

Hybridné – dopredné riadenie denitrifikácie spalín kotlov

Tento príspevok pojednáva o sofistikovanom riešení problému denitrifikácie spalín a teda znížení vypúšťaných NO_x emisií do ovzdušia pri uhoľno-plynových kotloch. Pre zníženie emisií bola využitá chemická reakcia vodného roztoku amoniaku (24 až 25 %) s molekulami NO_x na katalyzátoroch prostredníctvom tzv. Selektívnej katalytickej metódy – v skratke SCR (Selective Catalytic Reduction). Riadenie zástreku čpavku bolo vytvorené spojením dvoch metód riadenia a to (1) výpočtovej metódy množstva čpavku a (2) kaskadného riadenia pomocou regulátorov zaradených za sebou. Integráciu týchto dvoch metód riadenia sme označili ako hybridné-dopredné riadenie. Predkladané hybridné-dopredné riešenie riadenia vychádza z dvoch dôležitých základných predpokladov: (1) uvažuje sa jeden a pritom najpresnejší, overený a garantovaný zdroj informácií a teda v našom prípade zdroj informácií je meranie množstva NO_x v spaliniach z AMS a (2) a druhý dôležitý predpoklad, aby riešenie bolo za minimalizovanú cenu a teda bez prevádzkového merania množstva NO_x . Pri takýchto podmienkach jedným z najväčších problémov pri riadení je eliminácia dopravných oneskorení pri riadení denitrikačných procesov. Príspevok je rozdelený do dvoch hlavných častí, pričom prvá časť opisuje logiku rekonfigurácie a riadenia jednotlivých novovybudovaných energetických zariadení kotlov a druhá časť príspevku opisuje realizované hybridné-dopredné riadenie denitrifikácie obidvoch kotlov. Obidve uvedené časti sú opísané s dôrazom na aplikácie pre dva kotle v Teplárne Košice, a to konkrétne kotla PK4s a kotla PK4n. V závere príspevku sú uvedené výhody a nevýhody uvedeného prístupu riadenia denitrifikácie kotlov.

Keywords: denitrifikácia spalín, energetické zariadenia, kotol, vnorené riadenie, kaskádne riadenie, dopredné riadenie, hybridné riadenie

ÚVOD

Predmetom pojednávania v tomto príspevku je realizované sofistikované riešenie riadenia denitrifikácie spalín dvoch kotlov PK4n a PK4s v spoločnosti Tepláreň Košice, a.s., za účelom zníženia emisií NO_x podľa požiadaviek legislatívy pre ochranu ovzdušia.

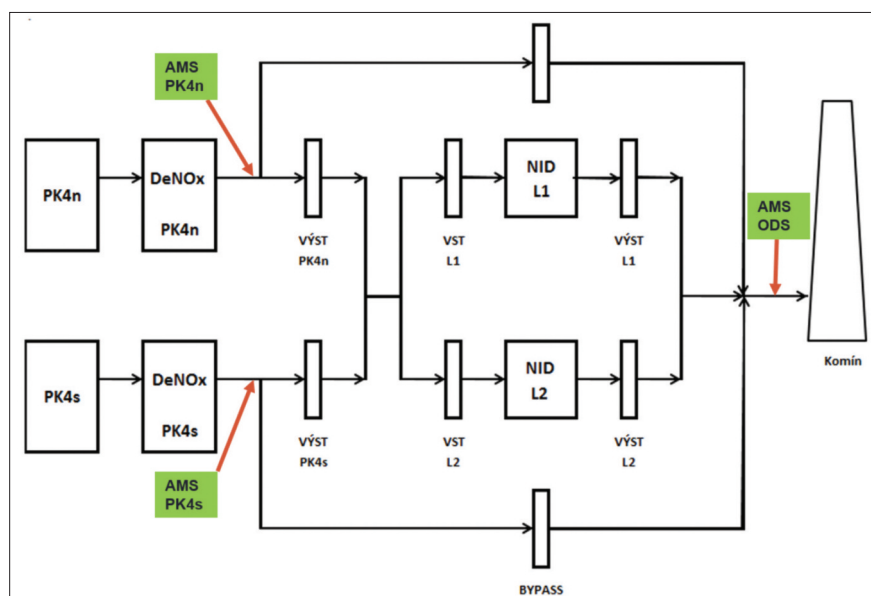
V prípade jedného z kotlov - PK4n pred inováciou bola sekundárna denitrifikácia na kotli pomocou nekatalytickej metódy nevyhovujúca pre plnenie ochrany ovzdušia podľa požiadaviek legislatívy, preto bola sekundárna denitrifikácia nahradená metódou katalyticou (SCR) s použitím katalyzátorov. Reakčným činidlom – reagentom je použitý vodný roztok amoniaku – čpavok.

Pred inováciou bolo jestvujúce technické riešenie denitrifikácie riešené pomocou metódy SNCR. Zabezpečovalo zníženie emisií NO_x v spaliniach z hodnoty cca 750 mg/Nm^3 na hodnotu za kotlom cca 400 mg/Nm^3 . Po inovácii zabezpečuje denitrifikácia 200 mg/Nm^3 .

Opatrenia pre zníženie emisií, ktoré boli aplikované na obidvoch kotloch ako na kotli PK4n tak aj na kotli PK4s sú plnené pomocou technológie SCR reaktorov, ktoré čistia odchádzajúce spaliny pomocou selektívnej katalytickej redukcie Selective Catalytic Reduction (SCR).

OPIS A INTEGRÁCIA ENERGETICKÝCH ZARIADENÍ KOTLOV V TEPLÁREŇ KOŠICE, a.s., AKO RIADENÉHO SYSTÉMU

Celková schéma riadenia energetických zariadení kotlov PK4s a PK4n v spoločnosti Tepláreň Košice, kde tieto vyššie-uviedené inovácie boli projektované, realizované a aplikované sú znázornené na základnej blokovej schéme - obr. 1. Každý z týchto dvoch kotlov má svoj systém denitrifikácie, spoločné čpavkové hospodárstvo, má dve spoločné linky odsírenia, bypassové spalínové klapky, systémy elektroodlučovačov, systémy suchého a mokrého odberu popola apod. V ďalšom sa



Obr. 1 – Celková základná bloková schéma konfigurácie energetických zariadení kotlov PK4s a PK4n v Teplárni Košice, a.s.

sústredíme sa na časť denitrikačných procesov spalín.

OPIS SYSTÉMU SCR

Systém SCR:

- je už bežne dostupnou technológiou,
- je najúčinnnejšou z hľadiska vysokej úrovne ochrany životného prostredia,
- spoľahlivo zaistí požadované limity emisií NO_x i z vyšších vstupných hodnôt emisií NO_x – a taktiež umožňuje spalovanie paliva s vyšším obsahom dusíku Ndaf ,
- má vyššie investičné náklady,
- má nižšie prevádzkové náklady - dosahuje nižšiu spotrebu reagentu – bežne sú tieto spotreby o cca 50% nižšie, než u systémov SNCR,
- spoľahlivo zaistí plnenie čpavkového skľuzu (obsah čpavku v úletových spaliniach) a tým obsahu čpavkových solí v úletovom popole (hygienické predpisy),

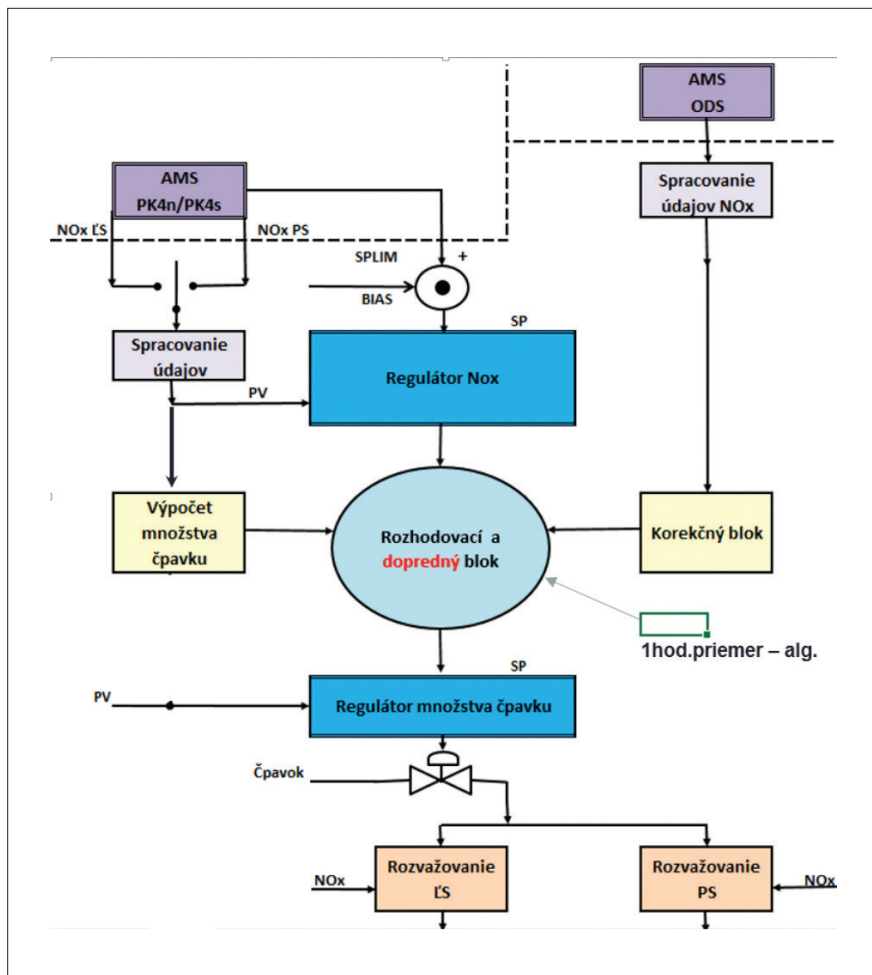
- umožní dosiahnutie lepších ekonomických výsledkov pri optimálnom nastavení spalovacieho procesu v kotli (nižšie nedopaly, vyššia účinnosť).

Systém SCR sa skladá z:

- vlastných keramických katalytických vložiek, umiestnených v prúde spalín kotla,
- hospodárstvo reagentu – skladovacia a stáčacia technológia čpavku,
- technológia riadenia a prípravy reagentu,
- technológia riadenia a odparovania a vstrekovania reagentu do prúdu spalín,
- technológie čistenia katalytických vložiek v spaliniach – akustické čistenia.

Charakteristika procesu SCR

Technológia SCR predstavuje nevyhnutnejšiu, osvedčenú a dnes už rozšírenú technológiu na redukciu NO_x v odchádzajúcich spaliniach. Technológia je založená na rozprášovaní



Obr. 2 – Blokavá schéma hybridného – dopredného riadenia množstva čpavku.

reagentu pred katalyzátormi, ktoré sú umiestnené v žiadanom teplotnom okne, kde prebiehajú už pomerne známe chemické reakcie vedúce k rozkladu NO_x na dusík (N_2) a vodu (H_2O) podľa známych chemických vzorcov.

V rámci optimalizácie a návrhu technológie SCR je nutné brať do úvahy nielen vstupnú hladinu NO_x a žiadanou výstupnou koncentráciou NO_x , ale súčasne i koncentráciu čpavkového skľúzu vo výstupných spalinách. Súčasná žiadaná maximálna koncentrácia skľúzu v odchádzajúcich spalinách = 30 mg/Nm^3 .

Reagent

Pre metódu SCR sa používa reagent vo forme 25% vodného roztoku amoniaku, ktorý je odoberaný z novo-vybudovaného čpavkového hospodárstva umiestneného mimo kotolne.

Technológia riadenia a prípravy reagentu

Reagent je dopravovaný pomocou čerpadiel k novej riadiacej jednotke – Hybridné-dopredné (H-D) riadenie prietoku čpavku. Riadiaca jednotka je riadená redundantným riadiacim systémom podľa aktuálnych meraných parametrov spalin nie za a pred katalyzátorom, ale z AMS príslušného kotla a korigovaná z meraných údajov z AMS za odsírením spoločne pre obidva kotle. Na základe týchto parametrov

riadi potrebné množstvo vstrekaného čpavku a príslušné množstvo privedenej nízkotlakaiej páry použitej pre ohrev a odparenie reagentu a ohrev riediaceho vzduchu pre ľahké rozprašovanie.

Technológia riadenia, odparovania a vstrikovania reagentu do prúdu spalin

Reagent je ohrievaný a odparovaný privedenou parou vo výmeníku. Následne je reagent vedený do zmiešavacieho modulu s ohriatym riediacim vzduchom pre ľahké rozprašovanie. Riediaci vzduch je najprv vŕhaný do výmeníka para/vzduch pomocou vzduchových ventilátorov (dúchadiel). Ohriatý riediaci vzduch je následne vedený do zmiešavacieho modulu. Reaktor je navrhnutý pre dve činné vrstvy a prípravu pre inštaláciu vrstvy záložnej.

Čistenie katalyzátorov

Pre udržovanie čistoty reakčného povrchu vrstiev katalyzátorov od popola a ďalších úsadenín vytvorených zo spalin boli použité akustické ofukovače. Pracovným médiom pre ofukovače je tlakový vzduch. Výhodou akustických ofukovačov pred parnými sú nižšie investičné a prevádzkové náklady a menší požadovaný priestor. Činnosť ofukovačov je nastaviteľná podľa prevádzkových stavov a podmienok na kotli.

Čpavkové hospodárstvo a skladovacie nádrže

Hlavnými komponentami sú stáčacie čerpadlá, dve nádrže, dopravné čerpadlá, prepojenie potrubie a príslušné zabezpečovacie zariadenie. Stáčacie i dopravné čerpadlá sú zdvojené, jedno slúži vždy ako prevádzkové a druhé slúži ako záložné.

Pre projekt je použitý ako reagent 25% čpavok. Skladovanie vodného roztoku je samo o sebe bez nebezpečenstva výbuchu. Akurát vo vnútri zásobníkov sa považuje za Zónu 0 podľa ATEX. Bezpečnostné opatrenia, ktoré sú vyžadované pre skladovanie vodného roztoku sa skladá z osobných ochranných pomôcok (dýchacia maska s filtrom, rukavice, gumená obuv) zariadenie pre výplach očí a bezpečnostnú sprchu. Systém sledovania úniku čpavku sa skladá zo senzorov citlivých na čpavok, signalizačné zariadenia a akustické signalizačné zariadenia. Pre nádrž a stáčacie miesto je vytvorená bezpečnostná jímka s preplachovaním dusíka.

Reagent – čpavok je dodávaný v autocisternách, z ktorých sa stáča do vonkajšej uskladňovacej nádrže. Cisterna po napojení na strane kvapaliny aj na strane plynu je vyprázdňovaná čerpadlom v stáčacej stanícii. Ak má autocisterna vlastné čerpadlo, stáčanie do nádrží prebehne obtokovým potrubím okolo čerpadiel.

S ohľadom na zabezpečenie prevádzky a výhľadové pripojenie dvoch kotlov sú realizované dve uskladňovacie nádrže. Uskladňovacia nádrž s obsahom 80 m^3 je horizontálna, dvojplášťová, usadená na dvoch stojkách.

Dopravné čerpadlá umiestnené v blízkosti nádrže prečerpávajú čpavok do dávkovacích zariadení, umiestnených v blízkosti denitrifikačných zariadení v kotolni.

Dávkovacie zariadenia riadia prietok čpavku do rozprašovacích trysiek podľa týchto impulzov: koncentrácia NO_x v prírodných spalinách, koncentrácia vo vystupujúcich spalinách a prietok spalin.

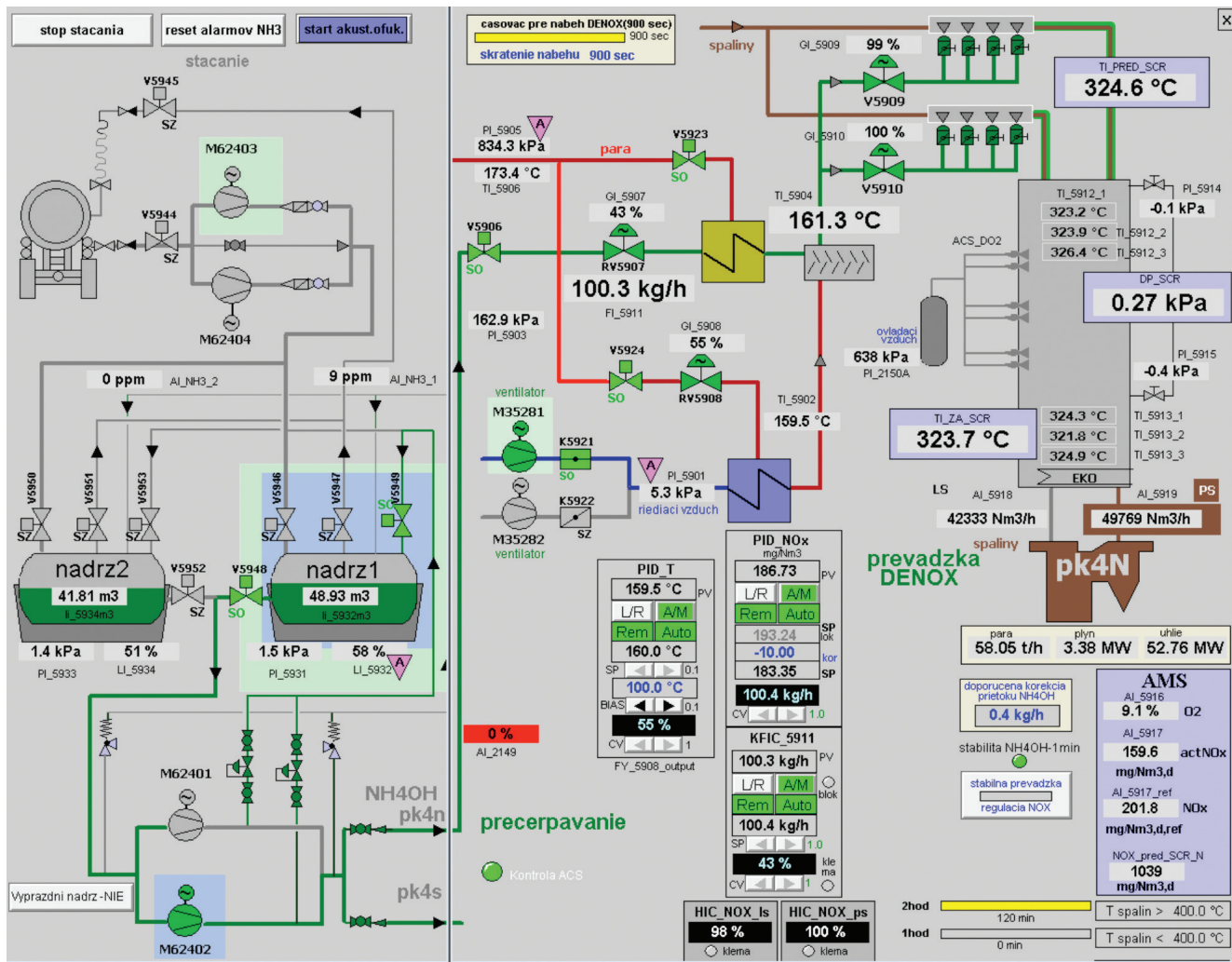
Riadenie zabezpečuje nová riadiaca jednotka systému individuálne pre pravú a ľavú stranu katalyzátorov s automatickým rozvažovaním.

OPIS HYBRIDNÉHO - DOPREDNÉHO RIADENIA PRIETOKU ČPAVKU

Opis princípu spracovania meraní a opis meracích kanálov NO_x spalin

Ako hlavný a jediný článok meracích kanálov sú AMS systémy. V aplikácii sú implementované tri AMS systémy a to AMS_PK4n pre kotol PK4n, AMS_PK4s pre kotol PK4s a AMS_ODS za odsírením pred komínom ako jedno hlavné a spoločné AMS pre obidva kotly.

Z každého AMS sú privedené údaje do riadiaceho systému denitrifikácie. Z AMS príslušného kotla prichádzajú merania do riadiaceho systému a to ako v "surovom" stave tak aj meranie NO_x , ktoré je vypočítané v AMS a teda platné pre legislatívne emisie a zároveň prichádzajú do riadiaceho systému aj stanovené



Obr. 3 – Hlavná obrazovka HMI pre denitrifikáciu jedného z kotlov PK4n. Podobná hlavná obrazovka je aj pre kotol PK4s.

emisné limity NO_x .

Merania emisií na výstupe kotlov za technológiou denitrifikácie ako zdroj dát sú privádzané stále iba z jednej strany a to buď ľavej, alebo pravej strany spalínovodov obidvoch kotlov. Pri tomto spôsobe získavania údajov o množstve oxidov dusíka nie sú inštalované prevádzkové merania NO_x spolu s ďalšími prírodnými meraniami, ktoré by so sebou prinášali nepresnosti a taktiež nekonzistenciu údajov prichádzajúcich z rôznych zdrojov. Takto sa získava výhoda presnosti merania, jednoznačnosti informácií a zároveň aj optimalizácia investičných a prevádzkových nákladov.

Takéto riešenie má však aj nevýhody a to najmä z pohľadu riadenia. Ako jedna z nevýhod sa považuje vznik dopravných oneskorení pri meraniach emisií, čo spôsobuje väčšiu náročnosť pri reguláciách a riadení predmetných denitrifikačných technologických celkov, aby sa dosahovali potrebné emisné limity.

Dopravné oneskorenia v tomto prípade sa rozlišujú z troch pohľadov: (1) z pohľadu vzniku dopravných oneskorení vzhľadom na umiestnenie AMS systémov (vo väčšine prípadov sú priestorovo ďalej od technológií denitrifikácií) – technologické oneskorenie, (2) z pohľadu vzniku dopravných oneskorení pri samotnom

Výhody H-D riadenia	Nevýhody H-D riadenia
Jednotný zdroj informácií	Vznik dopravných oneskorení
Jedno snímacie miesto	
Konzistencia meraní	Náročnejšie algoritmy riadenia
Vysoká presnosť a garancia merania	
Jednotné a opäť konzistentné generovanie emisných limit	Náročnejšie ladenie riadenia
Znížené investičné náklady o prevádzkové snímače emisií NO_x	
Znížené prevádzkové náklady	
Presnejšie dodržiavanie emisných limit	

Tab. 1 – Zhmutie hlavných výhod a nevýhod hybridného – dopredného riadenia denitrifikácie

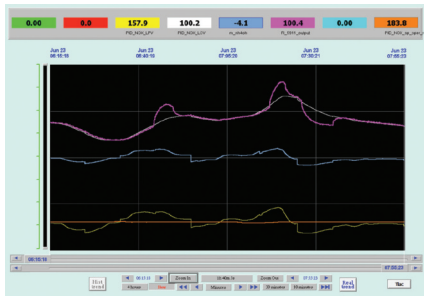
prepínaní meraní z ľavej a pravej strany spalínovodov a (3) z pohľadu vzniku dopravných oneskorení pri samotnom spracovaní meraní od senzorov až po ukončenie vyhodnotenia meracích kanálov v samotnom riadiacom systéme. Tieto tri dopravné oneskorenia sa počítajú a dávajú výsledok rádozo až niekoľko minút, čo v oblasti riadenia je takéto riadenie náročnejšie.

Každý merací kanál obsahuje rôzne bloky spracovania meraní ako sú filtre, bloky kĺzavých priemerov, bloky spracovania meraní pri

prepínaní z ľavej na pravú stranu spalínovodov a opačne, predikčné bloky na generovanie NO_x z inej strany spalínovodov ako práve meranej a mnohé ďalšie bloky.

Opis princípu riadenia denitrifikačného procesu spalín

Bloková schéma celkového riadenia denitrifikačného procesu je znázornená na obrázku 2. Po spracovaní a vyhodnotení všetkých predmetných meraní z AMS a technológií denitrifikácie je základné riadenie kaskádne (vnorené)



Obr. 4 – zaradenie výstupu výpočtového bloku do regulácie na kotli PK4n

riadenie pozostávajúce zo šiestich základných častí:

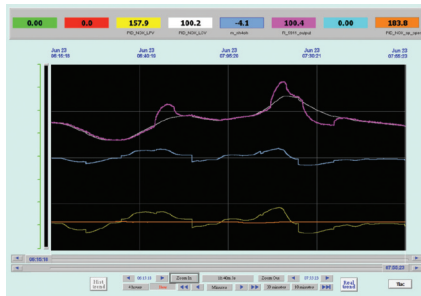
- (1) primárny-master regulátor NO_x ,
- (2) blok výpočtu množstva čpavku,
- (3) blok rozhodovania a doprednej regulácie,
- (4) sekundárny-slave regulátor množstva čpavku,
- (5) rozvažovanie ventilom pre zástrek odpareného čpavku na ľavej strane a
- (6) rozvažovanie ventilom množstva odpareného čpavku na pravej strane.

Primárny-Master regulátor na základe získanej limitnej hodnoty emisie NO_x na výstupe z príslušajúceho kotla generuje v automatickom režime množstvo čpavku potrebné pre zástrek s prihliadnutím na množstvo emisií NO_x .

Limitná hodnota emisií z príslušného kotla je získaná z AMS príslušného kotla a to prepočtom podľa výkonu v uhlí a výkonu v plyne na základe známych vzorcov.

Výpočtový blok vypočítava množstvo potrebného čpavku na zástrek a to na základe (1) meranej hodnoty NO_x , (2) požadovanej limitnej hodnoty NO_x a (3) množstva spalín z príslušného kotla.

Rozhodovací blok rozhoduje aká korekcia množstva čpavku a za akých podmienok sa k generovanej hodnote z výstupu master regulátora pripočíta a taktiež rozhoduje za akých podmienok a aká hodnota množstva čpavku sa pripočíta vzhľadom na informácie (1) NO_x z AMS_ODS na výstupe odsírenia resp. za odsírením a tiež (2) z limitnej hodnoty emisií vypočítavanej v AMS_ODS podľa výkonových



Obr. 5 – regulácia pri nízkych emisiách NO_x na kotli PK4n

úrovni obidvoch kotlov. Sumárna korigovaná hodnota od (a) primárneho regulátora, (b) vypočítavanej hodnoty a (c) korigovanej hodnoty z AMS_ODS vstupuje ako požadovaná veličina do Sekundárneho regulátora, ktorý následne generuje otvorenie ventilu množstva čpavku do odparovača.

Na obrázku č. 3 je uvedená hlavná obrazovka na operátorskom pracovisku HMI pre denitrifikáciu spalín pre kotol PK4n. Podobná obrazovka je aj pre PK4s a ostatné obrazovky pre jednotlivé časti denitrifikačných procesov.

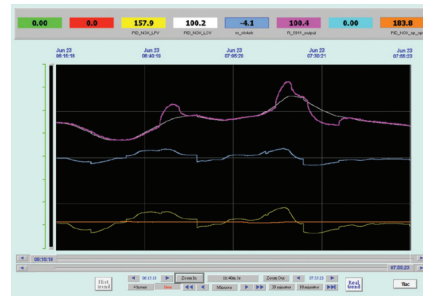
Zhrnutie hlavných výhod a nevýhod hybridného-dopredného riadenia je uvedené v tab. 1.

VYHODNOTENIE HYBRIDNÉHO-DOPREDNÉHO RIADENIA

V ďalšej časti tejto kapitoly príspevku sa nachádzajú trendy z regulácií emisií NO_x na kotle PK4n pomocou H-D riadenia. Jednotlivé farby predstavujú tieto veličiny:

- žltá = hodnota emisií NO_x nameraná z AMS_PK4n,
- biela = akčný zásah sekundárneho regulátora množstevného prietoku čpavku,
- modrá = hodnota výpočtu z výstupu výpočtového bloku,
- fialová = prietok zástreku čpavku,
- oranžová = požadovaná hodnota pre sekundárny regulátor množstevného prietoku čpavku.

Príklad zapojenia výpočtového bloku do regulácie je na obrázku č. 4. Akonáhle sa rozdiel v absolútnej hodnote medzi výstupom



Obr. 6 – Priebeh regulácie NO_x a množstva čpavku pri hybridnom-doprednom riadení na denitrifikačnom procese spalín kotla PK4s.

výpočtového bloku a výstupom primárneho regulátora nad stanovenú hodnotu v $[\text{kg/h}]$, tak sa tento rozdiel pripočíta k požadovanej hodnote množstva čpavku, čiže do požadovanej hodnoty sekundárneho regulátora. Keď absolútna hodnota rozdielu klesne pod stanovenú hodnotu v $[\text{kg/h}]$, výpočet sa vyradí z doprednej regulácie a uvažuje sa výstup – akčná veličina z primárneho regulátora. Na obrázku č. 4 je vidieť, ako táto hybridná regulácia zamedzí vzniku veľkej odchýlky emisií NO_x od emisného limitu.

Na obrázku č. 5 je vidieť, ako sa algoritmus regulácie vysporadúva s prudkou zmenou emisií NO_x . Akonáhle hodnota NO_x klesne pod 120 mg/Nm^3 na dlhšie ako 3 minúty, hodnota akčného zásahu – CV regulátora množstevného prietoku čpavku, sa zníži na polovicu a algoritmus pokračuje rovnakou logikou ako na obrázku č. 4.

ZÁVER

Nové dynamické a hybridné architektúry riadenia umožňujú tiež siahať na niektoré metódy, ktorými sa zaoberá nová oblasť, nová paradigma v oblasti kybernetiky tzv. Kyberneticko-fyzikálne systémy. Vedie to k novej neustále sa rozvíjajúcej paradigme teórie riadenia a k novým výhodám implementácie nových technológií.

Liguš Ján,

M-D-J spol. s r.o.,

Kontakt: mobil: +421905622376,

jan.ligus@mdj.sk, <http://www.mdj.sk>

Hybridné – dopredné riadenie denitrifikácie spalín kotlov

Tento príspevok pojednáva o sofistikovanom riešení problému denitrifikácie spalín a teda znížení vypúšťaných NO_x emisií do ovzdušia pri uhol'no-plynových kotloch. Pre zníženie emisií bola využitá chemická reakcia vodného roztoku amoniaku (24 – 25%) s molekulami NO_x na katalyzátoroch prostredníctvom tzv. Selektívnej katalytickej metódy – v skratke SCR (Selective Catalytic Reduction). Riadenie zástreku čpavku bolo vytvorené spojením dvoch metód riadenia a to (1) výpočtovej metódy množstva čpavku a (2) kaskadného riadenia pomocou regulátorov zaradených za sebou. Integráciu týchto dvoch metód riadenia sme označili ako hybridné-dopredné riadenie. Predkladané hybridné-dopredné riešenie riadenia vychádza z dvoch dôležitých základných predpokladov: (1) uvažuje sa jeden a pritom najpresnejší, overený a garantovaný zdroj informácií a teda v našom prípade zdroj informácií je meranie množstva NO_x v spalínach z AMS a (2) a druhý dôležitý predpoklad, aby riešenie bolo za minimalizovanú cenu a teda bez prevádzkového merania množstva NO_x . Pri takýchto podmienkach jedným z najväčších problémov pri riadení je eliminácia dopravných oneskorení pri riadení denitrifikačných procesov. Príspevok je rozdelený do dvoch hlavných častí, pričom prvá časť opisuje logiku rekonfigurácie a riadenia jednotlivých novovybudovaných energetických zariadení kotlov a druhá časť príspevku opisuje realizované hybridné-dopredné riadenie denitrifikácie obidvoch kotlov. Obidve vyššie uvedené časti sú opísané s dôrazom na aplikácie pre dva kotle v spoločnosti TEKO a to konkrétne kotla PK4s a kotla PK4n. V závere príspevku sú uvedené výhody a nevýhody uvedeného prístupu riadenia denitrifikácie kotlov.

Keywords: denitrifikácia spalín, energetické zariadenia, kotol, vnorené riadenie, kaskádne riadenie, dopredné riadenie, hybridné riadenie.