, provozní obsluze, směnovým inženýrům, projektantům i studentům [2]. Lze použít jak lineární (linearizovaný) model pro určitý pracovní bod (např. 80 % jmenovitého parního výkonu), tak i nelineární model vyhovující svojí přesností pro určitý pracovní rozsah (např. 40 –100 % N_{jm}).

Inženýrský model je doplněn o **uživatelské prostředí**, které přizpůsobuje počítačový číslicový model reálnému pracovišti obsluhy. Pro změny parametrů (příp. struktury) modelu slouží *vstupní bloky* (textová pole, příkazová řádka, apod.).

Rozhraní je vytvořeno mezi matematickým číslicovým modelem (zdrojový kód programu – přístup má pouze programátor) a uživatelským prostředím (vstupní bloky – přístup má každý uživatel).

Uživatel má možnost zasahovat do průběhu simulace.

- Může pozastavit simulační výpočet, změnit parametry modelu a pokračovat v simulaci.
- Může zastavit simulaci a opakovat výpočet znovu z výchozího bodu buďto se stejnými nebo změněnými počátečními podmínkami.
- Může zastavit simulaci, např. jestliže grafické výstupy veličin ukazují nevyhovující průběh procesu, určit časový okamžik v průběhu dosavadní simulace, který chce použít jako nový výchozí bod pro znovuspuštění simulace. Tato důležitá vlastnost je nazývána „backtracking“.

Tento typ trenážeru lze kromě inženýrských funkcí (např. ladění struktury a parametrů regulačních smyček) použít i pro základní výuku procesů a jejich řízení, pro předprovozní zaškolení personálu, ale i pro jednání mezi dodavatelem a odběratelem (např. demonstrace dynamických vlastností technologického zařízení).

3.1. Uživatelské prostředí

Při tvorbě inženýrského trenážeru byl model doplněn o přehledové schéma se *vstupními bloky* (obr.3). Rozšiřující funkcí je omezení přístupu zkoušeného žáka do bloků, do nichž může vstupovat pouze učitel/instruktor, jedná se např. o volbu poruchy nebo změnu struktury některé části modelu technologie nebo řídicího systému, která za reálného provozu nemůže být obsluhou měněna. Rovněž tímto se trenážer přizpůsobuje reálnému pracovišti obsluhy, kde je obdobně rozlišen přístup obsluhy a např. provozní údržby nebo správce řídicího systému.

Vytvořené funkční blokové schéma s možností vstupu do jednotlivých bloků je na obr. 3. Při běhu programu v prostředí MATLAB stačí pro přechod do některého z bloků najetí kurzoru na příslušný blok a stisknutí tlačítka myši.

Bloky určené pro žáka jsou volně přístupné (např. jednotlivé spojité regulátory). „Spojitý PID regulátor“ a „měřicí čidlo“ jsou zahrnuty do společného bloku, kde hodnoty parametrů může uživatel zadat prostřednictvím zadávacího formuláře dialogového okna. Ostatní bloky jsou přístupné jen instruktorovi resp. s jeho souhlasem. Žákovi tedy nejsou přístupné bloky kde je možné měnit vnitřní strukturu modelu, bloky „Instruktor“ (volba poruchy) a bloky „Graf“ (grafický záznam průběhu simulace).

Při přechodu do některého z těchto bloků se otevře dialogové okno, kde je uživatel upozorněn na přechod do režimu instruktora. Chce-li uživatel vstoupit do vnitřní struktury bloku, musí zadat přístupové heslo. V popisovaném trenážeru je toto nahrazeno pouze upozorněním na vstup do instruktorského bloku a dále se nedostane (instruktorský přístup nebyl naprogramován). Pro přechod do nižší úrovně v blokové struktuře je nutné pomocí menu – „Options“ (položka „Unmask“) zrušit masku bloku. Tím se stává blok přístupný.

Instruktor může zadávat poruchy ve tvaru skokové změny (zatížení, výhřevnosti paliva) či rampy (změna výhřevnosti). Možné je i zadání jiné poruchy vložení některého ze vstupních bloků knihovny SIMULINK. Kromě toho může instruktor měnit strukturu či parametry modelu, včetně parametrů simulace (doba simulace, simulační krok a metodu řešení aj.). Parametry simulace se nastavují pomocí textového formuláře (menu – „Simulation“, položka – „Parameters“) a spuštění simulace se provádí pomocí položky „Start“ v menu „Simulation“.

3.2. Speciální funkce inženýrského simulátoru

Tato funkce byla dosud demonstračně aplikována pouze na jednoduchou regulační smyčku tvořenou přenosem primárního vzduchu, extrémním regulátorem a buzením pomocí bílého šumu v místě vstupu tepelného toku (viz. obr. 4).

Demonstrace této funkce se spouští voláním jména programu („simul“) z příkazové řádky MATLAB voláním „vitej“. Po spuštění se otevře okno rozdělené do tří částí. V horních dvou třetinách se při simulaci zobrazují průběhy (vždy aktuální a předchozí – pro srovnání vlivu změny či zásahu). V dolní třetině jsou textová pole pro zadání hodnot parametrů a tlačítka pro start simulace, ukončení simulace a opuštění prostředí simulátoru. Současně s tímto oknem se zobrazuje i model regulační smyčky (i zde je možno měnit hodnoty parametrů modelu) tak, jak je uveden na obr. 3. Po stisknutí tlačítka „Simulace“ proběhne simulace a výsledek se vykreslí do grafu v horní třetině okna. Při dalším spuštění se v druhé horní třetině vykreslí předchozí průběh.

Jak již bylo řečeno výše, má uživatel při simulaci následující možnosti:

- v libovolném okamžiku simulace pozastavit výpočet, změnit hodnotu některého parametru modelu a pokračovat v simulaci s novými hodnotami
- zastavit výpočet, změnit kterýkoliv z parametrů a znovu spustit simulaci z výchozího stavu
- zastavit výpočet, změnit kterýkoliv z parametrů a spustit simulaci ze stavu odpovídajícímu libovolnému časovému okamžiku z předchozího průběhu simulace – tzv. „backtracking“. Tato funkce je realizována

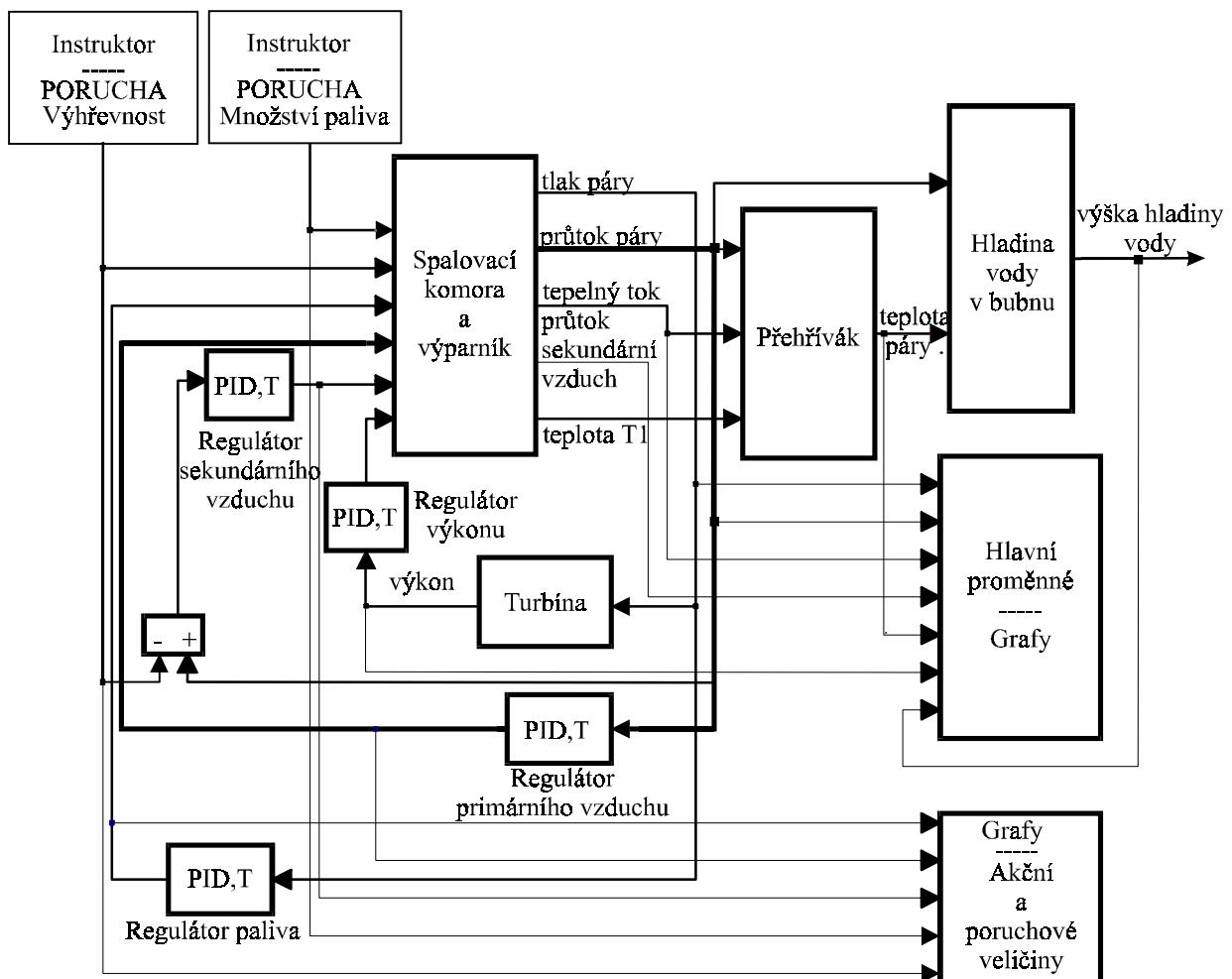
pomocí globální proměnné systému MATLAB. Při výpočtu je ukládán stavový vektor modelu do matice, kde řádky odpovídají časovým okamžikům simulace daným simulačním krokem a sloupce tvoří stavové proměnné modelu.

Tato funkce simulátorů je založena na záznamu všech stavů, které jsou k dispozici v programových souborech SIMULINK. Frekvence záznamu může být nastavena jako volitelný parametr simulace a určuje, jak hluboko do historie lze zajít. Zpětné sledování není standardní funkcí programu SIMULINK a proto muselo být vyvinuto jako speciální funkce programovaná pro uvedený úkol [6].

3.3. Model použitý pro inženýrský simulátor

V současnosti mohou být modely pro simulátory navrženy jako exaktní model technologického procesu nebo jako integrovaný komplexní model více modelů jednotlivých technologických procesů nebo zařízení.

Komplexní model složený z modelů více částí je znázorněn obr. 3. Představuje vlastně blokové schéma jednoho elektrárenského bloku [7].

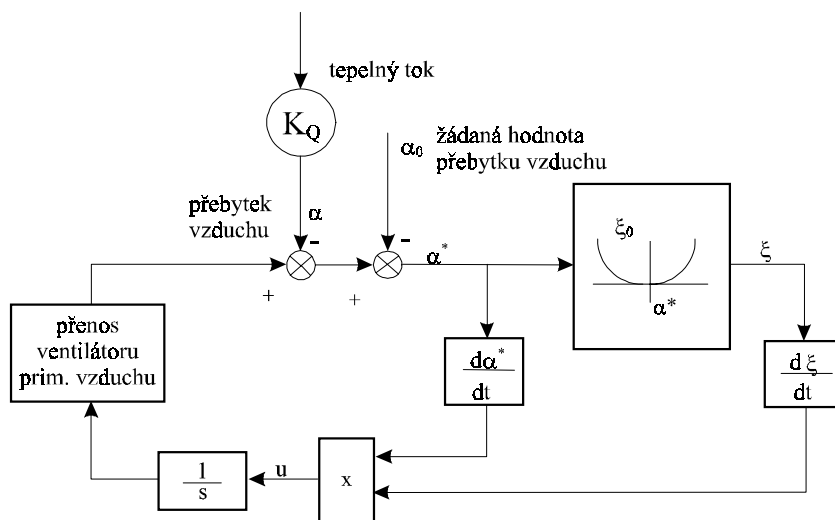


Obr. 4. Blokové schéma elektrárenského bloku v grafice inženýrského simulátoru

4. Extremální regulace

Extremální regulace slouží k udržování optimálního pracovního bodu. V daném případě je hlavním úkolem této regulační smyčky udržet optimální hodnotu přebytku vzduchu ve spalovací komoře [3].

Provoz za takových podmínek je nezbytný pro výrobu páry za bezpečných podmínek pro životní prostředí. Funkční schéma obvodu extremální regulace je znázorněno na obr. 4.



Obr. 5. Blokové schéma extremální regulace

5. Závěr

Přínos inženýrského simulátoru lze stručně shrnout pod následující body:

- Umožňuje testovat nové regulátory a optimalizovat parametry vedoucí např. k dosažení užšího pásma hodnot regulovaných veličin a akčních zásahů, což u regulace teploty přehřáté páry umožňuje zvýšit žádanou hodnotu a tím dosáhnout vyšší účinnosti kotle.
- Umožňuje vyzkoušet a naladit regulační obvody a regulátory a tím usnadnit a zkrátit pozdější implementaci do provozních řídicích systémů.
- Umožňuje přenos softwarových produktů (naprogramované regulační algoritmy, grafika informačních a monitorovacích systémů atd.) vzniklých při navrhování řídicích systémů z inženýrských simulátorů přímo do reálného distribuovaného řídicího systému (DCS).

Inženýrský simulátor je sofistikovaný prostředek umožňující dosáhnout zlepšení provozních vlastností parních kotlů, a to odzkoušením modernějších algoritmů řízení parních kotlů a optimalizací regulátorů.

6. Literatura

- [1] NEUMAN, P., - ŠTECHA, J. - HAVLENA, V.: State Controller with Observer Design for Superheater Temperature Control. 4th IFAC Symposium on CADCS 88, Beijing 1988.
- [2] NEUMAN, P.: Tréninkové a inženýrské simulátory pro elektrárny. 1st International Conference on Process Control ŘÍP 94, Horní Bečva 1994.
- [3] NEUMAN, P. - ŠTOSEK, V.: Advanced NOx Measures and Control Systems in Czech Republic. 11th Annual International Pittsburgh Coal Conference, Pittsburgh 1994.
- [4] NEUMAN, P.: Engineering Simulator for Fossil Power Plant. IFAC/CIGRE Symposium on Control of Power Systems and Power Plants. Beijing 1997.
- [5] ŠULC, B.: Integral Wind-up in Control and System Simulation. In: Control Engineering Solutions. A Practical Approach (Albertos, P. - Strietzel, R. -Mort, N. (Edts)), pp. 61-76. IEE, London 1997.
- [6] JAROLÍMEK, A.: Inženýrský simulátor elektrárenského bloku. Diplomová práce. Fakulta strojní ČVUT, Praha 1998.
- [7] NEUMAN, P. - ŠULC, B. - JAROLÍMEK, A.: Engineering Simulator of Coal Fired Steam Boiler Applied to Optimum Combustion Control. Preprints 14th World IFAC Congress, Beijing, 1999.

Adresní údaje o autorech

Ing. Petr NEUMAN, CSc.
 ŠKODA PRAHA, a.s.
 odd. Kompletace nabídek
 Mílady Horákové 109
 160 41 Praha 6
 p.neuman@skodanet.cz
 Fax: 02/24 39 62 18
 Telefon: 02/24 39 62 18

Doc. Ing. Bohumil ŠULC, CSc. Ing. Aleš JAROLÍMEK
 České vysoké učení technické, fakulta strojní
 Ústav přístrojové a řídicí techniky
 Technická 4
 166 07 Praha
 sulc@fsid.cvut.cz
 02/24 35 25 31
 02/24 35 25 31