

Řešení regulace spalování na kotlích elektrárny Počerady

Josef Sýkora, Alstom, s.r.o.; Pavel Tyrpekl, ČEZ, a.s. Elektrárna Počerady

Anotace

V článku je popsáno řešení primárních opatření pro snížení NO_x na kotlích elektrárny Počerady. V letech 1997 a 1998 bylo realizováno na všech kotlích jedno pásmo dohořivacího vzduchu. Regulace spalování byla řízena od obsahu kyslíku ve spalínách a poloha regulačních klapek sekundárního vzduchu byla poměrově nastavována od polohy nejméně uhlíne zatíženého mlýnského okruhu. Hodnota emisí NO_x se snížila z původních 700 až 800 mg/Nm³ na úroveň cca 550 mg/Nm³.

Od r. 2004 na kotli K4 a na ostatních kotlích v letech 2009 a 2010 bylo instalováno měření množství vzduchu ve složitých podmínkách vzduchových kanálů. Regulace spalování byla převedena na typ: vzduchové ventilátory regulují tlak vzduchu za ohřívákem vzduchu a klapky sekundárního vzduchu regulují množství vzduchu podle uhlíneho zatížení jednotlivých okruhů. Za kouřovými ventilátory byly instalovány analyzátory NO_x, CO a O₂. Optimální nastavení přebytku vzduchu s minimální tvorbou CO je řešeno pomocí naměřených hodnot NO_x a CO. Hodnota emisí NO_x se snížila na požadovaných 500 mg/Nm³, přičemž maximální hodnota emisí CO byla nastavena na úroveň 70 mg/Nm³.

Úvod

Původní instalovaný výkon elektrárny byl 6 x 200 MW. Vlastní výstavba probíhala ve dvou fázích. Bloky č. 1 až 4 (Počerady I) byly postaveny v roce 1970 až 71. V druhé fázi byla postavena elektrárna Počerady II (bloky č. 5 a 6) - v roce 1977.

V rámci útlumového programu uhlíne elektráren byl k 1. 1. 1994 odstaven z provozu výrobní blok č. 1.

Od konce roku 2001 jsou všechny výrobní bloky řízeny ze společné technologické dozorny. Původní řídicí a kontrolní systém bloků byl v letech 1993 – 1998 v rámci modernizace nahrazen mikroprocesorovým řídicím systémem GE Fanuc.

Palivem v elektrárně je hnědé energetické uhlí, které se dopravuje po železnici z nedalekých povrchových dolů, patřících Mostecké uhlíne společnosti, skupině Czech Coal, a.s.

Kotle PG 640 od firmy Vítkovice jsou postaveny v polovenkovním provedení. Jedná se o kotle průtlačné, s přihříváním páry, dvoutahové, granulační.

Elektrárna Počerady byla projektována jako nejúspornější 200 MW blok u nás co se týče i zastavěné plochy. Vezmeme-li v úvahu kotelnu, pak na 1 MW_{el} je v Počeradech zastavěna půdorysná plocha jenom 3,5 m², zatímco např. v Pruněrově 2 jsou nároky kotelny na zastavěnou plochu téměř 1,7x větší (5,82 m²/1 MW_{el}).

Stísněné prostory v kotelně byly a jsou nyní překážkou pro uplatňování řešení ekologizace provozu, např. v řešení rozvolnění hořáků, ev. recirkulace spalin pro zajištění vyšší úrovně snížení emisí NO_x.

Parametry

jmenovitý výkon kotle	640	t/h
jmenovitý tlak	17,5	MPa
konstrukční tlak	19,2	MPa
jmenovitá teplota za přehřívákem	540	°C
jmenovitá teplota napájecí vody	252	°C
teplota kouřových plynů za kotlem	180	°C

přehřívák páry,	bloky 2,3 a 4	bloky 5 a 6	
výkon přehříváku páry	564	560	t/h
jmenovitý tlak na vstupu do přehříváku	4,02	4,12	MPa
teplota na vstupu do přehříváku	346	343	°C
jmenovitý tlak na výstupu z přehříváku	3,7	3,8	MPa
jmenovitá teplota na výstupu z přehříváku	550	540	°C

V posledních letech jsou v EPC provozovány bloky 2 až 4 na parametry výstupní páry 540/550°C a bloky 5 a 6 na parametry 540/540°C.

Teplota přehřáté páry je bez problémů dosahována i po realizaci primárních opatření pro snížení NOx. Je to umožněno mimo jiné uplatněním bifluxu, který na straně ostré páry odebírá teplo za druhým přehřívákem (šoty).

Spalované uhlí

V kotli je spalováno hnědé uhlí z MUS Czech Coal, a.s., které má mít tyto vlastnosti :

výhřevnost	8,5	až	11,4	MJ/kg
obsah vody	26	až	32	%
obsah popele v původním vzorku	27,5	až	28,5	%
obsah popele v sušině	35	až	52	%
obsah veškeré síry v sušině	0,8	až	1,8	%
výhřevnost hořlaviny	25,5	až	26,4	MJ/kg
obsah prchavé hořlaviny			59,5	%
zrnění	0	až	40	mm
bod měknutí popele T ₁			1200	°C
bod tání popele T ₂			1370	°C
bod tečení popele T ₃	vyšší než		1400	°C

uvedené teploty jsou získány od dodavatele paliva a jsou stanoveny v oxidační atmosféře.

melitelnost dle VT1	vyšší než	1,15
---------------------	-----------	------

Hodnoty spalovaného uhlí v roce 2010 byly v širokém rozmezí:

výhřevnost	9,81	až	14,20	MJ/kg
obsah vody	14,76	až	30,35	%
obsah popele v původním vzorku	19,66	až	32,07	%

Průměrná výhřevnost spalovaného paliva v EPC za r. 2010 činila 11,7 MJ/kg.

Popis kotle, základní řešení

Průtlačný kotel PG 640 byl projektován jako dvoutahový se zvláštním uspořádáním pro umístění zásobníků surového paliva a mlecích okruhů v prostoru mezi spalovací komorou a sestupným spalinovým tahem dodatkových ploch.

Kotel je tzv. poloovenkovního provedení, které je charakterizováno tím, že přední stěna a část bočních stěn spalovací komory tvoří venkovní stěny kotelny.

Nosná konstrukce kotle je zároveň i nosnou konstrukcí obvodových stěn a střechy kotelny, a dalších, v kotelně situovaných zařízení (zauhlování se zásobníky paliva, mlecí okruhy aj.).

K hoření uhelného prášku ve vznosu dochází v jednoprostorové spalovací komoře, která má obdélníkový průřez s poměrem bočních a čelních stran 1 : 2.

Zadní hrany tohoto pomyslného obdélníku jsou přitom táhle zkoseny tak, aby na vzniklých stěnách mohla být instalována vždy dvojice práškových hořáků a nasávacích hrdel sušek paliva; další dvojice (MO č. 4 a 5) jsou uprostřed zadní stěny a po jednom hořáku jsou na bočních stěnách spalovací komory – celkem má tedy ohniště kotle osm sušek paliva a osm práškových hořáků.

Skupinový práškový hořák sestává ze svařované plechové skříně rozdělené vnitřní přepážkou na dva prostory, v nichž jsou nad sebou vloženy vždy tři dvojice proudových hubic s turbulentními vložkami. Do skříně se přivádí sekundární spalovací vzduch, práškovody přivádějí do proudových hubic primární směs. Na každém práškovém hořáku se primární směs a sekundární vzduch zavádějí do ohniště ve 12 oddělených prouděch a jejich směřování probíhá až ve spalovací komoře. Vířivé vložky proudových hubic „roztácejí“ primární směs a sekundární vzduch.

Pod každým ze šesti vnitřních hořáků, tzn. s výjimkou hořáků na bočních stěnách spalovací komory, je jeden zapalovací a stabilizační hořák s výkonem max. 1500 Nm³/h zemního plynu.

Sekundární vzduch vtéká pásmovacími klapkami do dvojité plechové skříně. Vnější část vzduchové skříně je přiřazena k dolní sekci práškového hořáku, vnitřní část skříně patří k horní sekci.

V každé hořákové hubici udělují rozvířovací lopatky proudům sekundárního vzduchu rotaci téhož smyslu, jakou mají proudy práškové směsi. Ve vodorovném i svislém směru jsou ale lopatky vířivých vložek nastaveny tak, aby se všech 12 proudů práškové směsi a vzduchu po sobě „odvalovalo“.

Turbulentní vložka práškové směsi má 6 pevných lopatek. Vzduchová vířivá vložka má 8 pevných lopatek navařených radiálně na vnější povrch výtokové hubice primární směsi.

V půdorysu je sklon hořákových skříní ke stěnám spalovací komory upraven tak, aby ohniště bylo rovnoměrně vyplněno plamenem a přitom nedocházelo ke slévání proudů hořící směsi.

Ve své dolní části je spalovací komora ukončena na dvě části rozdělenou granulační výsypkou s vodním uzávěrem.

Horní část spalovací komory je nad sacími hrdly sušek zúžena nosem spalovací komory. Nad tímto výstupkem má spalovací komora čistě obdélníkový průřez.

Spalinový trakt kotle je až k ohříváku vzduchu nedělený a jsou v něm umístěny výhřevné plochy přehříváků, přihříváku a ohříváku vody.

Vzhledem ke značné délce vodorovného mezitahu spalin (dané umístěním zauhlování, zásobníků paliva a mlýnicí mezi spalovací komorou a zadním tahem) jsou do mezitahu zařazeny výsyvky, které omezují usazování popílku v této partii kotle. Za výsypkami je vytvořen další „nos“, jímž je usměrňován nátok spalin do hadů přehříváku IV a do zadního tahu.

Spaliny o teplotě cca 170 °C jsou z kotle odsávány přes soustavu kouřovodů do dvouvětvoých elektrostatických odlučovačů popílku.

Řešení Denox

Realizace primárních opatření na snížení NOx u kotlů EPC prošla dvěma etapami :

V letech 1997 a 1998 bylo na všech provozovaných kotlích EPC (bloky B2 až B6) realizováno primární opatření pro snížení NOx.

Z původně dosahovaných koncentrací $\cong 700 \text{ mg NOx/Nm}^3$ se posunulo spalování s emisemi NOx do oblasti cca 550 mg /Nm^3 .

Požadovaného efektu se dosáhlo stupňováním přívodu spalovacího vzduchu do ohniště kotle. Princip těchto opatření spočívá v tom, že proudovými hubicemi práškových hořáků je zajišťován přívod primárního a sekundárního vzduchu přibližně na úrovni stechiometrického množství. Realizací primárních opatření ke snížení tvorby oxidů dusíku ve spalinách bylo pásmo hoření doplněno přívodem tzv. dohořivacího vzduchu. Ten je do spalovací komory zaváděn deseti kruhovými dyšnami o $\varnothing 350 \times 10 \text{ mm}$ vyrobenými ze žáruvzdorné oceli tř. 17. Šest dyšen je umístěno na přední stěně ohniště v úrovni + 20,5 m a čtyři na zadní stěně v úrovni + 19,95 m.

Dyšnám jsou předřazeny regulační klapky s ručním pákovým ovládním a aretací nastavené polohy. Požadované množství vzduchu na levou a pravou část dohořivacích dyšen je regulováno automaticky ovládanými klapkami dle nastavené závislosti. Měření množství dohořivacího vzduchu se provádí Venturiho dýzami.

Algoritmus regulace spalování - I. etapa (1997 až 1998)

Algoritmus stupňovaného přívodu spalovacího vzduchu je proveden v závislosti od parního výkonu kotle a přebytku kyslíku ve spalinách. Regulační odchylku zajišťují věnce vzduchových ventilátorů.

Významným vstupním signálem regulace na jednotlivých práškových hořácích je poměrné zatížení podavačů paliva. Regulační odchylka pak odpovídající měrou otevírá na daném okruhu sekundární klapku (místní označení – klapka K17) a upravuje množství sekundárního spalovacího vzduchu. Konečné polohy sekundárních klapek jsou korigovány velikostí otevření klapek temperovacího vzduchu do mlýna (místní označení – klapka K1).

Žádaná hodnota přebytku kyslíku ve spalinách je operátorem kotle upravována pomocí korekce tak, aby emise oxidů dusíku a oxidu uhelnatého nevybočovaly z předepsaných pásem a nepřekračovaly stanovené emisní limity.

Algoritmus regulace spalování II. etapa

(na K4 od r. 2004, na ostatních blocích v r. 2009 a 2010)

Podstatná změna regulace spalování oproti předchozí spočívá v tom, že vzduchové ventilátory regulují tlak vzduchu v nastavené závislosti podle parního výkonu kotle. Množství sekundárního a dohořivacího vzduchu regulují příslušné regulační klapky podle funkce dle parního výkonu kotle. Mezi jednotlivými hořáky se sekundární vzduch přerozděluje podle poměrného uhelného zatížení mlécích okruhů.

Novější algoritmus rozšiřuje dosud popsané funkce (I. etapy) tím, že hledá optimum mezi souvisejícími hodnotami oxidů dusíku NOx a oxidu uhelnatého CO.

Ve spalinových kanálech za každým kouřovým ventilátorem jsou instalovány analyzátoři NOx, CO a obsahu kyslíku v suchých spalinách.

Do každého kanálu sekundárního vzduchu jsou v místech za regulační klapkou sekundárního vzduchu vloženy segmentové clony. Úprava tlaku spalovacího vzduchu na těchto clonách zlepšuje regulační charakteristiku sekundárních klapek. Do příčných průřezů ve vzduchových kanálech jsou vloženy Raichlovy speciální sondy (kotel K4) nebo hřebenové sondy (na ostatních blocích) pro provozní měření rychlosti proudění sekundárního vzduchu.

V systému regulace spalování jsou obě regulace dle etapy I i II zachovány. V posledním období se výhradně využívá nový způsob regulace spalování dle provedené II etapy.

Měření a regulace, sledování stability hoření

Pro řízení bloku je v EPC nasazen systém GE Fanuc. Systém umožňuje odstavení bloku do předem definovaného stavu.

Komunikace je provedena redundantně. Každá funkční řídicí jednotka je osazena dvěma sadami komunikačních karet. Systém pracuje v operačním prostředí Windows NT na dvou serverech. Operátor má k dispozici dva počítače a každý počítač pracuje s dvěma monitory.

Řízení kotle i stroje provádí jeden operátor. Všechny bloky EPC a pracoviště operátorů chemické úpravy vody a odsíření jsou umístěny v jednom sále, v tzv. společné technologické dozorě.

Výsledky provozu

Nová regulace kvalitativně zlepšuje a zpřesňuje proces spalování uhelného prášku a přináší nemalý efekt v omezování produkce emisí a zvyšování účinnosti kotle.

V následující tabulce je uveden přehled některých veličin získaných z půlhodinových průměrů ze systému emisního měření Emon za rok 2009 a 2010 zpracovaných do a od zavedení nové regulace spalování na jednotlivých blocích elektrárny Počerady:

B2

	CO mg/Nm ³	NOx mg/Nm ³	CO ₂ g/Nm ³	O ₂ %	t sp °C
do 17.5.2010	51,5	551,9	219,2	7,26	170,8
od 17.5.2010	80,6	478,3	232,6	7,03	170,3
rozdíl	-29,2	73,6	-13,4	0,23	0,4

B3

do 28.7.2010	45,7	536,1	235,7	7,13	174,6
od 28.7.2010	50,8	497,0	240,1	6,91	171,7
rozdíl	-5,1	39,1	-4,4	0,22	2,9

B4 (regulace zavedena již od r. 2004)

průměr za r. 2009	59,5	483,9	230,6	7,05	171,5
průměr za r. 2010	57,2	496,4	236,9	6,75	171,6

B5

do 26.1.2010	61,5	569,1	232,9	7,40	176,7
od 26.1.2010	73,9	517,9	244,1	6,84	180,3
rozdíl	-12,4	51,1	-11,2	0,56	-3,6

B6

do 10.11.2009	34,6	561,4	255,0	6,06	175,0
od 10.11.2009	60,4	491,2	254,5	6,18	173,4
rozdíl	-25,8	70,2	0,4	-0,13	1,6

První řádek jsou průměrné hodnoty od 1.1.2009 do data zavedení nové regulace spalování dle algoritmů a prací Alstom, druhý řádek jsou průměrné hodnoty od zavedení nové regulace do 31.12.2010.

Dlouhodobě jsou nejlepší výsledky dosahovány na kotli K4, u kterého je nová regulace spalování v provozu již od roku 2004.

V následující tabulce je uveden přehled dosahovaných hodnot nedopalu ve strusce a popílku, jaký byl do zavedení nové regulace spalování a po ní. Hodnoty jsou získány z výsledků laboratoře EPC za období od 1.1.2009 do 31.12.2010.

Obsah spalitelných látek v popílku v %

	B2	B3	B4	B5	B6
průměr za rok 2009 a 2010	1,03	0,93	0,93	0,89	0,97
zavedení nové regulace	17.5.2010	28.7.2010	v r. 2004	26.1.2010	10.11.2009
nedopal dříve	1,12	0,99		1,03	1,30
od nové regulace	1,05	0,98		0,89	1,04

Obsah spalitelných látek ve strusce v %

	B2	B3	B4	B5	B6
průměr za rok 2010	14,06	10,70	10,74	8,65	14,32
zavedení nové regulace	17.5.2010	28.7.2010	v r. 2004	26.1.2010	10.11.2009
do zavedení regulace	13,07	10,51		9,37	15,80
od nové regulace	14,55	10,88		8,60	14,32

Z dat je patrné, že uvedenou úpravou regulace spalování nedošlo ke zhoršení výsledků spalitelných látek ve strusce a popílku, ba naopak.

Specifičnost provozu

U každého kotle v EPC je více či jinak protkán kanál přívodního sekundárního vzduchu bezprostředně za regulační sekundární klapkou palivovými svodkami. U mlýnského okruhu jsou dvě palivové svodky. U mlýnského okruhu č. 34 na bloku 3 je zúžení prostoru přívodního vzduchu za ohybem a regulační sekundární klapkou největší, takže činný průřez tvoří jen 60% původního rozměru obdélníkového kanálu.

Blok B3 má navíc od poslední opravy v polovině roku 2010 problém s ovládáním posilovacího kouřového ventilátoru odsiřovací jednotky, takže blok je prakticky provozován jen na jmenovitém výkonu. Spalovací komora je trvale vystavena vysokému tepelnému toku a zřejmě proto tento blok měl nejvíce problémů se struskováním, konkrétně v nasávacích hrdlech sušek spalin. U krajních MO je případ struskování nejčastější, a to u všech kotlů EPC. Proto jsou tyto okruhy již od r. 1996 vybaveny parním ofukem ústí sušek a podle potřeby jsou provozovány. U kotle bloku 3 se navíc přidal problém se struskováním sušky u mléčícího okruhu č. 34. Proto bylo u tohoto kotle na konci roku 2010 zvýšena regulovaná úroveň požadovaných emisí NOx z původních 490 mg/Nm³ na 510 mg/Nm³ a regulace od hodnot CO byla ponížena na úroveň 50 mg/Nm³.

Trvale vyšší hodnoty emisí NOx vykazuje blok č. 5.

S ohledem na dlouhodobé riziko zvýšeného zahoření ve mlýnech MO č. 52 a 53 byla a je zadána žádaná hodnota teploty směsi za třídičem u těchto MO o 10°C nižší, než u ostatních MO.

Dlouhodobé problémy vykazuje provozní měření kyslíku ve spalinách na začátku druhého tahu kotle.

Přisávání falešného vzduchu je patrně vyšší u tohoto kotle, což potvrzují vyšší teploty spalin za kotlem.

V roce 2010 byla v EPC diskuse nad ekonomikou provedených opatření. Nastal paradox, související s tím, že poplatky za vykazované emise CO₂ převyšovaly úspory dosažené snížením emisí NO_x.

Příčina této anomálie byla ve způsobu vyhodnocování CO₂, dle tzv. přepočtového koeficientu stanoveného již dříve příslušnou autorizovanou měřicí organizací. Vlivem snížení emisí NO_x a rovněž přebytku vzduchu ve spalinách za kotlem došlo přirozeně ke zvýšení koncentrace CO₂ (viz Ostwaldův trojúhelník pro spalované hnědé uhlí O₂ + CO₂ = 18,4%). Množství spalin se zavedením výše popsaných opatření snížilo. Množství spalin se však počítalo přes původní převodní koeficient. Tato anomálie byla v polovině roku 2010 napravena novým měřením a určením nového koeficientu pro výpočet množství spalin.

Následně po realizaci primárních opatření pro snížení NO_x byl v letech 2000 až 2002 uveden do provozu monitoring spalování uhlého prášku. Aplikace monitoringu hlídání stability hoření má významný podíl při startu a na bezpečném řízení kotle. Po jeho zavedení bylo možné snížit minimální výkon z původních 140 MW až na 120 MW a tím rozšířit regulační rozsah výkonu všech bloků v EPC. Průměrná spotřeba zemního plynu na najetí bloku se po aplikaci monitoringu spalování v EPC snížila téměř na polovinu.

V podpůrných službách v sekundární regulaci pracují bloky EPC v jednom pásmu v rozsahu výkonu 120 až 200 MW s rychlostí změny výkonu 4 MWel/min. Při uplatnění regulace frekvence sítě v tzv. primární regulaci se skokovými změnami až ±10 MW činí minimální výkon bloku 110 MW a maximální výkon 210 MW. Při přejíždění s nízkého na vyšší výkon bloku se v regulaci najíždí resp. odstavuje jeden mlecí okruh. I za těchto podmínek je splněna kvalita regulace s dodržением předepsaného tolerančního pásma na tlaku páry.

Změna účinnosti kotle při vyhodnocení za rok 2009 a 2010 před a po zavedení nové regulace spalování u jednotlivých veličin (teplota spalin za kotlem, kyslík, nedopal ve strusce a popílků) je dle výše získaných hodnot následující:

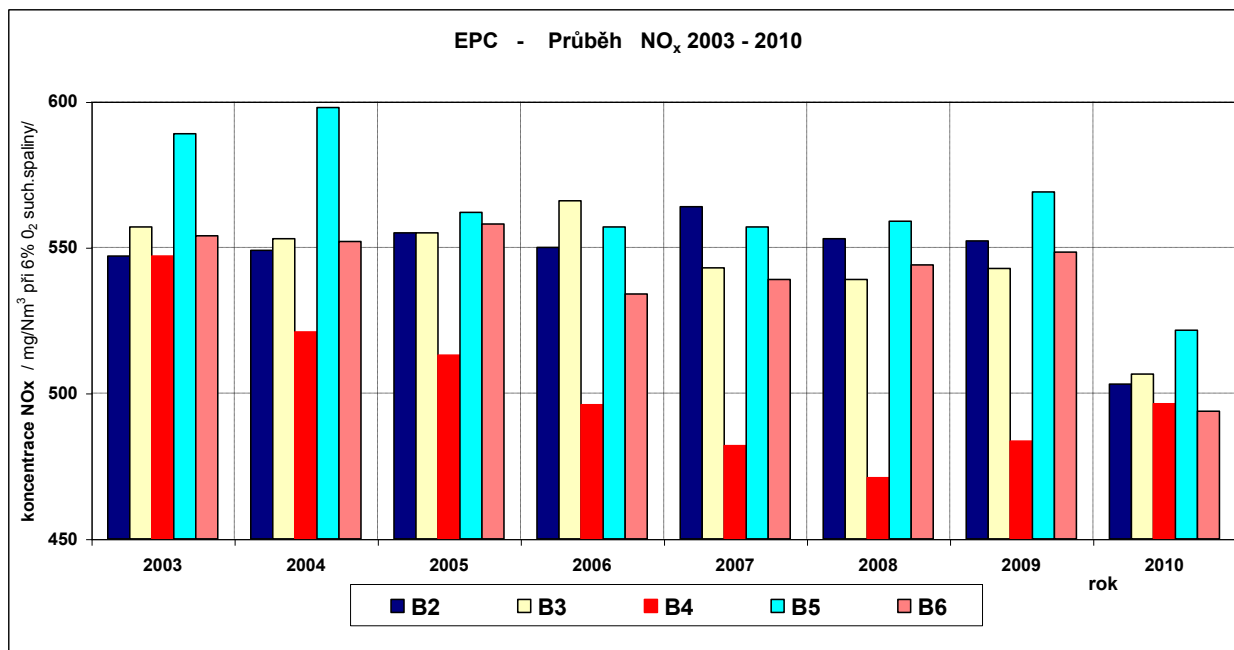
EPC blok	t spalin	kyslík	struska	popílek	celkem
B2	0,03	0,16	-0,09	0,04	0,14
B3	0,19	0,16	-0,01	0,01	0,35
B5	-0,24	0,40	0,11	0,08	0,35
B6	0,11	-0,09	0,21	0,14	0,37

Účinnost kotle se zvýšila v průměru o 0,3% a emise NO_x klesly v průměru o 60 mg/Nm³ přičemž hladina emisí CO je udržována na přijatelné hodnotě cca 70 mg/Nm³.

Při úspoře 0,3% na účinnosti kotle se každou hodinu spálí o 510 kg uhlí méně při průměrném výkonu bloku 180 MW. Za 1 rok provozu (7000 h/rok) činí úspora uhlí 3 582 tun u 1 kotle, pro 4 bloky v EPC je roční úspora na palivu 14 328 tun.

Nespálením tohoto uhlí se sníží emise CO₂ o 0,57 t/h, což pro 4 kotle činí snížení emisí CO₂ o 16 094 tun za 1 rok provozu.

Přehled průměrných ročních emisí NO_x na kotlích EPC v letech 2003 až 2010



Závěr

Emise NO_x na kotlích el. Počerady byly sníženy v letech 1997 až 1998 metodou primárních opatření s jedním pásmem dohořivacího vzduchu z původních hodnot cca 700 mg/Nm³ na úroveň 550 mg/Nm³.

Pomocí realizované metody měření množství vzduchu ve vzduchových kanálech v podmínkách EPC byla převedena (na kotli K4 v r. 2004 a na ostatních provozovaných kotlích v r. 2009 a 2010) regulace spalování tak, že vzduchové ventilátory regulují požadovaný tlak dle parního výkonu kotle a sekundární klapky regulují množství sekundárního vzduchu. Regulace kyslíku ve spalinách je optimalizována na úroveň emisí NO_x pod stanovenou hodnotu (500 mg/Nm³) při přijatelné výši emisí CO na úrovni do 70 mg/Nm³, přičemž je využíváno měření CO a NO_x za kouřovými ventilátory.

Uvedených výsledků úrovně emisí NO_x a CO na kotlích el. Počerady bylo dosaženo bez jakékoliv další realizace úprav na technologii zařízení.

Díky sníženému přebytku vzduchu ve spalinách za kotlem došlo i ke zvýšení účinnosti kotle, snížení množství spalovaného uhlí a tím i ke snížení emisí CO₂.

Josef Sýkora

ALSTOM, s.r.o.

545102024

josef.sykora@power.alstom.com