

F23N 1/04 (2006.01)
F24H 8/00 (2006.01)

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLOVÉHO
VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: **2011-701**
(22) Přihlášeno: **04.11.2011**
(40) Zveřejněno: **15.05.2013**
(Věstník č. 20/2013)
(47) Uděleno: **29.08.2018**
(24) Oznámení o udělení ve věstníku: **10.10.2018**
(Věstník č. 41/2018)

(56) Relevantní dokumenty:

DE 19841256 A; JP S5589624 A; JP H07113502 A; EP 1219906 A.

(73) Majitel patentu:
Mendelova univerzita v Brně, Brno, CZ

(72) Původce:
Ing. Martin Fajman, Ph.D., Brno, CZ
Ing. Jirí Čupera, Ph.D., Brno, CZ
Ing. Jirí Votava, Ph.D., Bystré u Poličky, CZ

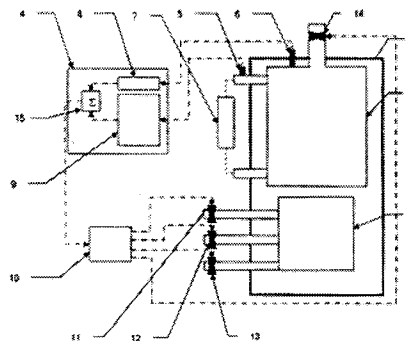
akčním členem (14) odtahu spalin, a jednak potrubí pro připojení teplosměnného média přímo k topné soustavě (7). Kotel obsahuje ještě topeniště (3), do něhož je vyvedeno potrubí primárního vzduchu, potrubí sekundárního vzduchu a potrubí dodávky paliva, a je opatřen shora popsaným systémem pro regulaci výkonu kotle na tuhá paliva a výstupní teploty teplosměnného média.

(54) Název vynálezu:

Systém pro regulaci výkonu kotle na tuhá paliva a zároveň výstupní teploty teplosměnného média a kotel na tuhá paliva s tímto systémem regulace

(57) Anotace:

Systém pro regulaci výkonu kotle na tuhá paliva a zároveň výstupní teploty teplosměnného média ohřívávaného ve výměníku (2) kotle obsahující čidlo (5) teploty výstupu teplosměnného média, regulátor (4) obsahující PID modul (9) regulátoru procesní veličiny připojený svým vstupem na výstup z čidla (5) teploty výstupu teplosměnného média, a převodník (10) signálu, jehož podstata spočívá v tom, že dále obsahuje čidlo (6) teploty výstupu spalin z kotle, akční člen (11) sekundárního vzduchu, akční člen (12) dodávky paliva, akční člen (13) primárního vzduchu a akční člen (14) odtahu spalin, každý připojený na jeden z výstupů převodníku (10) signálu, a sumátor (15), přičemž regulátor (4) zahrnuje ještě modul (8) zesílení dynamiky regulátoru připojený svým vstupem na výstup z čidla (6) teploty výstupu spalin, přičemž každý z modulů (8, 9) je svým výstupem připojený na vstup sumátoru (15), a sumátor (15) je svým výstupem připojený na převodník (10) signálu pro převod výstupu regulátoru (4) na signály pro akční člen (11) sekundárního vzduchu, akční člen (12) dodávky paliva, akční člen (13) primárního vzduchu a akční člen (14) odtahu spalin. Kotel (1) na tuhá paliva obsahující výměník (2) spalin, na něž jsou napojena jednak potrubí pro odtah spalin s implementovaným



Systém pro regulaci výkonu kotle na tuhá paliva a zároveň výstupní teploty teplosměnného média a kotel na tuhá paliva s tímto systémem regulace

5 Oblast techniky

Vynález se týká systému pro regulaci topenišť na pevná paliva, přičemž zároveň umožňuje konkretizaci požadavku na výstupní teplotu teplosměnného média. Umožňuje tedy připojení kotle přímo do topné soustavy bez nutnosti akumulárního mezizásobníku i v topných soustavách s požadavkem na ekvitermní regulaci.

Dosavadní stav techniky

15 Současný stav regulace soustav kotlů malých a středních výkonů k vytápění objektů se opírá o provoz vlastního topeniště blízko jeho maximálního výkonu s tím, že následná regulace výkonu topného systému je řešena prostřednictvím dostatečné kapacity akumulátoru tepla vřazeného do topné soustavy.

20 Tento způsob vyžaduje značné prostorové i finanční nároky na pořízení jak topeniště, tak akumulární nádrže, přičemž tyto jsou často osazeny různými regulačními systémy a je nutno je nastavovat buď zvlášť, nebo doplňovat další nadstavbovou regulací.

25 Z důvodu minimalizace emisí dle požadavků příslušných norem jsou moderní kotle na tuhá paliva vybaveny aktivními prvky pro řízení dodávky spalovacího vzduchu (zpravidla primární, sekundární či terciární) nebo odtahu spalin či jejich kombinací včetně automatické či poloautomatické dodávky paliva, čištění teplosměnných ploch a odvodu popela z topeniště. V této kombinaci řídicích prvků (akčních členů) jsou schopny dlouhodobého, téměř bezobslužného provozu v širším rozsahu poskytovaného aktuálního topného výkonu.

30 Moderní automatické a poloautomatické kotle na tuhá paliva tak umožňují poměrně velký výkonový rozsah vlastního topeniště – 30 až 100 % maximálního topného výkonu. Kromě výkonové regulace dle aktuálních podmínek odběru tepla může být uživatelem požadována i vazba na ekvitermní regulaci topného systému objektu. Stávající systémy regulace, resp. způsob získávání hodnot regulační veličiny však takové zapojení kotle přímo do topné soustavy nedovolují.

40 Proto ve stávajících systémech je regulován výkon topeniště blízko jeho maximálního výkonu a téměř bez ohledu na výstupní teplotu teplosměnného média je teplo z topeniště dodáváno do akumulárního zásobníku, z něhož je prostřednictvím směšovacích ventilů dodáváno do topné soustavy dle požadavků topného výkonu a kvalitativních ukazatelů (vstupní a výstupní teploty teplosměnného média v topné soustavě). V praxi tak jsou potřeba dva regulační systémy (kotle a hospodaření tepla v akumulátoru), dochází ke ztrátám v akumulátoru a nutnosti směšování teplosměnného média topné soustavy na výstupu a vratce. Oba regulační systémy se v praxi 45 zpravidla opírají o nezávislé PID regulátory ve standardní formě (viz obr. 1).

Toto uspořádání omezuje zejména nutná konstrukce vlastního kotle, a to z důvodu vysokého obsahu těkavé hořlaviny v palivech z biomasy. Zpravidla jsou teplosměnné plochy spalinových výměníků co do celkové plochy i objemu značně větší než u kotlů na jiná (tuhá) paliva srovnatelného výkonu. Zvětšené rozměry výměníků vedou k jejich větší tepelné kapacitě, stejně tak ve zvětšeném objemu teplosměnné kapaliny, což se projevuje negativně v nárůstu hystereze vlastního kotle. Ve spojení s hysterezí topné soustavy je tedy značně komplikované dodržení přesnosti regulace výstupního výkonu, resp. výstupní teploty z kotle pouze jedním regulátorem.

Obecné regulační modely zahrnují celou řadu metod, které je možno modifikovat a kombinovat pro konkrétní aplikace. Volba vhodného typu regulace závisí na mnoha parametrech, přičemž mezi základní z nich patří vlastní technický proces, typ regulované, resp. regulovaných veličin, doba odezvy systému, komplexnost veličin ovlivňujících sledovaný proces a v neposlední řadě i finanční náročnosti realizace regulace. Se vzrůstající požadovanou relativní přesností a komplexností regulace roste samozřejmě ekonomická náročnost realizace vlastního regulačního procesu.

V technické praxi se pro regulaci jednotlivých veličin, případně jejich vzájemných kombinací používají PID regulátory. Pro komplexnější systémy se širokou skupinou veličin ovlivňujících sledovaný proces (např. i sociodemografický) se často používají Model Predictive Controllers (MPC), popř. fuzzy regulace či neuronové sítě.

MPC či další uvedené regulační metody sice představují alternativy současné praxi, avšak jejich robustnost, cenová i realizační náročnost, resp. vysoké nároky na udržování, limitují jejich nasazení na rozsáhlé aplikace, kde finanční profit z kvalitní třídy regulace saturuje vysoké pořizovací a udržovací náklady. Pro relativně jednoduchá zařízení s požadavkem na spolehlivé a bezúdržbové řešení tak v oblasti běžné technické praxe zajišťují regulaci zpravidla PID regulátory.

PID regulátor je komplexní spojité regulátor, který je díky využívání proporcionální (P), integrační (I) i derivační složky (D) ve vzájemně definovatelné „síle“ účinku, resp. vzájemného účinku, poměrně univerzální pro regulaci řady veličin. V praxi existují i modifikace s vyloučením některých složek (např. PI-regulátor, PD-regulátor). Základní schéma PID regulátoru je znázorněno na obr. 1.

Matematický zápis uvedeného schématu má následující tvar:

$$u(t) = MV(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (1)$$

kde:

K_p – je koeficient proporcionální složky,

K_i – koeficient integrační složky,

K_d – koeficient derivační složky,

e – odchylka regulační veličiny (error= e = Set point – ProcessValue)

t – čas nebo okamžitý čas

Rovnice (1) udává tzv. paralelní formu regulátoru s důsledným oddělením jednotlivých složek regulátoru, zatímco tzv. standardní forma (viz vzorec (2)), pracuje s celkovým zesílením a vyžitím integračního a derivačního času.

$$MV(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right) \quad (2)$$

kde navíc:

T_i – je integrační čas,

T_d – je derivační čas.

Z uvedených rovnic je zřejmé, že $K_i = K_p / T_i$ a $K_d = K_p \cdot T_d$, tedy obě formy jsou lehce zaměnitelné. Časové vyjádření lze interpretovat tak, že čím delší bude integrační čas (čas, za který se započte přírůstek/úbytek odchylek), tím menší bude mít integrační složka vliv na výstup regulátoru,

zatímco při delším derivačním čase vliv derivační složky roste, což lze shrnout nastavením koeficientů u paralelní formy přímo.

Historie PID regulátoru sahá až do předminulého století, a jak se vyvíjely technické systémy (analogové, digitální), tak i technická praxe zaznamenala řadu modifikací regulátoru, resp. jeho optimalizaci pro zvolené oblasti nasazení. Proto často bývá (zejména u analogových systémů nebo jednoduchých digitálních kontrolérů) využíváno u proporcionální a derivační složky vlastní procesní veličiny (vlivu jejích změn v rámci regulačního procesu) místo odchylek (veličina e je nahrazena PV - „process value“, tedy hodnotou regulované veličiny procesu, v prvním nebo posledním, případně obou členech výše uvedených rovnic).

V rámci aplikace teoretického regulátoru do konkrétního nasazení je kritickým bodem vhodné zvolení parametrů regulátoru (konstant K_p , K_i , K_d , resp. K_p , T_i , T_d). Postup jejich vhodného nastavení, tzv. *tuning*, má řadu teoretických i praktických přístupů.

Je samozřejmě možné dosáhnout výsledku ručním návrhem a optimalizací na již fungujícím systému. Avšak matematicky byla popsána řada variant teoretického přístupu, které mohou vést k rychlejší, popř. přesnější volbě parametrů (např. Ziegler–Nichols Metod, Cohen–Coon). Postup je založen na heuristické analýze procesu, zpravidla zjednodušením regulátoru a snaze dosáhnout jistý stav systému. Např. Ziegler-Nichols doporučili využít P regulátor procesu a provést zesílení tak, aby došlo k oscilaci systému, přičemž prakticky změřená oscilační perioda vede k dopočtu dalších parametrů následně uplatněného PID regulátoru. Moderní systémy mají optimalizační algoritmy zahrnuté přímo v regulátoru a jsou označovány jako „autotuning“.

Pro procesy, kde dochází k značnému rozsahu PV, resp. kde je chování systému (odezev) závislé na absolutní velikosti PV, bývá uplatňován postup tzv. škálovatelného PID (scale PID), kdy pro jednotlivé, předem zvolené, rozsahy PV aplikuje regulátor soustavu parametrů z pole o n -hodnotách pro n -intervalů PV. Nastavení takového regulátoru však vyžaduje provést n -tuning operací.

Z praxe je však známa řada omezení, kdy tradiční PID regulace nedává optimální výsledky. Zároveň je popsána i řada metod k modifikaci PID při specifických nestandardních odezvách.

Zejména u dlouhých reakčních časů odezev systému selhávají klasické metody tuningu PID regulátoru (např. Ziegler–Nichols Method), protože prakticky není možné získat oscilační periodu, zvláště u komplexních systémů. Při větším rozsahu PV není též nastavení regulátoru optimální v celém regulačním rozsahu.

Právě pro dlouhodobé reakční časy systému, kdy dochází ke značným výkyvům v chování regulovaného systému – kotle i topné soustavy, resp. vnějších parametrů ovlivňujících systém, a pro relativně velký rozsah regulace aktuálního výkonu s požadavkem na dodržení žádané výstupní teploty teplosměnného média je navržen systém zapojení kotle přímo do topné soustavy pomocí specifického zapojení měřicích čidel a doplnění regulace kotle.

V německém patentu DE 19841256 (Viesmann Werke KG) je popsána regulace teploty teplosměnného média z teplosměnného výměníku pro řešení dlouhých časových odezev regulovaného systému, byť pro velmi snadno regulovatelný zdroj tepla, pravděpodobně plynového hořáku, který lze v průběhu regulace úplně vypnout, což není možné u topeniště na tuhá paliva. Pro zlepšení funkce regulátoru v celém požadovaném rozsahu je dosažená výstupní teplota porovnávána kromě požadované výstupní teploty teplosměnného média s dalšími předem stanovenými teplotními mezemi (pět hranic intervalů). Podle aktuální teploty teplosměnného média je dle předem stanoveného algoritmu rozhodováno, ve kterém teplotním intervalu se regulovaná soustava nachází a předem je definováno chování regulátoru soustavy, resp. přímo výkonové omezení zdroje tepla. Jedná se tedy ve své podstatě o škálovatelný PID regulátor, který stále, byť v odezvě přesněji, závisí pouze na jedné procesní veličině. Uvedené řešení však není schopno zajistit spojitě řešení regulace v celém rozsahu pro topeniště na bázi kotle na tuhá paliva, jehož výkon nelze regulovat v tak krátkých časových intervalech nebo v rámci regulace vlastního výměníku přímo vypnout. Zařízení pro regulaci výstupní teploty teplosměnného média zahrnuje regulátor signálů obsahující PID modul, převodník signálů a čidlo teploty výstupu teplosměnného média.

Proto systém regulace dle tohoto vynálezu je aplikován na topeniště biomasou, kde základní regulované veličiny, ovlivňující okamžitý výkon topeniště, jsou dodávka paliva a regulace průtoku vzdušnin (zpravidla primární, sekundární vzduch a odtah spalin). Okamžitý odebíraný topný výkon pak modifikuje výstupní teploty teplosměnného média, při snaze uspokojit požadovaný topný výkon soustavou (např. topným systémem při poklesu vnější teploty) je možno dodat žádaný výkon při konstantním průtoku média na nekonečném množství teplotních hladin. Cílem návrhu je možnost teplotní hladinu výstupní teploty z topeniště regulovat tak, aby mohlo být využito ekvitermní regulace nebo prostého požadavku uživatele a zároveň, aby reálně došlo k dodávce aktuálně požadovaného topného výkonu (rovnovážnému stavu) bez zbytečné hystereze (přetápění objektu).

Protože i vlastní topeniště vykazuje značnou tepelnou kapacitu a setrvačnost (např. objem a tepelná kapacita teplosměnného média, celková hmotnost a kapacita teplosměnných ploch výměníků, hmota pláště topeniště apod.), lze i v rámci regulace vlastního procesu hoření očekávat značnou hysterezi. Podobné vlastnosti má také topná soustava, jejíž hystereze logicky roste s jejím rozsahem, tepelnou kapacitou objektu a intenzitou využívání.

Cílem návrhu regulace je tak vytvořit takový systém připojení kotle a způsob úpravy regulace, který bude:

- vykazovat vysokou třídu přesnosti regulace,
- schopen agilně reagovat na dynamické změny v systému velkého rozsahu (např. skoková změna set point),
- minimalizovat vlastní hystereze topeniště, resp. omezovat působení hysterezí topného systému,
- tím minimalizovat překmit soustavy,
- představovat relativně jednoduché, potenciálně tedy relativně ekonomicky dostupné technické řešení bez nutnosti akumulace tepla v mezizásobníku.

Idea návrhu vychází z toho, že většina reálných soustav (s větším rozsahem regulace) vykazuje řadu parametrů (veličin), které ovlivňují její chování. V podstatě neexistuje ryze diskrétní systém, kdy PV (v popisovaném případě teplota teplosměnného média na výstupu z kotle) je jen jedním snadno identifikovatelným parametrem, ovlivňujícím chování soustavy a na jehož změny je vhodné regulační systém na bázi PID optimalizovat. Zároveň při delších časových odezvách systému (relativně vyjádřeno – řadově desítky až stovky sekund při vzorkování po sekundách) dochází ke změnám systémových veličin ovlivňujících vlastní PV a za tento časový úsek mohou změny být významné. Při nalezení referenčních veličin, které chování PV bezprostředně ovlivňují, pak umožňuje odhadovat budoucí chování PV a zpřesnit vlastní regulaci systému.

Jedná se tedy o elementární verzi prediktivní regulace. Pokud je sledovaných ovlivňujících veličin malý počet a jejich vazby jsou alespoň částečně předem známy, bylo by možné aplikovat fuzzy regulaci, ovšem její realizace jednoduchým technickým systémem bez komplikované a finančně náročné SW a HW podpory je velmi omezená. Při komplexní znalosti systému, všech jeho vazeb by také bylo možné použít Model Predictive Controllers, ty jsou však nasazovány na velké komplexní systémy, kde vyžadují dlouhodobé studium chování systému a následně poměrně náročnou údržbu i značnou softwarovou i hardwarovou podporu.

Pro realizaci regulace u topenišť biomasou se zpravidla jako základní regulační (procesní) veličina volí výstupní teplota teplosměnného média, která zároveň ovlivňuje aktuálně dodávaný topný výkon. Při nalezení další – referenční – veličiny, jejíž změny ovlivňují teplotu výstupu teplosměnného média, je možno odhadnout budoucí trend vývoje výstupní teploty teplosměnného média i při dynamické změně požadavku na dodávaný topný výkon.

Snahou je tedy nalézt takový způsob uspořádání systému sběru řídicích veličin (procesní a referenční) – jejich připojení, modifikaci pro využití v regulaci včetně úpravy způsobu regulace, aby výše zmíněných cílů bylo dosaženo. Dále je nutno dosáhnout optimalizace práce PID regulátoru, např. již nasazených PID regulátorů v konkrétních systémech, aby kromě vlastních změn v PV byl schopen reagovat na zásadní veličinu, popř. veličiny, která chování PV reálně ovlivňuje při zachování relativní nenáročnosti PID regulace pro svůj rozsah menší či individuální

aplikace. U běžných systémů je zpravidla jednoduché takovou veličinu identifikovat, komplikovanější bývá identifikovat míru a způsob jejího vlivu, přesto i tento lze při znalosti dané problematiky odhadnout. Konkrétně u topenišť, aby kromě vlastních změn teploty výstupu teplosměnného média byl schopen reagovat na změny referenční veličiny – teploty výměníku spaliny/teplosměnné médium či teploty spalin.

Vlastní návrh modifikace PID může mít obecnou platnost, byl však iniciován a optimalizován na konkrétní aplikaci topeniště biomasou, kde se plně prokázala jeho funkčnost. Proto bude ve vysvětlení principu návrhu použito tohoto praktického příkladu tak, aby byl vlastní záměr návrhu zřejmý.

Praktický přístup se opírá o nutnost regulovat výkon topeniště tak, aby výstupní teplota teplosměnného média z výměníku topeniště byla na požadované hodnotě. U topenišť na tuhá paliva (konkrétně na biomasu) je i při relativně malých výkonech (desítky kW) potřeba značných rozměrů teplosměnných ploch s velkou mírou vlastní tepelné setrvačnosti, přitom i teplosměnné médium (voda, popř. glykolové směsi) vykazuje vysokou tepelnou kapacitu. Úloha regulace výstupní teploty teplosměnného média z takového topeniště je tak komplexní, neboť musí postihnout okamžitý odebíraný tepelný výkon z topeniště (který je neznámý), musí postihnout vlastnosti paliva a způsob jeho hoření a vlastnosti výměníku, resp. jeho tepelnou setrvačnost a zároveň tepelnou setrvačnost okruhu odběru topného výkonu, resp. jeho hysterezi.

Z teoretického rozboru je zřejmé, že teplota výměníku spaliny/voda do značné míry ovlivňuje jednak potenciální dosažitelnou a jednak okamžitou teplotu výstupu teplosměnného média z výměníku. Teplo akumulované v hmotě výměníku tak představuje energetický potenciál, avšak jeho hodnota se v závislosti na regulované veličině taktéž značně mění a do procesní veličiny se promítá s neznámým zpožděním. Např. v průběhu zatápní bude teplota spalinového výměníku růst nízkým tempem, protože podstatná část výkonu topeniště bude spotřebována na zvýšení teploty teplosměnného média. Naopak při zahřátí kotle na provozní režim bude stejný topný výkon již plně k dispozici pro vlastní topnou soustavu a změny na teplotě spalinového výměníku předznamenávají chování soustavy: při zvýšení požadavku na topný výkon teplota spalinového výměníku relativně signifikantně klesá, naopak při plné saturaci odebíraného výkonu začíná teplota spalinového výměníku zdánlivě bezdůvodně růst, přičemž PV roste velmi pomalu nebo dokonce v některých režimech práce klesá. Jako referenční veličina tedy teplota spalin/spalinového výměníku jednoznačně ukazuje na další chování PV regulátoru.

Vlastní regulátor je proto realizován jako PID regulátor s PV ve formě výstupní teploty teplosměnného média (při neznámé vstupní teplotě teplosměnného média – vratky a okamžitého odebíraného topného výkonu) a zesílení dynamiky reakce regulátoru vnější referenční veličinou je realizováno prostřednictvím teploty výměníku, resp. spalin na konci výměníku, neboť tato je určující pro potenciální dostupnou teplotu teplosměnného média.

40 Podstata vynálezu

Cílem vynálezu je navrhnout takový systém pro regulaci, jež by umožnil dosažení možnosti regulovat topný výkon kotle na biomasu (tuhá paliva) přímo a umožnil připojení do soustav s ekvitermní regulací, a které zároveň nevyžaduje instalaci akumulčního zásobníku topného média.

Výše uvedené nedostatky odstraňuje systém pro regulaci výkonu kotle na tuhá paliva a zároveň výstupní teploty teplosměnného média, kdy systém obsahuje čidlo teploty výstupu teplosměnného média, regulátor obsahující PID modul regulátoru procesní veličiny připojený svým vstupem na výstup z čidla teploty výstupu teplosměnného média, a převodník signálu, jehož podstata spočívá v tom, že systém dále obsahuje čidlo teploty výstupu spalin z kotle, na výstupy převodníku signálu připojený akční člen sekundárního vzduchu, akční člen dodávky paliva, akční člen primárního vzduchu a akční člen odtahu spalin, kde regulátor dále zahrnuje modul zesílení dynamiky regulátoru připojený svým vstupem na výstup z čidla teploty výstupu spalin, a sumátor, kde každý z modulů je svým výstupem připojený na vstup sumátoru, sumátor

je svým výstupem připojený na převodník signálu pro převod výstupu regulátoru na signály pro akční člen sekundárního vzduchu, akční člen dodávky paliva, akční člen primárního vzduchu a akční člen odtahu spalin.

- 5 Předmětem vynálezu je i kotel na tuhá paliva, který obsahuje výměník spalin, na nějž jsou napojena jednak potrubí pro odtah spalin s implementovaným akčním členem odtahu spalin a potrubí pro připojení teplosměnného média přímo k topné soustavě, dále kotel obsahuje topeniště, do něhož je vyvedeno potrubí primárního vzduchu s implementovaným akčním členem primárního vzduchu, potrubí sekundárního vzduchu s implementovaným akčním členem sekundárního vzduchu a potrubí dodávky paliva s implementovaným akčním členem dodávky paliva, vyznačující se tím, že dále obsahuje systém pro regulaci výkonu kotle na tuhá paliva a zároveň výstupní teploty teplosměnného média popsany výše.

- 15 Podstatnou inovací v řešení je zavedení alespoň jedné další regulační veličiny kotle, jako referenční veličiny pro regulátor a její paralelní zavedení do regulačního systému kotle (vlastní připojení a úprava signálu). Referenční veličina působí jako další složka regulátoru, přičemž zvyšuje kvalitu regulace zvýšením dynamiky regulátoru.

- 20 Výhodou tohoto řešení je snížení hystereze celé regulované soustavy, zejména však vlastního teplosměnného výměníku kotle. Výstup regulátoru na úrovni 0 až 100 % je převeden na akční členy regulace vlastního topeniště (zpravidla pro rozsah 30 až 100 % nominálního výkonu topeniště). Akčními veličinami v závislosti na konstrukci jsou nejčastěji přívod primárního a sekundárního vzduchu, popř. regulace odtahu spalin, a přívod paliva.

- 25 Toto řešení se dále vyznačuje možností (nikoliv nutností) připojení kotle přímo, bez akumulárního zásobníku tepla, do topné soustavy, přičemž dále umožňuje využití ekvitermní regulace soustavy díky zvýšené přesnosti regulace a snížení hystereze kotle i celé topné soustavy.

- 30 Uvedené řešení umožňuje současně regulovat odebíraný topný výkon, protože ten je dán rozdílem výstupu a vratky teplosměnného média, ale zároveň regulaci PV na zvolenou teplotu i tedy dosažení vhodné teploty pro soustavy s ekvitermní regulací. Řešení tak umožňuje připojení kotle přímo do soustav s ekvitermní regulací bez nutnosti akumulace tepla a soustav směšovačů.

- 35 Výhodou je, že pro konkrétní řešení je možno využít standardních teplotních čidel (termočlánky, Pt100, Pt500 apod.), lze využít stávající regulátory a jejich výstup modifikovat o signál referenční veličiny, nebo celou soustavu regulátoru přepracovat v dostupných mikroprocesorech (např. ATM), či provést vnějším softwarovým řešením.

40 Objasnění výkresů

- Vynález bude blíže vysvětlen pomocí výkresu, na kterém znázorňuje obr. 1 základní schéma PID regulátoru, obr. 2 zapojení pro regulaci výkonu a zároveň výstupní teploty teplosměnného média, a obr. 3 průběh zvolené funkce dynamické limitace ($I_{\text{range}} = 100$)

45

Příklady uskutečnění vynálezu

- 50 Systém pro regulaci topeniště s přesnou regulací výstupní teploty teplosměnného média podle tohoto vynálezu bude osvětlen pomocí několika výhodných provedení, které však nemají z hlediska rozsahu ochrany žádný omezující vliv.

- 55 Předmětem systému pro regulaci výkonu je volba a zapojení signálu referenční veličiny, pomocí níž je provedena modifikace PID regulátoru zajišťující při širokém regulačním rozsahu generovaného výkonu, resp. výstupní teploty teplosměnného média z kotle na biomasu,

odpovídající kvalitní odezvy regulátoru v celém regulačním rozsahu i při relativně dlouhých periodách odezev regulovaného systému a princip základního zapojení do obecného regulačního systému.

- 5 Reálné odezvy při relativně malých změnách na požadavek na výstupní teplotu (resp. odebíraný výkon) – do 10 % rozsahu – lze očekávat na úrovni desítek sekund, resp. jednotek minut, zatímco pro přesnost regulace blízko set point je důležitá poměrně vysoká vzorkovací frekvence na úrovni jednotek sekund i méně (standardně 1 s). Při takto vzájemně dramaticky odlišných časových konstantách může snadno docházet k nestabilitě regulace a značným překmitům PV přes set point. Zejména z důvodu, že I složka i při velmi malém K_i dosáhne vysoké integrované hodnoty po dlouhou dobu integrování při jednostranném výkyvu regulace, to vede k prohloubení již tak značné hystereze systému.

- 15 Zásadní modifikací vlastní regulace je tak ovlivnění dynamiky základního PID regulátoru – zesílení, popř. zeslabení vlivu standardního PID sledováním změn referenční veličiny, která má na PV regulátoru podstatný vliv. K tomu je oproti standardním regulačním systémům a jejich připojením ke kotli, resp. topné soustavě, nutno doplnit signál referenční veličiny – konkrétně teploty na výstupu spalínového výměníku, popř. teploty spalín. Pro zajištění žádaného zvýšení dynamiky v regulaci topeniště však není do výstupu regulátoru započítána absolutní hodnota referenční veličiny, ale její derivace, podobně jako v D složce regulátoru se uvažuje s derivací odchylky, popř. PV.

- 25 Obecně se dynamické změny v soustavě promítají vždy se zpožděním na PV, postupně se staticky promítnou do P a I složky, zatímco D složka závislá na dynamice PV je schopna zaznamenat je aktuálnější. Zdálo by se tedy, že zvýšení dynamiky samotného regulátoru lze snadno provést prostým zvýšením koeficientu K_d . Ovšem, jak je známo z obecné teorie PID, přílišným samostatným zesílením D složky by v ustálených režimech soustavy docházelo ke značnému kmitání výstupu regulátoru a mohlo by dojít i k přeregulování. Naopak navrhované zesílení vnější referenční veličinou umožňuje navýšit dynamický účinek regulátoru (jakoby jeho derivační složky), přičemž nemá přímý vliv na rozkmit výstupu regulátoru $u(t)$, protože na PV působí nepřímě, tj. prostřednictvím využití akumulované kapacity výměníku spaliny/topné médium, a tedy jako vlastnost samotného systému, což vede k vyšší stabilitě regulace.

- 35 Působení zesílení referenční veličinou lze vysvětlit tak, že referenční veličina představuje budoucí potenciál, výkonovou rezervu/kapacitu pro další chování systému. Tento potenciál se do PV reálně promítá se zpožděním – hysterezí systému i vlastní regulace, která není sice ve všech režimech práce topeniště konstantní, ale její přímé chování není nutno znát, či matematicky popsat, protože postačí sledovat změny referenční veličiny. Sledování dynamických změn referenční veličiny tak umožňuje předznamenat budoucí chování soustavy a s příslušným zesílením K_z ovlivnit kladným či záporným přírůstkem výstup z regulátoru, aby nedocházelo zpožděním v soustavě k přeregulování (překmitu) regulátoru – snížení hystereze ve vlastní regulaci.

- 45 Tímto postupem se výrazně redukuje překmit systému při přechodu set point, což je opět velmi důležité právě při dlouhých časech odezev systému, resp. při vysoké hysterezi systému ovlivněné právě referenční veličinou.

- 50 Další podstatnou modifikací je limitace absolutní velikosti I složky jak na spodní, tak horní hraně, a to dvěma způsoby. První limitace působí jako statická limitace minimální a maximální hodnoty integrace odchylek – při hodnotách mimo sledované meze nedochází k další integraci a do $u(t)$ vstupuje poslední velikost I, která odpovídá okamžiku dosažení buď spodní, nebo horní meze $u(t)$. Je to proto, že i při relativně velmi malém K_i a relativně pomalém vzorkování (sekundy) dochází u standardních PID regulátorů při dlouhých odezvách systému (desítky sekund) k masivnímu nárůstu integrovaných odchylek a opět k značnému překmitu systému přes set point. Tato modifikace je literárně popsána, nepředstavuje tedy zásadní inovační potenciál.

Inovační potenciál návrhu je v dynamické limitaci/moderaci vlivu celé I složky, a jak bude popsáno dále i K_z – koeficientu zesílení derivační složky. Modifikace regulátoru je provedena tak, že K_i (dále podobně i K_z) není v činnosti regulátoru konstantou (jak předpokládá základní PID, resp. polem konstant u škálovatelného PID), ale jejich vliv se dynamicky mění v závislosti na odchylce. Pro dosažení optimálního působení (v praktickém ověření) byla zvolena a ověřena

funkce $\frac{\cos(\frac{e(t)\pi}{I_{range}}) + 1}{2}$, aby byl zachován vliv složky poblíž set point, ale při velké odchylce

(např. skokovou změnou set point) opět negativně nepůsobila celková integrace odchylek. Místo průběhu funkce $\cos(x)$ lze použít jinou funkci, která v dané aplikaci bude působit příznivěji, ale opět bude mít v mezích odchylek $-I_{range}$, I_{range} hodnoty blízké nebo rovné nule, zatímco při malých odchylkách hodnoty blízké jedné (např. lomená fce druhého řádu) – viz průběh dle obr. 3.

U zesílení změnou referenční veličiny je tato limitace doporučena z toho důvodu, že mezi PV a vývojem referenční veličiny existuje vazba, jejíž přesný účinek však není znám. Při velkých odchylkách, resp. jejich dramatické dynamice by mohl vliv zesílení vést k přeregulování, resp. oscilaci regulátoru. Dynamický vliv referenční veličiny v takovém okamžiku není žádoucí, protože by také mohl inhibovat vliv proporcionální složky pro přiblížení se k set point. Naopak největší význam má jako podpůrná predikce v okamžiku, kdy se process value blíží set point, a je tak důležité odhadnout další chování systému pro preciznější, rychlejší dosažení set point, resp. zamezení přílišnému překmitu regulátoru. Tato vlastnost byla potvrzena při vlastním vývoji, nastavení a ověřování uvedeného způsobu regulace.

Reálně se tak regulátor chová jako dynamický systém, který plynule přechází mezi plnohodnotným standardním spojitým PID a diskrétním regulátorem s charakteristikou PD regulátoru (při limitaci I složky), v jistých režimech se chová jako standardně staticky integračně limitovaný PI regulátor a v extrémních režimech potenciálně jako P regulátor. K přechodům dochází naprosto autonomně bez zásahů obsluhy, pouze na základě naladění parametrů regulátoru.

Jistou nevýhodou je nutnost při optimalizaci konkrétního nasazení optimalizovat další parametry regulátoru (K_z , I_{range} , D_{range}), ale lze vyjít z již nastaveného PID a tento pouze doplnit o navrhované úpravy a doladit pouze jejich vliv.

Pro aplikaci bylo použito paralelní formy základního PID, protože při použití paralelní formy je následně technicky dostupnější finální naladění regulátoru s následnými parametry. Zejména u integrační složky by použití integračního času ve spojení s dynamickou limitací vedlo ke komplikované matematické reprezentaci, resp. složitější aplikovatelnosti do modelu. Při ladění regulátoru v paralelní formě lze pro základní koeficienty zjednodušeně vycházet z relativního (procentuelního) žádaného vlivu jednotlivých složek P, D a koeficient K_i volit dostatečně malý tak, aby i při zalimitování nedocházelo k rychlému nárůstu I složky, což by negativně ovlivňovalo zejména vliv D složky a dynamického zesílení – regulátor by byl dominantně PI regulátorem, pokud to není uživatelem požadováno. Záměrně je u derivační složky proto použito součinu $K_p \cdot K_d$, právě proto, aby byla dodržena vzájemná relativita složek a při ladění regulátoru se mohlo vycházet z „procentního“ nastavení působení obou složek (i když je součin poměrně velkým absolutním číslem – při použití K_p i $K_d > 1$, výsledné působení není natolik dramatické, protože derivace odchylek je ve většině režimů práce regulátoru velmi malá, v okamžiku extrémního nárůstu je pak limitován výstup regulátoru, aby nemohlo dojít k přeregulování a oscilaci regulátoru.

Zapojení systému regulace je tak doplněním standardních regulací topenišť. PV je výstupní teplota teplosměnného média, která je ovlivňována procesem hoření a velikostí odebíraného topného výkonu. Zatímco topný výkon je neznámý a nezávislý faktor, vlastní proces hoření je

možno považovat za závislou veličinu, protože výstup regulátoru je právě spojen s nastavením parametrů procesu hoření (dodávka paliva a nastavení dodávky/odtahu vzdušnin), tento souhrnný faktor pak znamená navýšení PV, tedy záporné regulační odchylky. Naopak odebíraný topný výkon vytváří kladné regulační odchylky. Optimální regulace vede k minimalizaci celkové odchylky $e(t) = \text{set point} - \text{PV}$. Modifikací je přidání referenční veličiny v podobě její zalimitované derivace.

$$K_z \frac{\cos\left(\frac{e(t)\pi}{D_{range}}\right) + 1}{2} \frac{d}{dt} r(t) \quad (3)$$

Důvody limitace zesílení pomocí modifikované fce $\cos(x)$ i jejího použití z dynamiky teploty spalin, resp. výměníku spaliny/voda byly zmíněny výše.

V praxi je buď daným technickým prostředkem (analogové regulátory), nebo limitací rozsahu regulován výstup regulátoru $u(t)$ a zároveň jsou technicky realizovány výše uvedené statické limitace I složky regulátoru. Uvedením limitů se praktická realizace matematicky vyjádří:

$$u(t) = \left[\left[K_p e(t) \right]_{P_{lim,l}}^{P_{lim,u}} + I + \left(K_p K_d \right) \frac{d}{dt} e(t) + K_z \frac{\cos\left(\frac{e(t)\pi}{D_{range}}\right) + 1}{2} \frac{d}{dt} r(t) \right]_{u_{min}}^{u_{max}} \quad (4)$$

kde integrační člen I nabývá hodnot integrovaných odchylek $e(t)$ do času t se zalimitováním jejich absolutní výše (jak bylo výše uvedeno v textu) v případě jejich růstu mimo vymezený rozsah, přičemž při překročení mezí integračního členu I (celé integrační složky) nabývá tento poslední platné výše před zalimitováním (v podstatě úroveň limit, podobně jako u P_{lim}), a zároveň dynamickou modifikací koeficientu K_i se upravuje další růst složky I , dle výše naznačených funkcí (viz obr. 3) v případě přiblížení se k set-point, a dále kde:

K_p – je koeficient proporcionální složky,

K_d – koeficient derivační složky,

e – odchylka regulační veličiny ($\text{error} = e = \text{Set point} - \text{Process Value}$)

t – průběžný čas,

K_z – koeficient zesílení (dynamiky derivační složky) je založen na derivaci referenční veličiny,

D_{range} – absolutní veličina rozsahu odchylek pro působení dynamické limitace příslušné složky I a zesílení.

P_{lim} – jsou limitní hodnoty pro P složku regulátoru (dolní, horní)

u_{max}, u_{min} – výstupní rozsah regulátorů

Nastavení regulátoru je možné provést v jakémkoliv systému (vhodném procesoru po kompilaci kódu např. z jazyka C++, přímém softwarovém řešení nebo real-time modulu řídicího systému).

Finálně je tedy předmětem návrhu kombinace zapojení měřených veličin na vlastním topeništi a připojení modulu zesílení regulace referenční veličinou, přičemž vstup regulátoru představují výstupní teplota teplosměnného média a derivace (vlastní derivování lze provést v rámci regulátoru (u softwarového řešení, popř. v RT-modulu), nebo jako operaci před vstupem do regulátoru) výstupní teploty teplosměnného výměníku (teploty spalin). Výstup regulátoru $u(t)$ pak představuje procentní nastavení okamžitého topného výkonu pro dosažení požadované výstupní teploty teplosměnného média (PV). Dle typu topeniště pak výstup regulátoru je převeden na kvantifikaci dodávky paliva a spalovacího vzduchu, popř. odtahu spalin pro rovnovážné či podtlakové kotle prostřednictvím převodníku signálů na vstup jednotlivých nezávislých akčních členů. Schéma vlastního zapojení je uvedeno na obr. 2.

Pro zajištění správné funkce zapojení, resp. využití zesílení, je pak vhodné doplnit výše představenou modifikaci PID regulátoru, resp. v rámci systému regulace připojení paralelního bloku zesílení se sumací výstupu obou sekcí, která představuje jednoduchý mezistupeň mezi klasickou PID regulací a pokročilejšími metodami (PCM, fuzzy). Rozšíření a limitace jsou uvedeny opět v obr. 2.

Systém pro regulaci výkonu a zároveň výstupní teploty teplosměnného média kotle 1 na tuhá paliva obsahujícího výměník 2 spalin a topeniště 3, kde výměník 2 spalin je připojen přes potrubí přímo k topné soustavě 7 a do topeniště 3 je vyvedeno potrubí sekundárního vzduchu, je znázorněn na obr. 2. Systém je v tomto provedení tvořen akčním členem 11 sekundárního vzduchu, jenž je připojen na jeden z výstupů bloku 10 převodu výstupu regulátoru 4 na signály pro akční členy, dále potrubí dodávky paliva, ve kterém je uspořádán akční člen 12 dodávky paliva, jenž je připojen na jeden z výstupů bloku 10 převodu výstupu regulátoru 4 na signály pro akční členy, dále potrubí dodávky primárního vzduchu, ve kterém je uspořádán akční člen 13 primárního vzduchu, jenž je připojen na jeden z výstupů převodníku 10 převodu výstupu regulátoru 4 na signály pro akční členy, dále je k dalšímu výstupu bloku 10 převodu výstupu regulátoru 4 na signály pro akční členy připojen akční člen 14 odtahu spalin, jenž je uspořádán v potrubí odtahu spalin, přičemž čidlo 6 výstupu spalin je připojeno na vstup modulu 8 regulátoru zesílení dynamiky regulátoru, jehož výstup je připojen na jeden ze vstupů sumátoru 15, zatímco čidlo 5 teploty výstupu teplosměnného média je připojeno ke vstupu PID modulu 9, jehož výstup je připojen na jeden ze vstupů sumátoru 15, který má výstup připojen na vstup převodníku 10 signálů.

Funkce systému pro regulaci výkonu a zároveň výstupní teploty teplosměnného média je následující. Pro standardní regulaci je výstup teplosměnného média osazen čidlem teploty 5 výstupu teplosměnného média, jehož signál je veden jako základní procesní veličina do regulátoru 4. Signál teploty z čidla 5 výstupu teplosměnného média je zpracováván v PID modulu 9 regulátoru 4. Kotel 1 je dále osazen alespoň jedním čidlem 6 teploty výstupu spalin. Tato teplota spalin, resp. teplota výměníku 2 spalin, je referenční veličinou. Signál referenční veličiny je veden do modulu 8 zesílení dynamiky regulátoru 4, kde je na vstupu modulu 8 zesílení dynamiky regulátoru 4 provedena derivace referenční veličiny. Výstupy měřených veličin z modulu 8 zesílení dynamiky regulátoru 4 a PID modulu 9 regulátoru 4 jsou sečteny v sumátoru 15 a dále v převodníku 10 převedeny na jednotlivé signály nezávislých akčních členů topeniště 3 kotle 1. Akčními členy topeniště 3 jsou akční člen 12 regulace dodávky paliva, dle konkrétní konstrukce kotle 1, dále pak alespoň jeden akční člen 13 dodávky primárního vzduchu vzdušnin, akční člen 11 sekundárního spalovacího vzduchu a akční člen 14 odtahu spalin, jimiž může být kotel 1 vybaven.

Je výhodné volit jako referenční veličinu derivaci teploty výstupu spalinového výměníku, popř. spalin. Z procesních veličin kotle (1) jsou standardními teplotními čidly měřeny:

- výstupní teplota teplosměnného média, která je zpravidla již používána v původním regulátoru, tedy jeho sekci 9,
- referenční veličina – derivace teploty výměníku 2 spalin, měřená čidlem 6, jehož signál je veden do doplňkové sekce regulátoru 8.

Použitím referenční veličiny v uvedeném uspořádání dojde ke zvýšení dynamiky regulace kotle 1, protože kapacita teplosměnných ploch výměníku 2 spalin, resp. vlastní teplota spalin, představují energetický potenciál, který se v regulační smyčce procesní veličiny (PV – teplota teplosměnného média) projeví se zpožděním způsobujícím hysterezi, zatímco údaj z referenční veličiny tuto hysterezi minimalizuje, neboť její změny budoucí vývoj předcházejí. Elektronika regulátoru 4 tak může pružně reagovat i na dynamické změny v soustavě či požadavcích uživatele. Pro regulaci kotle 1 se používají alespoň dvě procesní veličiny výměníku 2 spalin. Přičemž jako procesní veličina je vedena teplota teplosměnného média v PID modulu 9 a alespoň jedna referenční veličina, s výhodou derivace teploty výstupu výměníku 2 spaliny/teplosměnné

médium či teploty spalin v modulu 8 zesílení dynamiky regulátoru 4, přičemž jejich společným signálem řídí akční členy kotle 1.

5 Průmyslová využitelnost

10 Systém pro regulaci topenišť biomasou s přesnou regulací výstupní teploty teplosměnného média je vhodné pro nasazení při vytápění objektů s malou a střední tepelnou ztrátou (7 až 50 kW), resp. jako přímá dodávka kotle vybaveného tímto systémem, zejména tam, kde není vhodné montovat z prostorových i jiných důvodů akumulátor tepla, a kde je požadována vyšší přesnost regulace výstupní teploty teplosměnného média než u soudobých instalací.

15 Prakticky tedy představuje potenciál pro výrobce kotlů, kteří uvedené řešení implementují do své konstrukce či případně výrobcům regulačních systémů pro dané třídy kotlů, kteří takové řešení připraví jako přímo montovatelné na kotel daného výrobce dle jeho specifikací, případně volně prodejných setů či doplňkových kitů regulačních systémů jako náhrad/modifikací stávajících regulačních bloků odbornou firmou či přímo uživatelem.

20

PATENTOVÉ NÁROKY

25 **1.** Systém pro regulaci výkonu kotle na tuhá paliva a zároveň výstupní teploty teplosměnného média ohřívaného ve výměníku (2) kotle, obsahující čidlo (5) teploty výstupu teplosměnného média, regulátor (4) obsahující PID modul (9) regulátoru procesní veličiny připojený svým vstupem na výstup z čidla (5) teploty výstupu teplosměnného média, a převodník (10) signálu, **vyznačující se tím**, že dále obsahuje čidlo (6) teploty výstupu spalin z kotle, akční člen (11) sekundárního vzduchu připojený na jeden z výstupů převodníku (10) signálu, akční člen (12) 30 dodávky paliva připojený k dalšímu výstupu převodníku (10) signálu, akční člen (13) primárního vzduchu připojený k dalšímu výstupu převodníku (10) signálu, akční člen (14) odtahu spalin připojený k dalšímu výstupu převodníku (10) signálu a sumátor (15), přičemž regulátor (4) zahrnuje ještě modul (8) zesílení dynamiky regulátoru připojený svým vstupem na výstup z čidla (6) teploty výstupu spalin, přičemž každý z modulů (8, 9) je svým výstupem připojený na vstup 35 sumátoru (15), a sumátor (15) je svým výstupem připojený na převodník (10) signálu pro převod výstupu regulátoru (4) na signály pro akční člen (11) sekundárního vzduchu, pro akční člen (12) dodávky paliva, pro akční člen (13) primárního vzduchu a pro akční člen (14) odtahu spalin.

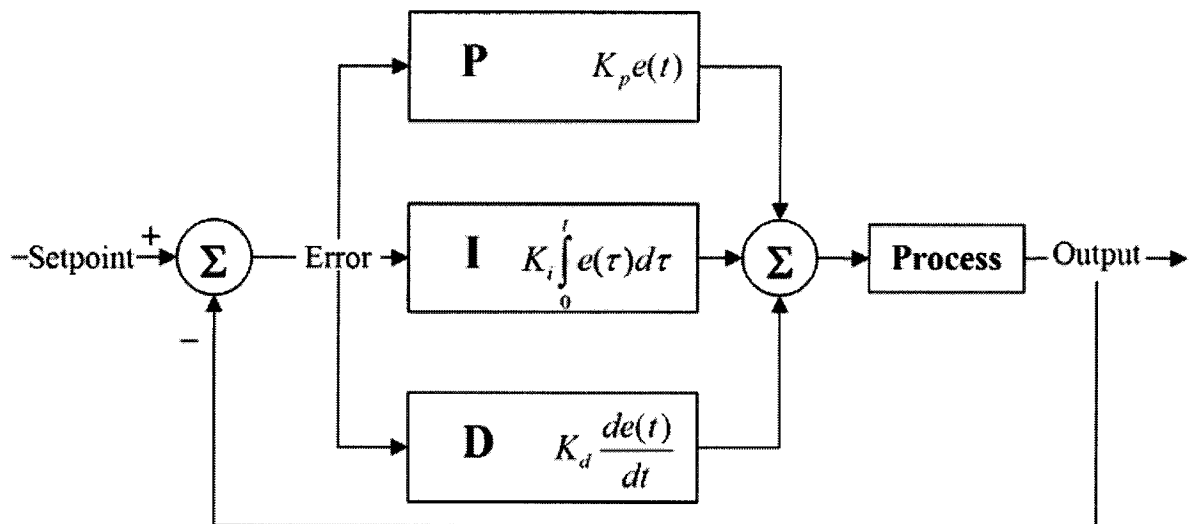
40 **2.** Kotel (1) na tuhá paliva obsahující výměník (2) spalin, na nějž jsou napojena jednak potrubí pro odtah spalin s implementovaným akčním členem (14) odtahu spalin, a jednak potrubí pro připojení teplosměnného média přímo k topné soustavě (7), dále obsahující topeniště (3), do něhož je vyvedeno potrubí primárního vzduchu s implementovaným akčním členem (13) primárního vzduchu, potrubí sekundárního vzduchu s implementovaným akčním členem (11) sekundárního vzduchu a potrubí dodávky paliva s implementovaným akčním členem (12) 45 dodávky paliva, **vyznačující se tím**, že je opatřen systémem pro regulaci výkonu kotle na tuhá paliva a zároveň výstupní teploty teplosměnného média podle nároku 1.

50

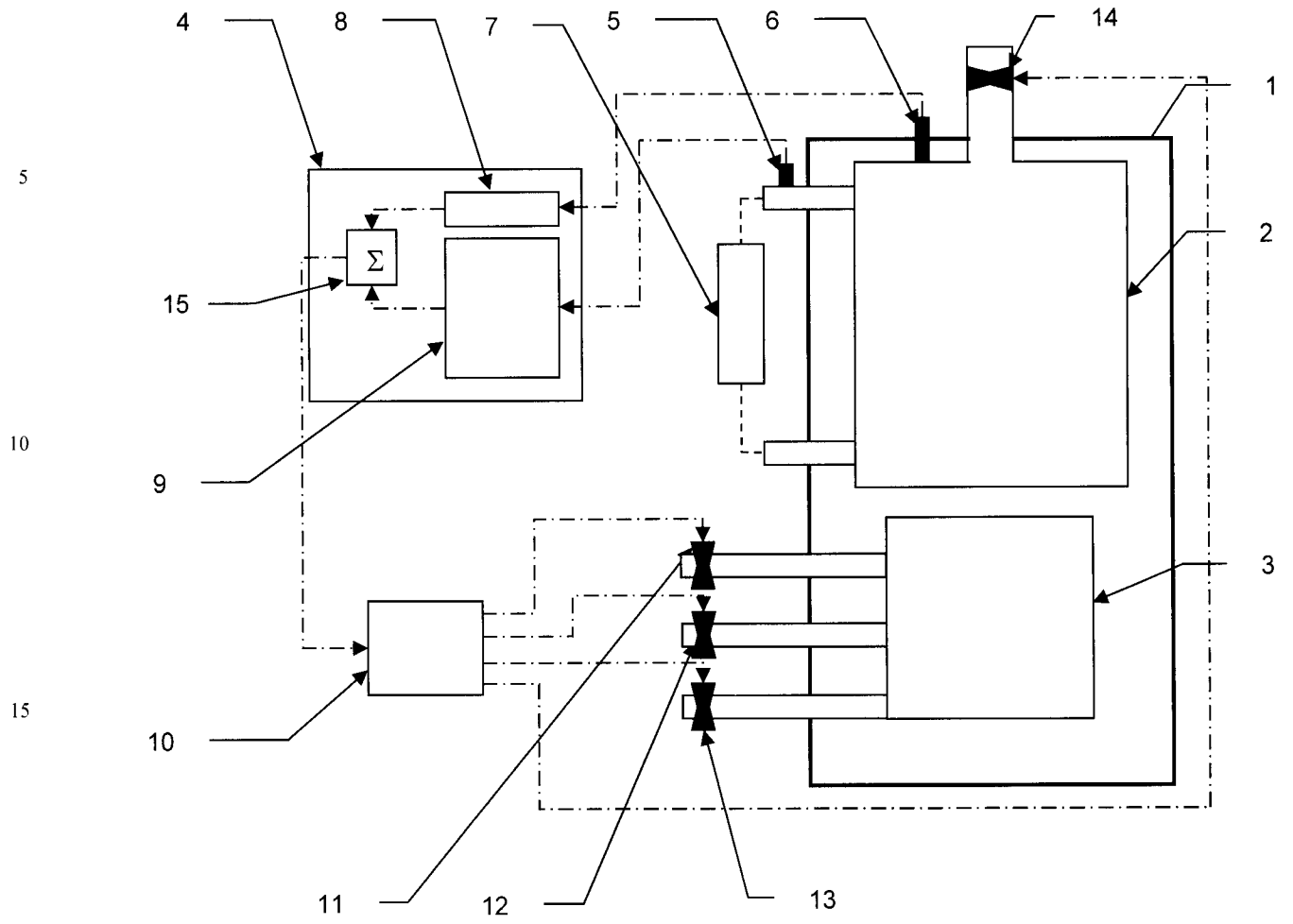
3 výkresy

Seznam vztahových značek

	1	kotel
5	2	výměník spalin
	3	topeniště kotle
	4	regulátor
	5	čidlo teploty výstupu teplosměnného média
	6	čidlo teploty výstupu spalin
10	7	topná soustava
	8	modul zesílení dynamiky regulátoru
	9	modul PID regulátoru procesní veličiny
	10	převodník signálu
	11	akční člen sekundárního spalovacího vzduchu
15	12	akční člen dodávky paliva
	13	akční člen dodávky primárního vzduchu
	14	akční člen odtahu spalin
	15	sumátor

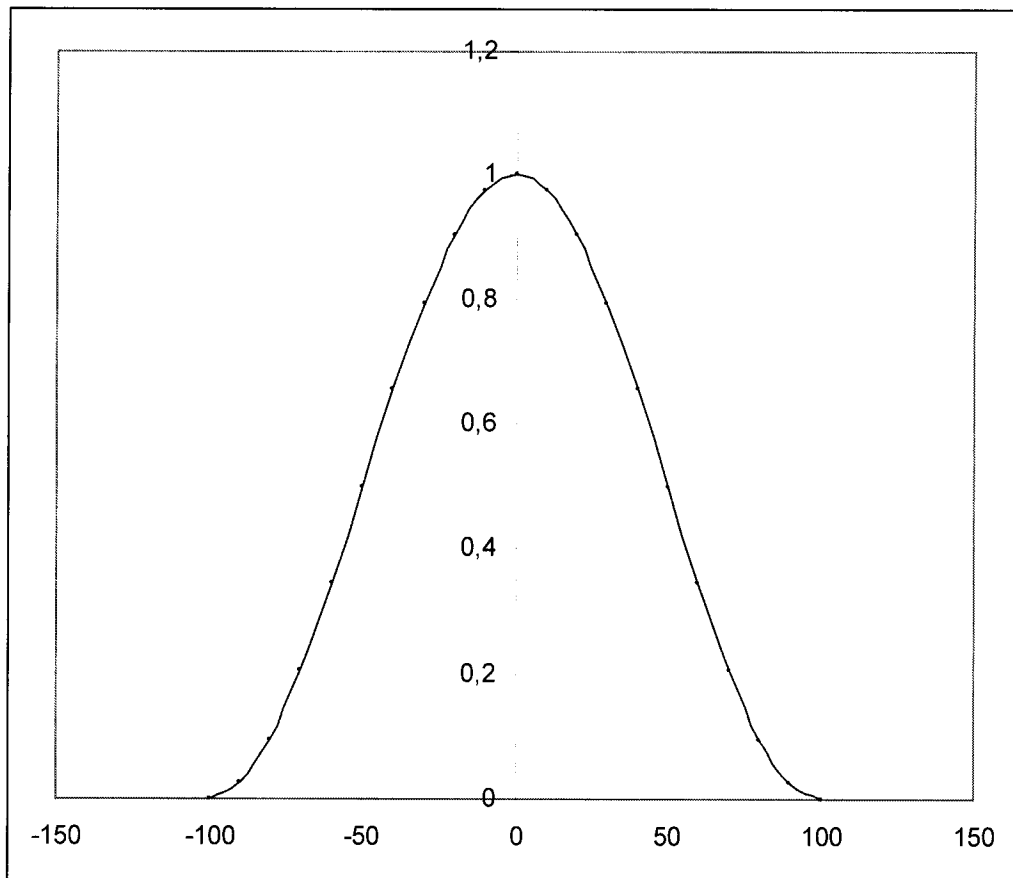


Obr. 1



20

Obr. 2



Obr. 3

Konec dokumentu
