

PATENTOVÝ SPIS

(11) Číslo dokumentu:

304 253

(13) Druh dokumentu: **B6**

(51) Int. Cl.:

F23N 5/10 (2006.01)

F23N 5/18 (2006.01)

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLVÉHO
VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: **2011-601**
(22) Přihlášeno: **27.09.2011**
(30) Právo přednosti:
27.09.2011 CZ
(40) Zveřejněno: **05.06.2013**
(Věstník č. 23/2013)
(47) Uděleno: **18.12.2013**
(24) Oznámení o udělení ve věstníku: **29.01.2014**
(Věstník č. 5/2014)

(56) Relevantní dokumenty:

CZ 20032262 A; 63602; 63603; 63604.

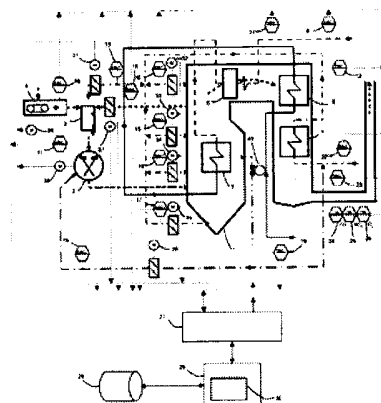
(73) Majitel patentu:
I & C Energo a. s., Třebíč, CZ

(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 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 nalezení optimálního stavu spalování.



CZ 304253 B6

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

5 Oblast techniky

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

10

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 popsaný v dokumentu CZ PV 2003 2262 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, jadrového, terciárního, dohořivacího, studeného), klapky spalín 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 pravděpodobným modelem. Algoritmus volí taková nastavení klapek, která jsou pro daný stav technologie určený 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 NOx 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 NOx a CO určuje například takové nastavení klapek, pro které jsou pravděpodobné emise NOx nejnížší a pravděpodobnost, že emise CO překročí určitý zvolený limit (např. 200mg/m³) nesmí překročit zvolenou mez (například 50 %). Způsob řízení spalování s využitím pravděpodobnostního modelování důležitých provozních parametrů kotle, zejména koncentrace NOx a CO ve spalínách 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, NOx, 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 NOx a CO a/nebo řízení na jiné optimální parametry, např. teplotu ve spalovací komoře a koncentrace 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 spalínách, čidlem koncentrace NOx ve spalínách a čidlem koncentrace O₂ ve spalínách 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, ovlada-

čem 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 spalínových 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 elektrárnenských 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 elektrárnenských 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 rozlození 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 složitého 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 spalín a další. Vznik škodlivých látek (např. CO a NOx) 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 číslicovým regulátorem R , který má možnost na ni působit prostřednictvím časové posloupnosti číselného n_t -rozměrného vektoru U_t . Na soustavě S lze dále měřením získat časovou posloupnost n_t -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 $Z_t = \{U_t, D^{t-1}_{t_{th}}\}$ můžeme úplný popis řízeného procesu popsat jako $p(Y_t | Z_t)$, pro $t = t_h + 2, \dots, t_K$. Pravděpodobnostní popis lze využít pro syntézu řízení spalování v práškových kotlích spalujících uhlí za účelem výroby elektrické a tepelné energie. Kritérium řízení může být například optimalizace emisí škodlivých látek vypouštěných do ovzduší, jako jsou NOx 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 NOx ve spalínách za kotlem a koncentraci CO ve spalínách za kolem 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 NOx 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. $Z_t = \{U_t, D^{t-1}_{t_{th}}\}$ 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 NOx a CO ve spalínách za kotlem je tedy vhodné do regresního vektoru Z_t zahrnout jen ty měřitelné parametry, na kterých intenzita tvorby emisí NOx 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_r^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 je 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 nepřímou, tzn. při předpokládané sypané hmotnosti paliva ρ_{SHP} [kg/m³] je dopočítáván ze změřené výšky vrstvy paliva h_{PAL} [m] a otáček podavače paliva n^{POD} [ot/min] podle vztahu

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

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 uhlénoho 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
5 potřebné množství primárního vzduchu, tím vyšší je intenzita tvorby škodlivých látek NOx. 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 NOx 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^{OLU}_V nebo velikostí přetlaku vzduchu za ohřívákem vzduchu Δp^{OLU}_V , 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.
15

$\dot{m}_{pV} [kg/s]$ – 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 NOx. Pokud tento parametr není měřen, lze jej nahradit například polohou klapky primárního vzduchu G^{KPV} , která při znalosti tlaku vzduchu za ohřívákem vzduchu p^{OLU}_V určuje průtok primárního vzduchu klapkou. U tlukadlových mlýnů lze správným nastavením klapky primárního vzduchu zajistit vhodné rozložení množství prášku přiváděného do různých míst kotle.
25

$\dot{m}_{jV} [kg/s]$ – 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 NOx 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^{KJV} , která při znalosti tlaku vzduchu za ohřívákem vzduchu p^{OLU}_V určuje průtok jádrového vzduchu klapkou.
30

$\dot{m}_{sV} [kg/s]$ – 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 spalín. Stejně jako u ostatního spalovacího vzduchu zvýšený hmotnostní tok sekundárního vzduchu zvyšuje intenzitu tvorby škodlivých látek NOx a snižuje intenzitu tvorby škodlivých látek CO. Pokud tento parametr není měřen, lze jej nahradit například polohou klapky sekundárního vzduchu G^{KSV} , která při znalosti tlaku vzduchu za ohřívákem vzduchu p^{OLU}_V určuje průtok sekundárního vzduchu klapkou.
35
40

$\dot{m}_{dV} [kg/s]$ – hmotnostní tok dohřívacího vzduchu. Tento parametr určuje míru přebytku vzduchu na konci ohniště, slouží především k dohoření CO. Hmotnostní tok dohřívacího 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 NOx, přičemž je nutné dbát také na negativní vlivy, například na zvýšené zastruskování teplosměnných ploch v blízkosti ústí dohřívacího vzduchu vlivem vyšších teplot ve výstupním okně ohniště. Pokud tento parametr není měřen, lze jej nahradit například polohou klapky dohřívacího vzduchu G^{KDV} , která při znalosti tlaku vzduchu za ohřívákem vzduchu p^{OLU}_V určuje průtok dohřívacího vzduchu klapkou.
45
50

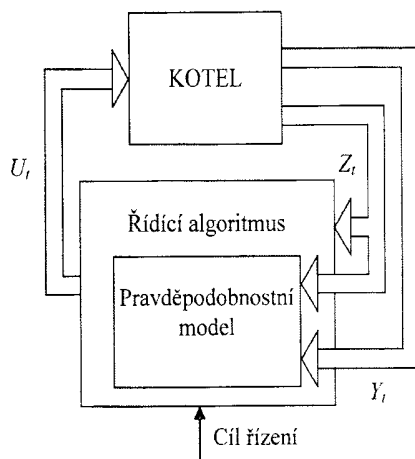
$\dot{m}_{tV} [kg/s]$ – hmotnostní tok terciárního vzduchu. Tento parametr (pokud je terciární vzduch součástí technologie) určuje míru přebytku vzduchu v oblasti, do které je přiváděn, přičemž slouží především k dohoření strusky ve výsypce kotle. Stejně jako u ostatního spalovacího vzduchu zvýšený hmotnostní tok terciárního vzduchu zvyšuje intenzitu tvorby škodlivých látek NOx a
55

snižuje intenzitu tvorby škodlivých látek CO. Pokud tento parametr není měřen, lze jej nahradit například polohou klapky terciárního vzduchu G^{KTV} , která při znalosti tlaku vzduchu za ohřívákem vzduchu p^{OLU}_v určuje průtok terciárního vzduchu klapkou.

- 5 Pro úplný popis pravděpodobného modelu koncentrace NOx a CO ve spalínách 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_t , M_t^α , M_t^β a M_t' 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
- 10 ve vstupních datech od času počátku pozorování t_0 do času t nastal stav regresního vektoru s hodnotou ζ . Matice odhadu koncentrace NOx 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 ζ . Dále pro náhodnou veličinou β zavedeme matici pravděpodobnosti stavu výstupu
- 15 M_t' , když prvek této matice $M_t'(\zeta)$ poskytuje odhad podmíněné pravděpodobnosti $\hat{p}(\beta \geq \beta_{krit} | Z_t^s = \zeta)$, s jakou náhodná veličina β bude vyšší než určitá zvolená kritická hodnota β_{krit} za podmínky, že stav regresního vektoru nabude hodnoty ζ . 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.
- 20 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 adresného prostoru potřebného pro ukládání matic je nutné jemnost kvantování omezit. Vlastní volba počtu
- 25 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

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

- 30 $z_t^s[i] \in \varphi_{z[i]} = \{1, 2, \dots, n_p[i]\}$, $n_p[i] \in \mathbb{N}$; $i = 1, 2, \dots, n_z$; $t = t_0 + 1, t_0 + 2, \dots, t_k$, když $\mathbb{N}$ je množina přirozených čísel. Pravděpodobnostní model koncentrace NOx a CO byl využit pro syntézu řízení
- 35 spalování v elektrárnenských 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 , M^α , M^β a M' naučeného pravděpodobnostního modelu. Protože se charakteristiky spalování při stejném stavu regresního vektoru Z_t mohou měnit, je vhodné pravděpodobnostní
- 40 model koncentrací NOx 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:

5

1) Načtení stavu spalování v kotli Z_t a vektoru výstupů Y_t .

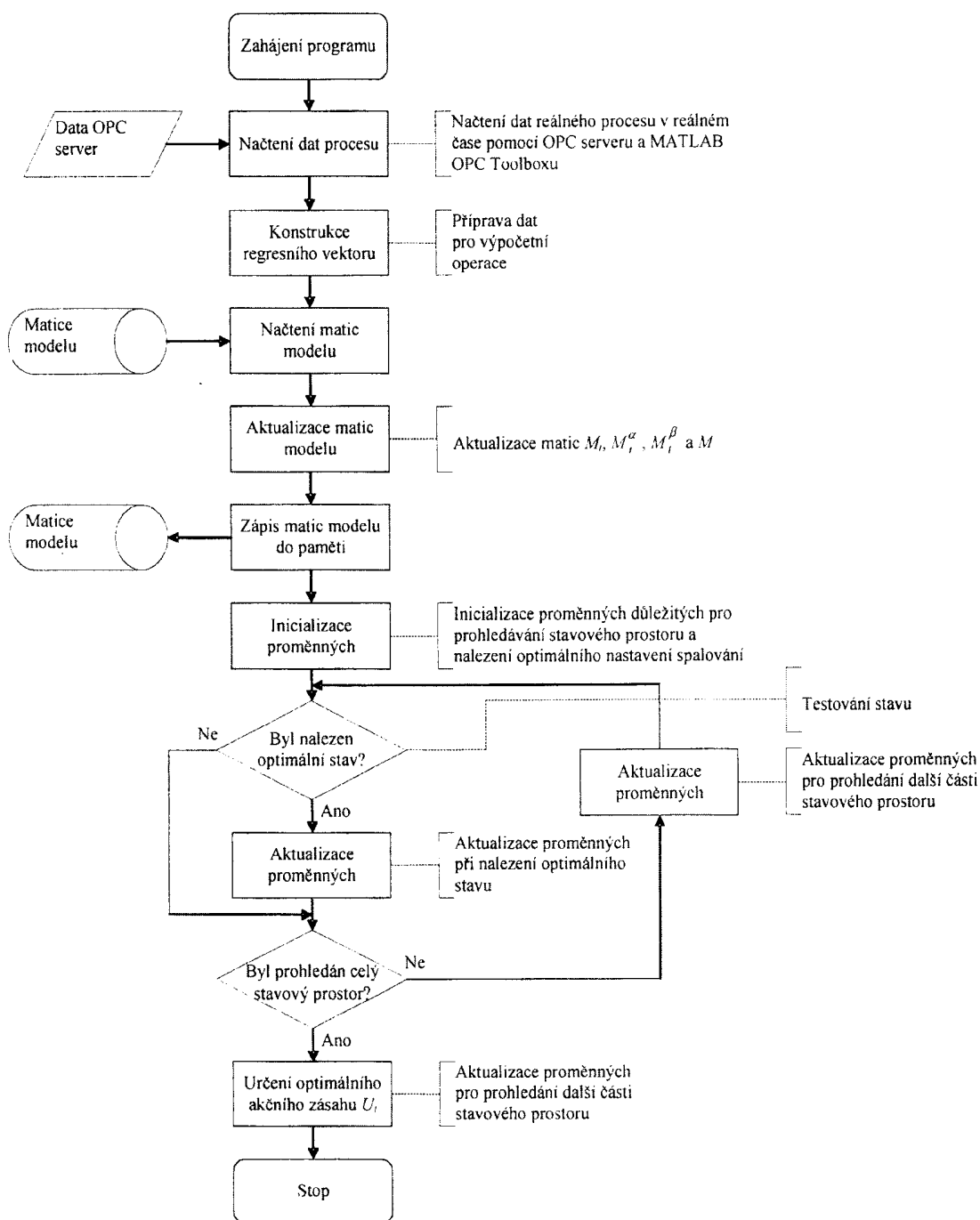
2) Přiřazení vektoru stavu regresního vektoru Z_t^* k regresnímu vektoru Z_t pomocí zobrazení K .

10

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

15



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

5

Přehled obrázků na výkresech

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

10

Příklady provedení vynálezu

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, v příkladném provedení spočívá v průběžném měření parametrů spa-

15

- lování 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 dohořívacího 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. klapky spalovacího vzduchu primárního, sekundárního, jádrového, terciárního, dohořívacího, studeného a dalších, spalinových klapky 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 NO_x 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 4 paliva, výparník 5, přehřívák 6 páry, ohřívák 7 vzduchu a ohřívák 8 vody, které jsou opatřeny čidly pro průběžné měření parametrů spalování, zejména nejméně jedním čidlem 9 hmotnostního toku páry na výstupu z kotle 1, tedy parním výkonem, nejméně jedním čidlem 10 hmotnostního toku paliva do kotle 1, nejméně jedním čidlem 11 proudu na motoru mlýna 2, nejméně jedním čidlem 12 hmotnostního toku nasávaného spalovacího vzduchu, nejméně jedním čidlem 13 hmotnostního toku primárního vzduchu do mlýna 2, nejméně jedním čidlem 14 hmotnostního toku jádrového vzduchu, nejméně jedním čidlem 15 hmotnostního toku sekundárního vzduchu, nejméně jedním čidlem 16 hmotnostního toku dohořívacího vzduchu, nejméně jedním čidlem 17 hmotnostního toku terciárního vzduchu, nejméně jedním čidlem 18 hmotnostního toku studeného vzduchu, nejméně jedním čidlem 19 hmotnostního toku spalin pro sušení uhelného prášku a dále nejméně jedním čidlem 20 teploty vody, nejméně jedním čidlem 21 teploty páry, nejméně jedním čidlem 22 teploty vzduchu, nejméně jedním čidlem 23 teploty spalin a případně čidly dalších teplot a dále nejméně jedním čidlem 24 koncentrace CO ve spalinách, nejméně jedním čidlem 25 koncentrace NO_x ve spalinách a nejméně jedním čidlem 26 koncentrace O₂ ve spalinách a dále DA/AD převodníkem 27, pamětí 28, řídicí jednotkou 29, opatřenou pravděpodobnostním modelem 30 a dále je opatřen

ovládáním akčních členů kotle 1, tedy ovladači, zejména nejméně jedním ovladačem 31 klapek spalovacího vzduchu primárního, nejméně jedním ovladačem 32 klapek spalovacího vzduchu jádrového, nejméně jedním ovladačem 33 klapek spalovacího vzduchu sekundárního, nejméně jedním ovladačem 34 klapek spalovacího vzduchu dohořivacího, nejméně jedním ovladačem 35 klapek spalovacího vzduchu terciárního, nejméně jedním ovladačem 36 klapek studeného vzduchu, nejméně jedním ovladačem 37 spalinových klapek pro sušení uhlí a dalších, dále nejméně jedním ovladačem 38 otáček podavače 4 paliva a dále nejméně jedním ovladačem 39 proudu na motoru mlýna 2 a nejméně jedním ovladačem 40 trysek 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 biotechnologických procesech, potravinářství, farmaceutické výrobě atd.

PATENTOVÉ NÁROKY

1. 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, **vyznačující se tím**, že 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 spalín pro sušení uhlí a dále průtoku vody, vzduchu, 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, tedy pomocí vstupně-výstupního popisu soustavy, tedy pomocí n -rozměrných matic, kde n je počet parametrů modelu, tedy matic, které se vytváří pomocí historických dat, když každá buňka matice odpovídající příslušné buňce stavového prostoru vyjadřuje diskrétní hustotu pravděpodobnosti $p(z_t)$, kde z_t je stav systému, tedy hustotu pravděpodobnosti, pomocí kteréž se při znalosti stavu z_t stanoví pravděpodobná hodnota výstupu, tedy například koncentrace CO, NO_x ve spalínách a/nebo parametry ovlivňující účinnost, například koncentrace O₂, CO ve spalínách, teplota spalín za kotlem, nedopal ve strusce a v popílku, tedy hustotu pravděpodobnosti, která se na základě každé další změřené hodnoty a změřeného stavu na příslušném místě adaptuje, tedy takto vytvářeného pravděpodobnostního modelu, pomocí kteréhož se na základě vyčíslení diskrétní hustoty pravděpodobnosti $p(z_t)$ příslušného stavu z_t nalézá optimální kombinace polohy akčních členů jako celku, nikoliv nezávisle na sobě, tedy 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, nebo kombinace jejich libovolného počtu, při kterých se některé akční členy vynechávají, 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 optimální kombinace polohy akčních členů jako celku.

2. Způsob řízení spalování podle nároku 1, **vyznačující se tím**, 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, se ponechává nezměněné.

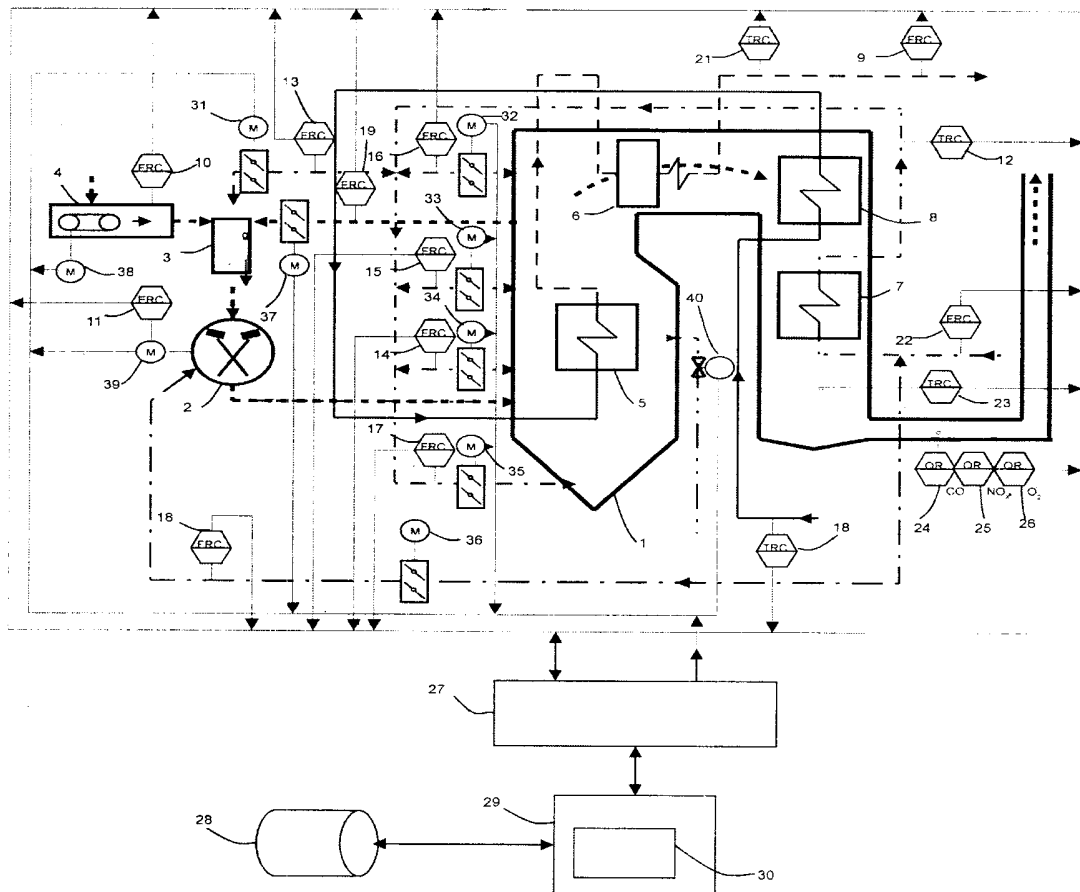
3. Způsob řízení spalování podle nároku 1, **vyznačující se tím**, že řízení množství paliva pro případ způsobu řízení, kdy množství paliva je řízeno přímo od proudu na motoru mlýna a množství primárního vzduchu je řízeno přímo od tlaku páry, případně průtoku páry za kotlem, přičemž při poklesu tlaku páry je zvýšen průtok primárního vzduchu vyfukujícího uhelný prášek z mlýna, se ponechává nezměněné.

4. Způsob řízení spalování podle nároků 1, 2 nebo 3, **vyznačující se tím**, že se použije strategie spočívající v řízení na maximální účinnost, tedy řízení, pro které se průběžně v programových cyklech nejprve zjišťuje stav systému z_t , načež se ukládá v maticích popisujících rozdělení pravděpodobnosti parametrů ovlivňujících účinnost kotle, tedy parametrů koncentrace O_2 ve spalínách, koncentrace CO ve spalínách, teplota spalin za kotlem, nedopal ve strusce a v popílku, a tím se nalézá optimální kombinace nastavení akčních členů jako celku, a/nebo řízení na optimální emise, tedy optimální poměr NO_x a CO, tedy řízení, pro které se nejprve zjišťuje stav systému z_t , načež se v uložených maticích popisujících rozdělení pravděpodobnosti parametrů koncentrace CO, NO_x a O_2 ve spalínách nalézá optimální kombinace nastavení akčních členů jako celku, a/nebo řízení na jiné optimální parametry, např. teplotu ve spalovací komoře a koncentraci CO ve spalovací komoře, kvůli struskování.

5. Zařízení k provádění způsobu řízení spalování podle nároků 1 až 4 sestávající z kotle (1), zejména z kotle na fosilní paliva, z mlýnu (2), sušky (3), podavače (4) paliva, výparníku (5), přehříváku (6) páry, ohříváku (7) vzduchu, ohříváku (8) vody a z prostředků řízení, **vyznačující se tím**, že obsahuje čidla pro průběžné měření parametrů spalování, zejména nejméně jedno čidlo (9) hmotnostního toku páry na výstupu z kotle (1), tedy parního výkonu, nejméně jedno čidlo (10) hmotnostního toku paliva do kotle (1), a dále obsahuje čidla pro průběžné měření parametrů spalování, zejména nejméně jedno čidlo (11) proudu na motoru mlýna (2), nejméně jedno čidlo (12) hmotnostního toku nasávaného spalovacího vzduchu, nejméně jedno čidlo (13) hmotnostního toku primárního vzduchu do mlýna (2), nejméně jedno čidlo (14) hmotnostního toku jádrového vzduchu, nejméně jedno čidlo (15) hmotnostního toku sekundárního vzduchu, nejméně jedno čidlo (16) hmotnostního toku dohořívacího vzduchu, nejméně jedno čidlo (17) hmotnostního toku terciárního vzduchu, nejméně jedno čidlo (18) hmotnostního toku studeného vzduchu, nejméně jedno čidlo (19) hmotnostního toku spalin pro sušení uhelného prášku a dále nejméně jedno čidlo (20) teploty vody, nejméně jedno čidlo (21) teploty páry, nejméně jedno čidlo (22) teploty vzduchu, nejméně jedno čidlo (23) teploty spalin a případně čidla dalších teplot a dále nejméně jedno čidlo (24) koncentrace CO ve spalínách, nejméně jedno čidlo (25) koncentrace NO_x ve spalínách a nejméně jedno čidlo (26) koncentrace O_2 ve spalínách a dále DA/AD převodník (27), paměť (28), řídicí jednotku (29), opatřenou pravděpodobnostním modelem (30) a dále obsahuje ovládání akčních členů kotle (1), tedy ovladače, zejména nejméně jeden ovladač (31) klapky spalovacího vzduchu primárního, nejméně jeden ovladač (32) klapky spalovacího vzduchu jádrového, nejméně jeden ovladač (33) klapky spalovacího vzduchu sekundárního, nejméně jeden ovladač (34) klapky spalovacího vzduchu dohořívacího, nejméně jeden ovladač (35) klapky spalovacího vzduchu terciárního, nejméně jeden ovladač (36) klapky spalovacího vzduchu studeného, nejméně jeden ovladač (37) spalinových klapky pro sušení uhlí a další, dále nejméně jeden ovladač (38) otáček podavače (4) paliva a dále nejméně jeden ovladač (39) proudu na motoru mlýna (2) a nejméně jeden ovladač (40) trysek pro selektivní nekatalytickou reakci pro redukci oxidů dusíku.

Seznam vztahových značek:

	1	kotel
	2	mlýn
	3	suška
5	4	podavač paliva
	5	výparník
	6	přehřívák páry
	7	ohřívák vzduchu
	8	ohřívák vody
10	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
15	14	čidlo hmotnostního toku jádrového vzduchu
	15	čidlo hmotnostního toku sekundárního vzduchu
	16	čidlo hmotnostního toku dohořívacího vzduchu
	17	čidlo hmotnostního toku terciárního vzduchu
	18	čidlo hmotnostního toku studeného vzduchu
20	19	čidlo hmotnostního toku spalín pro sušení uhlého prášku
	20	čidlo teploty vody
	21	čidlo teploty páry
	22	čidlo teploty vzduchu
	23	čidlo teploty spalín
25	24	čidlo koncentrace CO
	25	čidlo koncentrace NO _x
	26	čidlo koncentrace O ₂
	27	převodník DA/AD
	28	paměť
30	29	řídící jednotka
	30	pravděpodobnostní model
	31	ovladač klapky spalovacího vzduchu primárního
	32	ovladač klapky spalovacího vzduchu jádrového
	33	ovladač klapky spalovacího vzduchu sekundárního
35	34	ovladač klapky spalovacího vzduchu dohořívacího
	35	ovladač klapky spalovacího vzduchu terciárního
	36	ovladač klapky spalovacího vzduchu studeného
	37	ovladač klapky spalín pro sušení uhlí
	38	ovladač klapky
40	39	ovladač proudu na motor
	40	ovladač trysek



Obr. 1

Konec dokumentu