

PŘIHLÁŠKA VYNÁLEZU

zveřejněná podle § 31 zákona č. 527/1990 Sb.

(21) Číslo dokumentu:

2011-601

(13) Druh dokumentu: **A3**

(51) Int. Cl.:

F23N 5/10 (2006.01)

F23N 5/18 (2006.01)

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLOVÉHO
VLASTNICTVÍ

(22) Přihlášeno: **27.09.2011**

(40) Datum zveřejnění přihlášky vynálezu: **05.06.2013**
(Věstník č. 23/2013)

(71) Přihlašovatel:

I & C Energo a. s., Třebíč, CZ

(72) Původce:

Jakoubek Pavel Ing., Praha 4, CZ

Klimeš Jiří Ing., Rouchovany, CZ

(74) Zástupce:

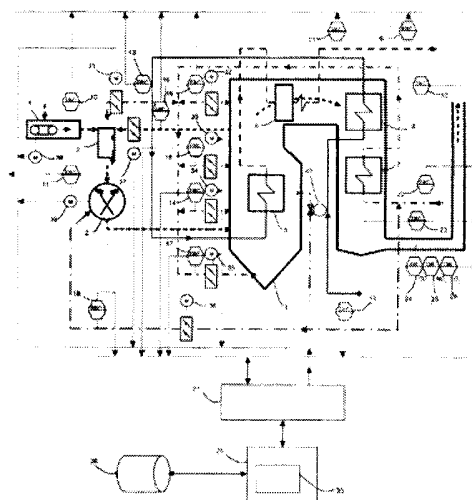
Ing. Jiří Langhans, Krajínova 805/7, Třebíč, 67401

(54) Název přihlášky vynálezu:

**Způsob řízení spalování s využitím
pravděpodobnostního modelování a zařízení
k provádění tohoto způsobu**

(57) Anotace:

Způsob řízení spalování s využitím pravděpodobnostního modelování důležitých provozních parametrů kotle, zejména koncentrace NO_x a CO ve spalínách za kotlem a zejména pro kotle na fosilní paliva v energetice, spočívá v tom, že se provádí průběžné měření parametrů spalování zejména hmotnostního toku páry, paliva, proudu na motorech mlýna, hmotnostního či objemového toku vzduchu, a dále průtoku vody, vzduchu, spalín, páry, paliva a dále teploty vody, páry, vzduchu, spalín a případně další teploty a dále koncentrace CO, NO_x, O₂ a pomocí naučeného pravděpodobnostního modelu plně určeného rozdělením pravděpodobnosti popsaným pomocí matic vytvořených z naměřených v čase proměnných veličin se nalézá optimální nastavení polohy akčních členů kotle, přičemž pravděpodobnostní model se současně průběžně adaptuje pro nalazení optimálního stavu spalování.



Způsob řízení spalování s využitím pravděpodobnostního modelování a zařízení k provádění tohoto způsobu.

Oblast techniky

Vynález se týká oblasti řízení spalování s využitím pravděpodobnostního modelování zejména pro kotle na fosilní paliva v energetice a současně se týká oblasti zařízení pro toto řízené spalování.

Dosavadní stav techniky

Dosavadní způsob řízení spalování v kotli na tuhá paliva se provádí například tak, že žádané polohy akčních členů například klapek spalovacího vzduchu jsou voleny podle předem definované závislosti a to zejména na množství páry na výstupu z kotle případně na otáčky podavače paliva. Tyto závislosti jsou převážně lineárně lomené funkce a bývají korigovány v závislosti na měřených hodnotách koncentrací některých látek ve spalínách zejména koncentrací O_2 , CO a NO_x . Množství paliva se řídí zpravidla dvěma způsoby. Častější způsob je, že množství paliva tedy otáček podavače paliva je řízeno přímo od tlaku páry, případně výjimečně i průtoku páry a to za kotlem. Méně častý je způsob u tlukadlových mlýnů nazývaný řízení na konstantní zamletí, kdy je dána žádaná hodnota zamletí mlýna tedy proudu na elektromotoru mlýna a pro řízení paliva je využíváno vlivu výšky zasypání mlýna na zamletí mlýna. Pokud je aktuální zamletí menší než jeho žádaná hodnota, zvýší se otáčky podavače paliva. To způsobí vyšší zasypání mlýna a větší odpor pro práci mlýna, který potřebuje na semletí paliva větší proud. Při poklesu tlaku páry je zvýšen průtok primárního vzduchu, který tak z mlýna vyfoukne i hrubší částičky namletého uhlí, což uvolní zasypání mlýna a přes výše popsanou regulaci zamletí dojde ke zvýšení otáček podavače paliva.

Je také známý způsob a zařízení popsany v PV 2003 – 2262 ^{dokumentu} kde se zjišťuje model procesu, který se průběžně zjemňuje, přičemž výsledky měření se podrobují před zadáním do modelu procesu šumovému filtru a následně se model procesu ukládá do paměti v neuronové síti, která se průběžně přezkušuje. Akční členy se nastavují v závislosti na stavu systému a na zvolených optimalizačních cílech. Pro regulaci se dále využívá Fuzzy – logiky. Jeden z parametrů pro regulaci je velikost hrudek paliva. Proto se také z kotle podle programu počítače odebírají zkušební vzorky.

Zařízení pro dosavadní způsoby řízení spalování odpovídá vždy konkrétnímu způsobu řízení spalovacího procesu, počtu jeho měřených a neměřených a počtu jeho ovládaných parametrů, konkrétním metodám měření a konkrétnímu způsobu ovládání. Přičemž i zde může docházet k odlišnostem. Tyto způsoby a zařízení mají své výhody ale také nevýhody, přičemž u každého

způsobu a zařízení se mohou tyto více či méně lišit. Způsob zjištění modelu procesu a způsob výběru optimálního stavu je zatím nad úroveň výše uvedeného stavu. Všechny uvedené metody a postupy zatím neřeší otázku neustálého vyhledávání, zaznamenání a udržování a ověřování optimálního nastavení technologie, které se během dlouhodobého provozu mění, přičemž kritérium optimality lze vhodně volit.

Podstata vynálezu

Podstatou vynálezu je způsob nového řízení spalování s vnitřním pravděpodobnostním modelem. Nový způsob řízení neřídí jednotlivé akční zásahy nezávisle na sobě, ale hledá optimální nastavení všech akčních členů jako celku. Akční členy podílející se na řízení spalování jsou klapky spalovacího vzduchu (primárního, sekundárního, jádrového, terciárního, dohořivacího, studeného), klapky spalin pro sušení paliva, množství paliva do kotle (otáčky podavače paliva, případně výška vrstvy paliva), kvalita mletí mlýnů (zamletí mlýna – tj. proud na motoru mlýna). Řízení množství paliva (pro případ řízení od tlaku páry), nebo primárního vzduchu (pro případ řízení na konstantní zamletí) je ponecháno nezměněné podle stávajícího algoritmu. Klapky sekundárního vzduchu však nejsou řízeny od průtoku páry, ale jejich nastavení je určováno algoritmem s vnitřním pravděpodobnostním modelem. Algoritmus volí taková nastavení klapek, která jsou pro daný stav technologie určeny z důležitých měřených parametrů (průtok páry – tzv. parní výkon, množství paliva, množství primárního vzduchu, množství nasávaného vzduchu, atd.) a z hlediska předem zvolené strategie řízení optimální. Tato strategie řízení může být řízení na maximální účinnost, nebo řízení na optimální emise – optimální poměr koncentrace NO_x a CO, nebo řízení na jiné optimální parametry – např. teplota ve spalovací komoře a koncentrace CO ve spalovací komoře kvůli struskování. Pro nalezení optimálního nastavení jsou využívány stavové matice pravděpodobných výstupů a četnostní matice výskytu technologie v určitém stavu, které mohou být naučeny z historických, či aktuálních provozních dat nebo vyplněny podle zkušenosti o řízení a provozních charakteristikách kotle. Algoritmus pak podle strategie pro optimalizaci emisí NO_x a CO určuje například takové nastavení klapek, pro které jsou pravděpodobné emise NO_x nejnížší a pravděpodobnost, že emise CO překročí určitý zvolený limit (např. 200mg/m^3) nesmí překročit zvolenou mez (například 50%). Způsob řízení spalování s využitím pravděpodobnostního modelování důležitých provozních parametrů kotle, zejména koncentrace NO_x a CO ve spalinách za kotlem a zejména pro kotle na fosilní paliva v energetice, tedy spočívá v průběžném měření parametrů spalování zejména hmotnostního toku páry na výstupu z kotle, tedy parního výkonu, hmotnostního toku paliva do kotle, proudu na motorech mlýna, hmotnostního či objemového toku

nasávaného spalovacího vzduchu, hmotnostního toku primárního vzduchu do mlýna, hmotnostního toku sekundárního vzduchu, hmotnostního toku jádrového vzduchu, hmotnostního toku dohořivacího vzduchu, hmotnostního toku terciárního vzduchu, hmotnostního toku studeného vzduchu, hmotnostního toku spalin pro sušení paliva a dále průtoku vody, vzduchu, páry, paliva a dále teploty vody, páry, vzduchu, spalin a případně další teploty a dále koncentrace CO, NO_x, O₂ a pomocí naučeného pravděpodobnostního modelu plně určeného rozdělením pravděpodobnosti popsaným pomocí matic vytvořených z naměřených v čase proměnných veličin, tedy dat pro určení modelu a pro syntézu řízení, zejména pomocí stavových matic pravděpodobných výstupů a stavových matic četnosti výskytu technologie v určitém stavu, se nalézá optimální nastavení polohy akčních členů kotle tj. klapek spalovacího vzduchu primárního, sekundárního, jádrového, terciárního, dohořivacího, studeného a dalších, klapek spalin pro sušení paliva, dále se určuje množství paliva do kotle, tedy otáčky podavače paliva, výška vrstvy paliva, dále kvalita mletí mlýna tzv. zamletí mlýna, tedy proud na motoru mlýna, vstřikovací trysky reagentů pro selektivní nekatalytickou reakci pro redukci oxidů dusíku, vše pro požadovaný stav spalování, tedy podle požadovaného množství páry a jejich parametrů na výstupu z kotle, přičemž pravděpodobnostní model se současně průběžně adaptuje pro nalezení optimálního stavu spalování. Některá měření a některé akční členy mohou být podle potřeby vynechány. Může být také použita strategie spočívající v řízení na maximální účinnost a/nebo řízení na optimální emise, tedy optimální poměr NO_x a CO a/nebo řízení na jiné optimální parametry, např. teplotu ve spalovací komoře a koncentraci CO ve spalovací komoře, kvůli struskování.

Tomuto způsobu řízení spalování přísluší níže popsané zařízení, které má například kotel, zejména kotel na fosilní paliva, mlýn, sušku, podavač paliva, výparník, přehřívák páry, ohřívák vzduchu a ohřívák vody, které jsou opatřeny čidly pro průběžné měření parametrů spalování, zejména čidlem hmotnostního toku páry na výstupu z kotle, tedy parním výkonem, čidlem hmotnostního toku paliva do kotle, čidlem proudu na motorech mlýna, čidlem hmotnostního toku nasávaného spalovacího vzduchu, čidlem hmotnostního toku primárního vzduchu do mlýna, čidlem hmotnostního toku jádrového vzduchu, čidlem hmotnostního toku sekundárního vzduchu, čidlem hmotnostního toku dohořivacího vzduchu, čidlem hmotnostního toku terciárního vzduchu a dále čidlem teploty vody, čidlem teploty páry, čidlem teploty vzduchu, čidlem teploty spalin a případně čidly dalších teplot a dále čidlem koncentrace CO ve spalinách, čidlem koncentrace NO_x ve spalinách a čidlem koncentrace O₂ ve spalinách a dále DA/AD převodníkem, pamětí, řídicí jednotkou, opatřenou pravděpodobnostním modelem a dále je opatřen ovládáním akčních členů kotle, tedy ovladači, zejména ovladačem klapek spalovacího vzduchu primárního, ovladačem klapek spalovacího vzduchu sekundárního, ovladačem klapek spalovacího vzduchu jádrového,

ovladačem klapek spalovacího vzduchu dohořivacího, ovladačem klapek spalovacího vzduchu terciárního, ovladačem spalovacího vzduchu studeného a dalších, ovladačem spalinových klapek pro sušení paliva, dále nejméně jedním ovladačem otáček podavače paliva a dále ovladačem proudu na motoru mlýna a ovladačem trysek pro selektivní nekatalytickou reakci pro redukci oxidů dusíku.

Výhodou tohoto vynálezu je možnost využití pro syntézu řízení technologického procesu spalování za účelem optimalizace koncentrací škodlivých látek vypouštěných do ovzduší, či optimalizace jiných parametrů, například ztrát a účinnosti, nebo struskování kotle.

Popis spalování uhlí v elektrárenských kotlích pomocí matematicko-fyzikálních, analytických a experimentálních metod je velice složitý proces. Pro jeho úspěšnou realizaci je nutné velmi dobře rozumět zkoumanému ději, znát jeho charakteristiky při různých provozních režimech, znát konstrukční i jiné charakteristické rysy konkrétního zařízení, správně interpretovat naměřená data, či vhodně zvolit různé koeficienty v četných empirických relacích. Avšak i přes veškerou znalost zkoumané problematiky je vhodné deterministické přístupy identifikace aplikovat zejména v případech, kdy vliv náhodných poruch a neurčitostí je zanedbatelný. Matematicko-fyzikální modelování spalování v kotlích je řešeno pomocí výpočetních nástrojů mechaniky tekutin CFD (Computational Fluid Dynamics). Přesnost výsledných modelů CFD záleží především na míře zjednodušení a na schopnostech a zkušenostech analytiků. S rostoucí složitostí a přesností modelů CFD výrazně rostou i náklady na výpočetní techniku a prodlužuje se čas výpočtu modelu. Právě velmi dlouhá doba výpočtů modelů CFD prakticky znemožňuje jejich využití pro metody online řízení spalování. Při matematickém modelování technologických procesů zatížených náhodnými vlivy a neurčitostmi je vhodné popsat závislost mezi měřenými vstupy a výstupy stochastickou transformací. Pro syntézu řízení lze pomocí matematicko-fyzikální analýzy nalézt dostatečně jednoduchý a spolehlivý matematický model procesu pouze výjimečně. Pro syntézu řízení je vhodné určený model zjednodušit, avšak doposud neexistuje dostatečně obecná a spolehlivá metoda aproximace, která by zaručovala dostatečnou shodu chování původního a zjednodušeného modelu v uzavřeném zpětnovazebním obvodu s regulátorem, který má být teprve určen. Pro řešení řízení složitých procesů, jako například spalování uhlí v elektrárenských kotlích, se nabízí využít nástrojů pravděpodobnostního přístupu, kde se neznámé veličiny chápou jako veličiny náhodné s daným apriorním rozložením pravděpodobnosti na množině jejich možných hodnot, přičemž lze využít i tzv. Bayesova přístupu, kdy u popisované veličiny apriorně předpokládáme určité chování a identifikace pak spočívá v určování aposteriorních rozložení pravděpodobností těchto veličin podmíněných pozorováními na soustavě. Předpokládejme, že máme za úkol řídit technologický proces, kdy cílem automatického řízení je udržovat určitý soubor regulovaných veličin na

předepsaných hodnotách. Tím je zajištěn určitý provozní režim, který je z nějakého důvodu optimální. Úkolem identifikace daného technologického procesu je stanovit matematický model vhodný pro syntézu řízení. Pro názornost si můžeme představit například bubnový práškový dvoutahový kotel s granulačním ohništěm pro spalování hnědého severočeského uhlí. Pro popis složitějšího procesu spalování, například vzniku znečišťujících látek, které jsou pak vypouštěny do ovzduší, však existuje pouze omezená množina parametrů, které lze zjistit měřením. Jsou to především průtoky vody, páry, vzduchu, či paliva, dále teploty vody, páry, vzduchu a spalin a další. Vznik škodlivých látek (např. CO a NO_x) je však určen zejména poměry spalovacího vzduchu a paliva v prostoru spalovací komory, kde z důvodů nepříznivého prostředí (zejména vysokých teplot, vysoce prašného prostředí atd.) nejsou nainstalovány žádné senzory důležitých parametrů. Pro účely obecného popisu technologického procesu uvažujme, že stochastická soustava S , jež je předmětem našeho studia, je řízena číslicový regulátorem R , který má možnost na ni působit prostřednictvím časové posloupnosti číselného n_U -rozměrného vektoru U_t . Na soustavě S lze dále měřením získat časovou posloupnost n_Y -rozměrné číselné veličiny Y_t , jež budeme nazývat výstupem procesu. Předpokládejme rovněž, že číslicový počítač může k výpočtu akčního zásahu U_t použít pouze číselné vektory Y_{t-1} , U_{t-1} a starší, kde t značí diskrétní čas. Každý reálný proces má konečné trvání. Prvnímu pozorovanému vzoru lze přiřadit časový index $t = 1$ a poslednímu $t = t_K$. Pozorované vstupy a výstupy procesu vztahující se k diskrétnímu času t lze označit jako $D_t = \{Y_t, U_t\}$. Za podmínky znalosti vstupních a výstupních dat až do času t_0 včetně lze řízený proces pro účely návrhu číslicového řízení popsat posloupností vstupů a výstupů $\{D_{t_0+1}, D_{t_0+2}, \dots, D_{t_K}\}$. Tuto posloupnost označíme $D_{t_0+1}^{t_K}$. Žádný matematický model reálného procesu však nemůže dát takovou apriorní znalost $(D_{t_0+1}^{t_K})$ s absolutní přesností. Proto se pro popis řízeného procesu využívá určení hustoty pravděpodobnosti $p(D_{t_0+1}^{t_K} | D^{t_0})$, kde D^{t_0} značí znalost posloupnosti vstupů a výstupů do času t_0 , což je požadavek mírnější. Množina podmíněných hustot $p(Y_t | U_t, D^{t-1})$, pro $t = t_0 + 1, t_0 + 2, \dots, t_K$ je úplným pravděpodobnostním popisem řízeného procesu z hlediska vnějšího pozorovatele a poskytuje informaci o pravděpodobnosti s jakou po vstupu U_t bude následovat výstup Y_t za předpokladu, že se soustava od času t_0 do času $t-1$ chovala podle D^{t-1} . Po zavedení regresního vektoru Z_t , jako množiny pozorovaných vstupů a výstupů $Z_t = \{U_t, D_{t-t_0}^{t-1}\}$ můžeme

úplný popis řízeného procesu popsat jako $p(Y_t | Z_t)$, pro $t = t_h + 1, t_h + 2, \dots, t_K$. Pravděpodobnostní popis lze využít pro syntézu řízení spalování v práškových kotlích spalujících uhlí za účelem výroby elektrické a tepelné energie. Kritériem řízení může být například optimalizace emisí škodlivých látek vypouštěných do ovzduší, jako jsou NO_x a CO nebo optimalizace provozně-ekonomických parametrů, účinnosti kotle apod. V souladu s pravděpodobnostním přístupem k identifikaci, kdy chápeme neznámé veličiny jako veličiny náhodné, můžeme přistupovat k veličinám koncentrace NO_x ve spalínách za kotlem a koncentrace CO ve spalínách za kotlem v čase t jako k veličinám náhodným $\underline{\alpha}_t$, resp. $\underline{\beta}_t$. Je-li k dispozici zkoumaná soustava, tedy práškový kotel, respektive naměřená provozní data od času t_h do času t_K , lze náhodnou veličinu koncentraci NO_x ve spalínách za kotlem $\underline{\alpha}_t$ a náhodnou veličinu koncentraci CO ve spalínách za kotlem $\underline{\beta}_t$ popsat pomocí podmíněné pravděpodobnosti $p(Y_t | U_t, D^{t-1})$ resp. $Z_t = \{U_t, D_{t-t_h}^{t-1}\}$ jako $p(\alpha_t | Z_t)$ pro $\underline{\alpha}_t$ a $p(\beta_t | Z_t)$ pro $\underline{\beta}_t$, když $t = t_h + 1, t_h + 2, \dots, t_K$. t_h je časový horizont, který určuje rozsah dat, jež musíme pro dostatečně přesné určení podmíněné pravděpodobnosti $p(\alpha_t | Z_t)$, resp. $p(\beta_t | Z_t)$ znát. Na základě znalosti vstupních a výstupních dat mezi časy t_h do času t_K tedy vlastně určíme rozdělení podmíněné pravděpodobnosti pro náhodné veličiny $\underline{\alpha}_t$ a $\underline{\beta}_t$. Při stanovení struktury regresního vektoru je nutné uvažovat také ekonomické aspekty modelování. Čím bude model přesnější a složitější, tím porostou náklady na počet a rozsah experimentů (často spojené se ztrátami), náklady na přesnost a počet použitých přístrojů, na metody zpracování experimentálních údajů, což se v konečné bilanci promítne do ceny modelu soustavy. Pro modelování koncentrace emisí NO_x a CO ve spalínách za kotlem je tedy vhodné do regresního vektoru Z_t zahrnout jen ty měřitelné parametry, na kterých intenzita tvorby emisí NO_x a CO závisí nejvíce. Pro přehlednost je níže uveden význam jednotlivých parametrů regresního vektoru a jejich vliv na intenzitu tvorby škodlivých látek ve spalínách.

N^K [kg/s] - hmotnostní tok páry na výstupu z kotle (tzv. parní výkon). Tento parametr poskytuje informaci o aktuálním množství tepla generovaném kotlem a předávaném páře. Protože jsou parametry páry a napájecí vody (teplota a tlak) na vstupu a výstupu téměř neměnné, odráží tento parametr v důsledku informaci o množství energie přiváděné v palivu do kotle a při neměnné výhřevnosti paliva Q_i' o množství hořlaviny $\dot{m}_{PAL}^{daf}$ přiváděné v palivu do kotle.

$\dot{m}_{PAL}$ [kg/s] - hmotnostní tok paliva do kotle. Tento parametr je důležitý zejména z důvodu získání představy o dodávání energie ve formě paliva do jednotlivých míst kotle. V místě, kde do kotle přiváděno v poměru ke vzduchu více paliva je pravděpodobná zvýšená tvorba CO. Tato

důležitá informace však může na některých kotlích z důvodu absence měření hmotnostního toku paliva do kotle zcela chybět. Pokud je tento parametr k dispozici bývá většinou měřen nepřímo, tzn.

při předpokládané sypné hmotnosti paliva $\rho_{SHP} [kg/m^3]$ je dopočítáván ze změřené výšky vrstvy paliva $h_{PAL} [m]$ a otáček podavače paliva $n^{POD} [ot/min]$ podle vztahu

$$\dot{m}_{PAL} = \frac{n^{POD}}{60} \cdot o^{POD} \cdot S^{POD} \cdot \rho_{SHP}, \text{ kde } o^{POD} [m] \text{ je obvod řetězového kola podavače, } S^{POD} [m^2] \text{ je}$$

plocha zasypaného průřezu podavače palivem, která závisí na tvaru skříně podavače a určuje se z měřené výšky vrstvy paliva $h_{PAL} [m]$.

$I^{ML} [A]$ - proud na motoru mlýna. Tento parametr spolu s polohou návratové klapky v třídiči mlýna určuje jemnost mletí neboli zrnitost uhelného prášku dopravovaného do spalovací komory. U kotlů, kde je palivo sušeno ohřátým vzduchem, tento parametr určuje potřebný hmotnostní tok primárního vzduchu nutný k dopravě paliva z mlýna do spalovací komory. Čím větší je toto potřebné množství primárního vzduchu, tím vyšší je intenzita tvorby škodlivých látek NO_x . Vliv na jemnost mletí a tedy i na potřebné množství primárního vzduchu pro dopravu paliva do spalovací komory má u tlukadlových mlýnů také opotřebování tlukadel.

$\dot{m}_V [kg/s]$ - hmotnostní tok nasávaného vzduchu. Tento parametr určuje přebytek vzduchu λ ve spalovací komoře. Čím vyšší je přebytek vzduchu, tím vyšší je intenzita tvorby škodlivých látek NO_x a tím nižší je intenzita tvorby škodlivých látek CO . Tento parametr nemusí být u některých kotlů měřen. V takovém případě může být v regresním vektoru nahrazen například tlakem vzduchu za ohřívákem vzduchu p_V^{OLU} nebo velikostí přetlaku vzduchu za ohřívákem vzduchu Δp_V^{OLU} , který při určitém nastavení klapky spalovacího vzduchu informuje o množství nasávaného vzduchu. Požadovaného přetlaku vzduchu za ohřívákem vzduchu se dosahuje pomocí regulace tlaku vzduchu za ohřívákem vzduchu.

$\dot{m}_{PV} [kg/s]$ - hmotnostní tok primárního vzduchu. Tento parametr určuje míru okysličení jádra plamene. Jak bylo analogicky uvedeno výše, vyšší hmotnostní tok primárního vzduchu zvyšuje intenzitu tvorby škodlivých látek NO_x . Pokud tento parametr není měřen, lze jej nahradit například polohou klapky primárního vzduchu G^{KPV} , která při znalosti tlaku vzduchu za ohřívákem vzduchu p_V^{OLU} určuje průtok primárního vzduchu klapkou. U tlukadlových mlýnů lze správným nastavením klapky primárního vzduchu zajistit vhodné rozložení množství prášku přiváděného do různých míst kotle.

$\dot{m}_{JV} [kg/s]$ - hmotnostní tok jádrového vzduchu. Tento parametr stejně jako hmotnostní tok

primárního vzduchu určuje míru okysličení jádra plamene. Stejně jako u ostatního spalovacího vzduchu zvýšený hmotnostní tok jádrového vzduchu zvyšuje intenzitu tvorby škodlivých látek NO_x a snižuje intenzitu tvorby škodlivých látek CO. Důležitou úlohou jádrového vzduchu je ochlazování jádra plamene a snižování efektu struskování kotle. Pokud tento parametr není měřen, lze jej nahradit například polohou klapky jádrového vzduchu G^{KJ} , která při znalosti tlaku vzduchu za ohřívákem vzduchu p_V^{OLU} určuje průtok jádrového vzduchu klapkou.

$\dot{m}_{SV}$ [kg/s] - hmotnostní tok sekundárního vzduchu. Tento parametr určuje míru přebytku vzduchu v oblasti, do které je přiváděn, tj. obvykle za přívodem primárního a jádrového vzduchu ve smyslu průtoku spalin. Stejně jako u ostatního spalovacího vzduchu zvýšený hmotnostní tok sekundárního vzduchu zvyšuje intenzitu tvorby škodlivých látek NO_x a snižuje intenzitu tvorby škodlivých látek CO. Pokud tento parametr není měřen, lze jej nahradit například polohou klapky sekundárního vzduchu G^{KS} , která při znalosti tlaku vzduchu za ohřívákem vzduchu p_V^{OLU} určuje průtok sekundárního vzduchu klapkou.

$\dot{m}_{DV}$ [kg/s] - hmotnostní tok dohořivacího vzduchu. Tento parametr určuje míru přebytku vzduchu na konci ohniště slouží především k dohoření CO. Hmotnostní tok dohořivacího vzduchu má důležitou úlohu při hledání optimálního rozložení přívodu vzduchu do spalovací komory. Jeho správným využitím na úkor vzduchu přiváděného do jiného místa kotle lze výrazně snížit intenzitu tvorby škodlivých látek NO_x , přičemž je nutné dbát také na negativní vlivy, například na zvýšené zastruskování teplosměnných ploch v blízkosti ústí dohořivacího vzduchu vlivem vyšších teplot ve výstupním okně ohniště. Pokud tento parametr není měřen, lze jej nahradit například polohou klapky dohořivacího vzduchu G^{KD} , která při znalosti tlaku vzduchu za ohřívákem vzduchu p_V^{OLU} určuje průtok dohořivacího vzduchu klapkou.

$\dot{m}_{TV}$ [kg/s] - hmotnostní tok terciárního vzduchu. Tento parametr (pokud je terciární vzduch součástí technologie) určuje míru přebytku vzduchu v oblasti, do které je přiváděn, přičemž slouží především k dohoření strusky ve výsypce kotle. Stejně jako u ostatního spalovacího vzduchu zvýšený hmotnostní tok terciárního vzduchu zvyšuje intenzitu tvorby škodlivých látek NO_x a snižuje intenzitu tvorby škodlivých látek CO. Pokud tento parametr není měřen, lze jej nahradit například polohou klapky terciárního vzduchu G^{KT} , která při znalosti tlaku vzduchu za ohřívákem vzduchu p_V^{OLU} určuje průtok terciárního vzduchu klapkou.

Pro úplný popis pravděpodobnostního modelu koncentrace NO_x a CO ve spalinách za kotlem za účelem syntézy řízení a on-line identifikace technologického procesu s využitím naměřených dat na reálném zařízení zavedeme v čase proměnné zobecněné matice M_i , M_i^α , M_i^β a M_i^γ typu $n_p[1] \times$

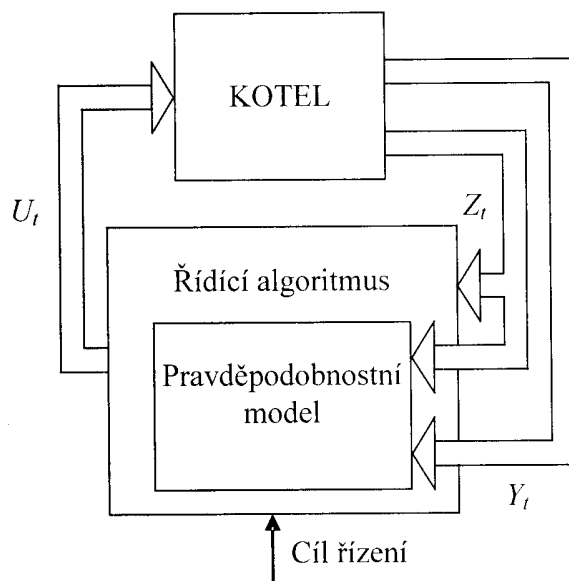
$n_p[2] \times n_p[3] \times \dots \times n_p[n_z]$, když n_z je počet prvků regresního vektoru a $n_p[i]$ je počet stavů, kterých může i -tý parametr regresního vektoru nabýt. Matice vstupních stavů M_t udává četnost, kolikrát ve vstupních datech od času počátku pozorování t_0 do času t nastal stav regresního vektoru s hodnotou ξ . Matice odhadu koncentrace NO_x ve spalínách za kouřovým ventilátorem M_t^α a matice odhadu koncentrace CO ve spalínách za kouřovým ventilátorem M_t^β vyjadřují odhad hodnoty náhodné veličiny α , resp. β ve smyslu minima čtverců odchylek pro stav regresního vektoru s hodnotou ξ . Dále pro náhodnou veličinu β zavedeme matici pravděpodobnosti stavu výstupu M_t^γ , když prvek této matice $M_t^\gamma(\xi)$ poskytuje odhad podmíněné pravděpodobnosti $\hat{p}(\beta \geq \beta_{krit} \mid Z_t^s = \xi)$, s jakou náhodná veličina β bude vyšší než určitá zvolená kritická hodnota β_{krit} za podmínky, že stav regresního vektoru nabude hodnoty ξ . Prvky matic, které mají stejnou pozici, odpovídají určitému unikátnímu stavu technologie. Stav technologie je tedy určen regresním vektorem Z_t , jehož parametry je pro potřeby zavedení matic nutné rozdělit do skupin, to znamená tzv. kvantovat. Počet stavů, na které lze rozdělit jednotlivé parametry musí být z důvodů zachycení důležitých závislostí dostatečně velký, tzn. kvantování musí být dostatečně jemné. S rostoucí jemností kvantování parametrů však rostou rozměry matic a tedy i objem dat, který se musí uložit. Z důvodů časové náročnosti výpočtů s velkými objemy dat a z důvodů omezení adresního prostoru potřebného pro ukládání matic je nutné jemnost kvantování omezit. Vlastní volba počtu stavů jednotlivých parametrů tak musí být vyváženým optimem zmíněných hledisek. Kvantování je tedy určitá forma zobrazení, jež označíme K , kdy přiřazením diskrétních hodnot z oboru hodnot $\varphi_{z[1]} \times \varphi_{z[2]} \times \varphi_{z[3]} \times \dots \times \varphi_{z[n_z]}$ spojitým parametrům regresního vektoru Z_t z oboru hodnot $S_{z[1]} \times S_{z[2]} \times S_{z[3]} \times \dots \times S_{z[n_z]}$ obdržíme stav regresního vektoru Z_t^s , $Z_t^s = K(Z_t)$, kde $\varphi_{z[i]}$ je množina hodnot, kterých může stav parametru regresního vektoru nabýt. Pro stav regresního vektoru Z_t^s tedy platí

$$Z_t^s = (z_t^s[1] \ z_t^s[2] \ \dots \ z_t^s[n_z])^T, \quad \text{kde}$$

$$z_t^s[i] \in \varphi_{z[i]} = \{1, 2, \dots, n_p[i]\}; \quad n_p[i] \in \mathbb{N}; \quad i = 1, 2, \dots, n_z; \quad t = t_0 + 1, t_0 + 2, \dots, t_k, \quad \text{když } \mathbb{N} \text{ je množina}$$

přirozených čísel. Pravděpodobnostní model koncentrace NO_x a CO byl využit pro syntézu řízení spalování v elektrárenských kotlích spalujících uhlí. Na obrázku X je blokové schéma navrženého optimalizačního algoritmu. Strategie řízení spalování podle nového algoritmu spočívá v nalezení optimálního nastavení U_t akčních členů pro daný stav spalování Z_t v kotli pomocí matic M_t , M_t^α , M_t^β a M_t^γ naučeného pravděpodobnostního modelu. Protože se charakteristiky spalování při

stejném stavu regresního vektoru Z_t^s mohou měnit, je vhodné pravděpodobnostní model koncentrací NO_x a CO ve spalínách za kotlem průběžně adaptovat.

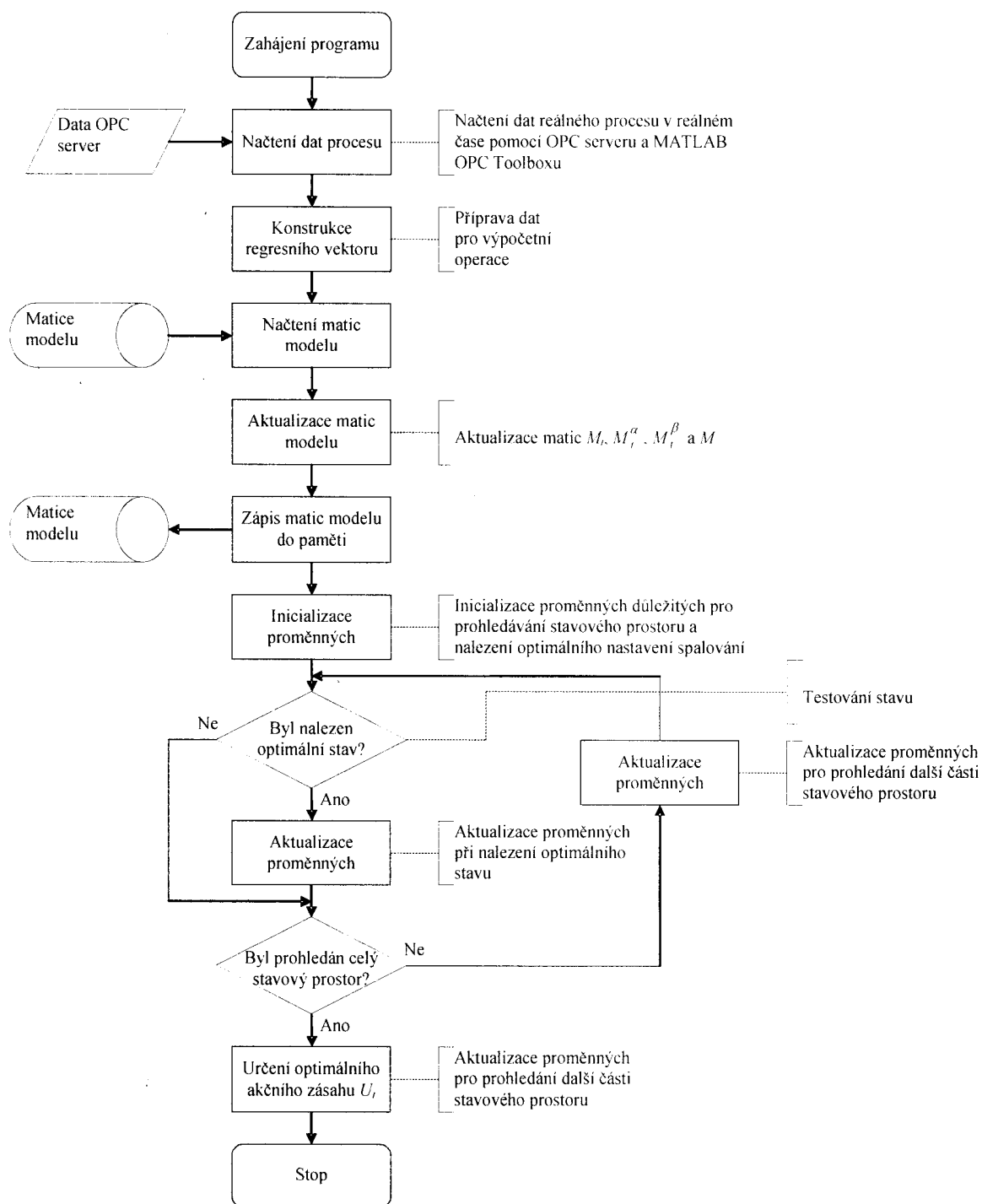


Obr. X – Blokové schéma řízení spalování

Algoritmus řízení pracuje podle vývojového diagramu (obr. Y), když pro každé vygenerování optimálního stavu provede následující operace:

- 1) Načtení stavu spalování v kotli Z_t a vektoru výstupů Y_t .
- 2) Přiřazení vektoru stavu regresního vektoru Z_t^s k regresnímu vektoru Z_t pomocí zobrazení K .
- 3) Fáze hledání optimálního stavu. V maticích M_t , M_t^α , M_t^β a M_t^γ je podle zvoleného optimalizačního kritéria hledán vektor akčních zásahů U . Optimalizační kritérium může být koncipováno například podle vývojového diagramu na obrázku Y.

Fáze hledání optimálního stavu. V maticích M_t , M_t^α , M_t^β a M_t^γ je podle zvoleného optimalizačního kritéria hledán stav vektoru akčních zásahů U_t^s .



Obr. Y – Vývojový diagram řídicího algoritmu podle normy ČSN ISO 5807

Přehled obrázků na výkresech

Na výkrese je na obr. 1 schematičsky znázorněno celé zařízení využívající způsobu dle vynálezu.

Příklady provedení vynálezu

Způsob řízení spalování s využitím pravděpodobnostního modelování důležitých provozních parametrů kotle, zejména koncentrace NO_x a CO ve spalinách za kotlem a zejména pro kotle na fosilní paliva v energetice, v příkladném provedení spočívá v průběžném měření parametrů spalování zejména hmotnostního toku páry na výstupu z kotle, tedy parního výkonu, hmotnostního toku paliva do kotle, proudu na motorech mlýna, hmotnostního či objemového toku nasávaného spalovacího vzduchu, hmotnostního toku primárního vzduchu do mlýna, hmotnostního toku jádrového vzduchu, hmotnostního toku sekundárního vzduchu, hmotnostního toku dohořivacího vzduchu, hmotnostního toku terciárního vzduchu, hmotnostního toku studeného vzduchu, hmotnostního toku spalin pro sušení paliva a dále průtoku vody, vzduchu, páry, paliva a dále teploty vody, páry, vzduchu, spalin a případně další teploty a dále koncentrace CO, NO_x, O₂ a pomocí naučeného pravděpodobnostního modelu plně určeného rozdělením pravděpodobnosti popsaným pomocí matic vytvořených z naměřených v čase proměnných veličin, tedy dat pro určení modelu a pro syntézu řízení, zejména pomocí stavových matic pravděpodobných výstupů a stavových matic četnosti výskytu technologie v určitém stavu, se nalézá optimální nastavení polohy akčních členů kotle tj. klapek spalovacího vzduchu primárního, sekundárního, jádrového, terciárního, dohořivacího, studeného a dalších, spalinových klapek pro sušení mlýna, dále se určuje množství paliva do kotle, tedy otáčky podavače paliva, výška vrstvy paliva, dále kvalita mletí mlýna tzv. zamletí mlýna, tedy proud na motoru mlýna, vstřikovací trysky reagentů pro selektivní nekatalytickou reakci pro redukci oxidů dusíku, vše pro požadovaný stav spalování, tedy podle požadovaného množství páry a jejich parametrů na výstupu z kotle, přičemž pravděpodobnostní model se současně průběžně adaptuje pro nalezení optimálního stavu spalování.

Způsob řízení spalování v dalším příkladném provedení spočívá v tom, že některá měření a některé akční členy jsou podle potřeby vynechány.

Způsob řízení spalování v jiném příkladném provedení spočívá v tom, že řízení množství paliva pro případ způsobu řízení, kdy množství paliva je řízeno přímo od tlaku páry, případně průtoku páry za kotlem, přičemž při poklesu tlaku páry jsou zvýšeny otáčky podavače paliva, je ponecháno nezměněné podle stávajícího algoritmu řízení.

Způsob řízení spalování v dalším příkladném provedení spočívá v tom, že řízení množství paliva pro případ způsobu řízení, kdy množství paliva je řízeno přímo od proudu na motoru mlýna a množství primárního vzduchu je řízeno přímo od tlaku páry, případně průtoku páry za kotlem, přičemž při poklesu tlaku páry je zvýšen průtok primárního vzduchu vyfukujícího uhelný prášek z mlýna, je ponecháno nezměněné podle stávajícího algoritmu řízení.

U způsobu řízení spalování v jiném příkladném provedení je použita strategie spočívající v řízení na maximální účinnost a/nebo řízení na optimální emise, tedy optimální poměr NOx a CO a/nebo řízení na jiné optimální parametry, např. teplotu ve spalovací komoře a koncentraci CO ve spalovací komoře, kvůli struskování.

Zařízení pro výše uvedený způsob řízení spalování v příkladném provedení má kotel 1 zejména kotel na fosilní paliva, mlýn 2, sušku 3, podavač paliva 4, výparník 5, přehřívák páry 6, ohřívák 7 vzduchu 8 a ohřívák vody 9, které jsou opatřeny čidly pro průběžné měření parametrů spalování, zejména nejméně jedním čidlem 10 hmotnostního toku páry 7 na výstupu z kotle 1, tedy parním výkonem, nejméně jedním čidlem 11 hmotnostního toku paliva 4 do kotle 1, nejméně jedním čidlem 12 proudu 13 na motorech 39 mlýna 2, nejméně jedním čidlem 14 hmotnostního toku nasávaného spalovacího vzduchu 15, nejméně jedním čidlem 16 hmotnostního toku primárního vzduchu 17 do mlýna 2, nejméně jedním čidlem 18 hmotnostního toku jádrového vzduchu 19, nejméně jedním čidlem 20 hmotnostního toku sekundárního vzduchu 21, nejméně jedním čidlem 22 hmotnostního toku dohořivacího vzduchu 23, nejméně jedním čidlem 24 hmotnostního toku terciárního vzduchu 25, nejméně jedním čidlem 26 hmotnostního toku studeného vzduchu 27, nejméně jedním čidlem 28 hmotnostního toku spalin pro sušení uhlého prášku 29 a dále nejméně jedním čidlem 30 teploty vody 31, nejméně jedním čidlem 32 teploty páry 33, nejméně jedním čidlem 34 teploty vzduchu 35, nejméně jedním čidlem 36 teploty spalin 37 a případně čidly dalších teplot a dále nejméně jedním čidlem 38 koncentrace CO 39 ve spalinách, nejméně jedním čidlem 40 koncentrace NOx 41 ve spalinách a nejméně jedním čidlem 42 koncentrace O₂ 43 ve spalinách a dále DA/AD převodníkem 44, pamětí 45, řídicí jednotkou 46, opatřenou pravděpodobnostním modelem 47 a dále je opatřen ovládáním akčních členů kotle 1, tedy ovladači, zejména nejméně jedním ovladačem 48 klapky spalovacího vzduchu primárního 49, nejméně jedním ovladačem 50 klapky spalovacího vzduchu jádrového 51, nejméně jedním ovladačem 52 klapky spalovacího vzduchu sekundárního 53, nejméně jedním ovladačem 54 klapky spalovacího vzduchu dohořivacího 55, nejméně jedním ovladačem 56 klapky spalovacího vzduchu terciárního 57, nejméně jedním ovladačem 58 klapky studeného vzduchu 59, nejméně jedním ovladačem 60 spalinových klapky pro sušení uhlí 61 a dalších, dále nejméně jedním ovladačem 62 otáček 63 podavače paliva 4 a dále nejméně jedním ovladačem 64 proudu na motoru 39 mlýna 2 a nejméně jedním ovladačem 65 trysek 66 pro selektivní nekatalytickou reakci pro redukci oxidů dusíku.

Průmyslová využitelnost

Způsob řízení procesu s využitím pravděpodobnostního modelování důležitých provozních

parametrů zařízení lze využít i při jiných složitých procesech nejen v energetice, ale například i v chemickém průmyslu, v bitechnologických procesech, potravinářství, farmaceutické výrobě atd.

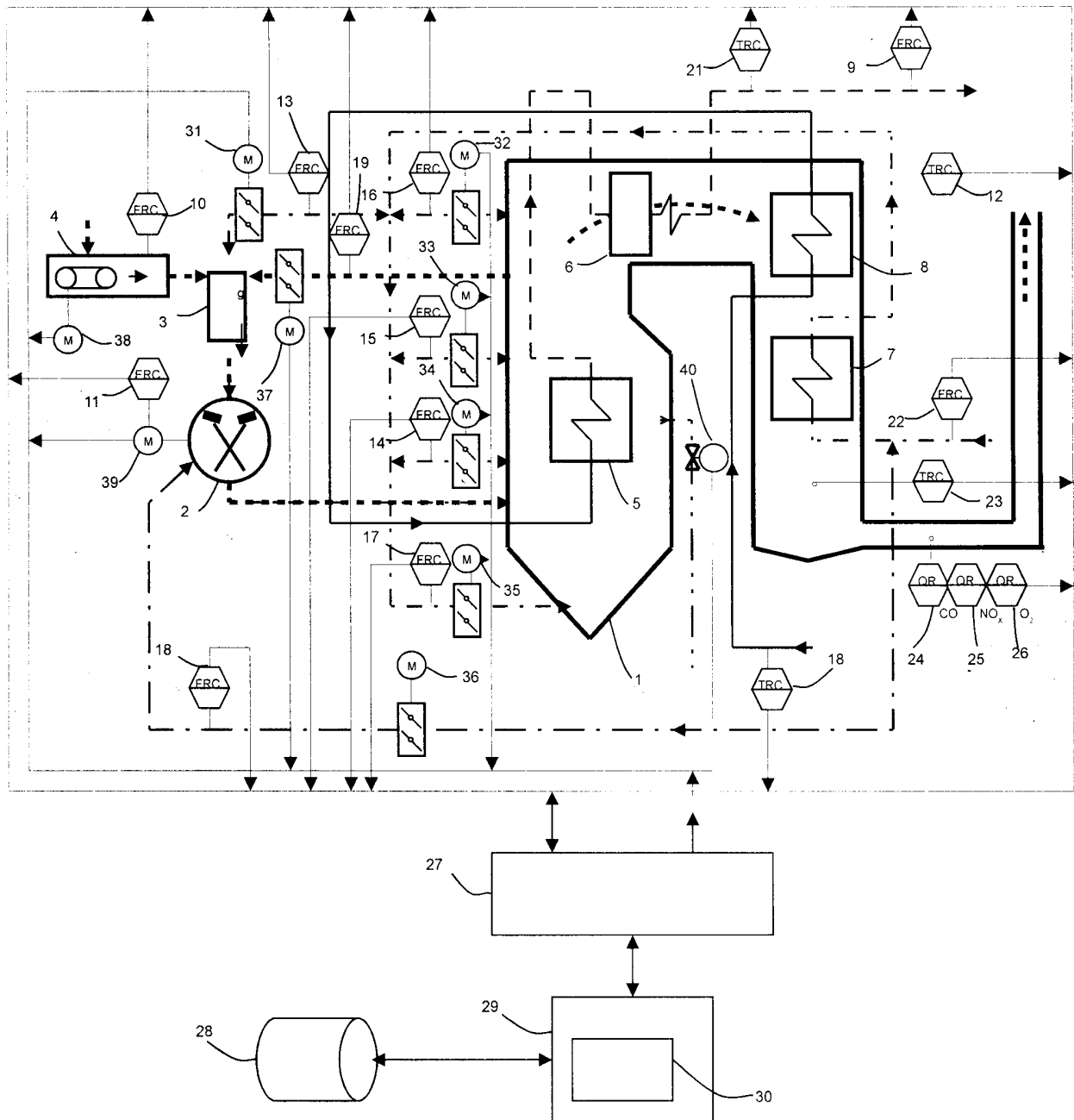
Seznam vztahových značek

- 1 kotel
- 2 mlýn
- 3 suška
- 4 podavač paliva
- 5 výparník
- 6 přehřívák páry
- 7 ohřívák vzduchu
- 8 ohřívák vody
- 9 čidlo hmotnostního toku páry
- 10 čidlo hmotnostního toku paliva
- 11 čidlo proudu
- 12 čidlo hmotnostního toku nasávaného spalovacího vzduchu
- 13 čidlo hmotnostního toku primárního vzduchu
- 14 čidlo hmotnostního toku jádrového vzduchu
- 15 čidlo hmotnostního toku sekundárního vzduchu
- 16 čidlo hmotnostního toku dohořivacího vzduchu
- 17 čidlo hmotnostního toku terciárního vzduchu
- 18 čidlo hmotnostního toku studeného vzduchu
- 19 čidlo hmotnostního toku spalin pro sušení uhelného prášku
- 20 čidlo teploty vody
- 21 čidlo teploty páry
- 22 čidlo teploty vzduchu
- 23 čidlo teploty spalin
- 24 čidlo koncentrace CO
- 25 čidlo koncentrace NOx
- 26 čidlo koncentrace O2
- 27 převodník DA/AD
- 28 paměť
- 29 řídicí jednotka
- 30 pravděpodobnostní model
- 31 ovladač klapek spalovacího vzduchu primárního
- 32 ovladač klapek spalovacího vzduchu jádrového
- 33 ovladač klapek spalovacího vzduchu sekundárního
- 34 ovladač klapek spalovacího vzduchu dohořivacího
- 35 ovladač klapek spalovacího vzduchu terciárního
- 36 ovladač klapek spalovacího vzduchu studeného
- 37 ovladač klapek spalin pro sušení uhlí
- 38 ovladač otáček
- 39 ovladač proudu na motor
- 40 ovladač trysek

1. Způsob řízení spalování s využitím pravděpodobnostního modelování důležitých provozních parametrů kotle, zejména koncentrace NO_x a CO ve spalinách za kotlem a zejména pro kotle na fosilní paliva v energetice, v y z n a č u j í c í s e t í m , ž e se provádí průběžně měření parametrů spalování zejména hmotnostního toku páry na výstupu z kotle, tedy parní výkon, hmotnostního toku paliva do kotle, proudu na motorech mlýna, hmotnostního či objemového toku nasávaného spalovacího vzduchu, hmotnostního toku primárního vzduchu do mlýna, hmotnostního toku jádrového vzduchu, hmotnostního toku sekundárního vzduchu, hmotnostního toku dohořivacího vzduchu, hmotnostního toku terciárního vzduchu, hmotnostního toku studeného vzduchu, hmotnostního toku spalin pro sušení uhlí a dále průtoku vody, vzduchu, páry, paliva a dále teploty vody, páry, vzduchu, spalin a případně další teploty a dále koncentrace CO, NO_x, O₂ a pomocí naučeného pravděpodobnostního modelu plně určeného rozdělením pravděpodobnosti popsaným pomocí matic vytvořených z naměřených v čase proměnných veličin, tedy dat pro určení modelu a pro syntézu řízení, zejména pomocí stavových matic pravděpodobných výstupů a stavových matic četnosti výskytu technologie v určitém stavu, se nalézá optimální nastavení polohy akčních členů kotle tj. klapek spalovacího vzduchu primárního, sekundárního, jádrového, terciárního, dohořivacího, studeného a dalších, spalinových klapek pro sušení uhlí, dále se určuje množství paliva do kotle, tedy otáčky podavače paliva, výška vrstvy paliva, dále kvalita mletí mlýna tzv. zamletí mlýna, tedy proud na motoru mlýna, vstřikovací trysky reagentů pro selektivní nekatalytickou reakci pro redukci oxidů dusíku, vše pro požadovaný stav spalování, tedy podle požadovaného množství páry a jejich parametrů na výstupu z kotle, přičemž pravděpodobnostní model se současně průběžně adaptuje pro nalezení optimálního stavu spalování.
2. Způsob řízení spalování podle nároku 1, v y z n a č u j í c í s e t í m , ž e některá měření a některé akční členy jsou podle potřeby vynechány.
3. Způsob řízení spalování podle nároku 1 a 2, v y z n a č u j í c í s e t í m , ž e řízení množství paliva pro případ způsobu řízení, kdy množství paliva je řízeno přímo od tlaku páry, případně průtoku páry za kotlem, přičemž při poklesu tlaku páry jsou zvýšeny otáčky podavače paliva, je ponecháno nezměněné podle stávajícího algoritmu řízení.
4. Způsob řízení spalování podle nároku 1 a 2, v y z n a č u j í c í s e t í m , ž e řízení množství paliva pro případ způsobu řízení, kdy množství paliva je řízeno přímo od proudu na motoru mlýna a množství primárního vzduchu je řízeno přímo od tlaku páry, případně průtoku páry za kotlem, přičemž při poklesu tlaku páry je zvýšen průtok primárního vzduchu vyfukujícího uhelný prášek z mlýna, je ponecháno nezměněné podle stávajícího algoritmu řízení.

5. Způsob řízení spalování podle nároku 1, 2 a 3 nebo 4, v y z n a č u j í c í s e t í m, ž e j e použita strategie spočívající v řízení na maximální účinnost a/nebo řízení na optimální emise, tedy optimální poměr NOx a CO a/nebo řízení na jiné optimální parametry, např. teplotu ve spalovací komoře a koncentraci CO ve spalovací komoře, kvůli struskování.
6. Zařízení pro způsob řízení spalování podle nároku 1 až 4, v y z n a č u j í c í s e t í m, ž e kotel (1) zejména kotel na fosilní paliva, mlýn (2), suška (3), podavač paliva (4), výparník (5), přehřívák páry (6), ohřívák vzduchu (7) a ohřívák vody (8) jsou opatřeny čidly pro průběžné měření parametrů spalování, zejména nejméně jedním čidlem (9) hmotnostního toku páry (10) na výstupu z kotle (1), tedy parním výkonem, nejméně jedním čidlem hmotnostního toku paliva (11) do kotle (1), nejméně jedním čidlem proudu (12) na motorech (39) mlýna (2), nejméně jedním čidlem (13) hmotnostního toku nasávaného spalovacího vzduchu (14), nejméně jedním čidlem hmotnostního toku primárního vzduchu (15) do mlýna (2), nejméně jedním čidlem hmotnostního toku jádrového vzduchu (16), nejméně jedním čidlem hmotnostního toku sekundárního vzduchu (17), nejméně jedním čidlem hmotnostního toku dohořivacího vzduchu (18), nejméně jedním čidlem (19) hmotnostního toku terciárního vzduchu (20), nejméně jedním čidlem hmotnostního toku studeného vzduchu (21), nejméně jedním čidlem hmotnostního toku spalin pro sušení uhlého prášku (22) a dále nejméně jedním čidlem teploty vody (23), nejméně jedním čidlem teploty páry (24), nejméně jedním čidlem teploty vzduchu (25), nejméně jedním čidlem teploty spalin (26) a případně čidly dalších teplot a dále nejméně jedním čidlem koncentrace CO (27) ve spalinách, nejméně jedním čidlem koncentrace NOx (28) ve spalinách a nejméně jedním čidlem koncentrace O₂ (29) ve spalinách a dále DA/AD převodníkem (30), pamětí (31), řídicí jednotkou (32), opatřenou pravděpodobnostním modelem (33) a dále je opatřen ovládáním akčních členů kotle (1), tedy ovladači, zejména nejméně jedním ovladačem klapky spalovacího vzduchu primárního (34), nejméně jedním ovladačem (35) klapky spalovacího vzduchu jádrového (36), nejméně jedním ovladačem (37) klapky spalovacího vzduchu sekundárního (38), nejméně jedním ovladačem (39) klapky spalovacího vzduchu dohořivacího (40), nejméně jedním ovladačem (41) klapky spalovacího vzduchu terciárního (42), nejméně jedním ovladačem (43) klapky spalovacího vzduchu studeného (44), nejméně jedním ovladačem (45) spalinových klapky pro sušení uhlí (46) a dalších, dále nejméně jedním ovladačem (47) otáček (48) podavače paliva (4) a dále nejméně jedním ovladačem (49) proudu na motoru (50) mlýna (2) a nejméně jedním ovladačem (51) trysek (52) pro selektivní nekatalytickou reakci pro redukci oxidů dusíku.

1/1



Obr. 1