

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

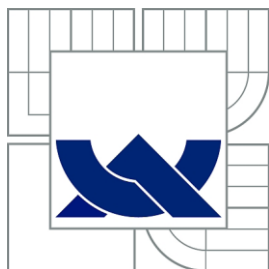
NÁVRH ELEKTROSTATICKÉHO ODLUČOVAČE
THE ELECTROSTATIC PRECIPITATOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

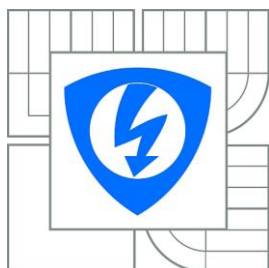
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

KAMIL BROŽÁK

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

NÁVRH ELEKTROSTATICKÉHO ODLUČOVAČE
THE ELECTROSTATIC PRECIPITATOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

KAMIL BROŽÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR HUTÁK, Ph.D.

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Kamil Broďák

Ročník: 3

ID: 121600

Akademický rok: 2011/12

NÁZEV TÉMATU:

Návrh elektrostatického odlučovače

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s problematikou elektrostatických filtrů.
2. Proveďte výpočetní návrh filtru se zadanými parametry.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího

Termín zadání: 21.9.2011

Termín odevzdání: 31.5.2012

Vedoucí projektu: Ing. Petr Huták, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI, díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na seznámení s problematikou elektrického odlučování. První část popisuje princip elektrického odlučovacího procesu. Druhá část se věnuje převážně mechanickým částem a jejich funkci v rámci elektrického odlučovače. Třetí část je zaměřena na použití elektrických odlučovačů a systému jejich řízení. V poslední části se věnuji návrhu elektrického odlučovače dle zadaných parametrů.

Vzhledem k dominantnímu postavení elektrických odlučovačů firmy ZVVZ-Enven Engineering, a.s. z Milevska v České a Slovenské republice se tato práce věnuje především produktům z jejich výrobního programu.

Klíčová slova

elektrické odlučovače; koronový výboj; nosný plyn; vysokonapěťové elektrody; usazovací elektrody; tuhé znečišťující látky

Abstract

The Bachelor's thesis is focused on the issue of power separation. The first part describes the principle of power separation process. The second part deals mainly with mechanical parts and their function inside the electric precipitator. The third part focuses on the use of electrostatic precipitators and system management. The last section is devoted to design an electric precipitator according to the specified parameters.

Due to the dominance of electric separators company ZVVZ-Enven Engineering, Milevsko from the Czech and Slovak Republics, the work focuses primarily on the products offered by their production program.

Keywords

electric precipitators; corona discharge; carrier gas; high voltage electrodes; settling electrodes; solid pollutants

Bibliografická citace

Brodák, K. *Návrh elektrostatického odlučovače*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 38 s. Vedoucí bakalářské práce
Ing. Petr Huták, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Elektrostatické odlučovače, jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků z ustanovení části druhé, hlavy VI, díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 23.5. 2012

Podpis autora



Obsah

Úvod.....	8
Podstata funkce elektrického odlučovače.....	9
Elektrický odlučovač (EO) – popis.....	11
Stručný popis teorie elektrického odlučování.....	12
Stručný souhrn popisu funkce EO.....	17
Výklad některých pojmů.....	18
Mechanické části elektrického odlučovače.....	18
Skříň.....	19
Výsypky u EO.....	19
Nosná (podpěrná) ocelová konstrukce pro EO.....	19
Vnitřní části u EO.....	19
Vstupní a výstupní tvarové díly.....	22
Užití EO.....	22
Systém řízení	23
Popis systému řízení napájení EO	24
Funkce – základní režim buzení.....	24
Přerušovaný režim buzení – semipulsní.....	24
Řízení opacity.....	25
Řízení zpětné korony.....	25
Teorie výpočtu a návrhu kapacity EO.....	26
Elektrické napájení a řízení sekcí EO.....	27
Schéma parametrů pro návrh a výpočet kapacity EO.....	29
Návrh a výpočet kapacity EO pro konkrétní zadanou akci.....	30
Zadávací parametry pro návrh EO.....	30
Zadané požadavky.....	31
Podmínky okolí.....	31
Konstrukční požadavky na elektrický odlučovač.....	31
Vlastní výpočet a návrh EO – rozbor, postup a algoritmus, mechanický návrh.....	31
Rozbory a úpravy zadávacích parametrů.....	32
Určení potřebné účinnosti (odlučivosti) EO.....	33
Určení potřebné odlučovací rychlosti w [m/s].....	33
Určení potřebné usazovací plochy (kapacity) celého EO.....	33
Určení aktivního průtočného průřezu EO a průtočné rychlosti čištěných spalin.....	33
Určení aktivní délky EO a počtu elektrických sekcí v sérii (za sebou).....	34
Určení napájecích zdrojů VVN pro jednotlivé sekce EO.....	35
Určení sekundárních (výstupních) hodnot usměrněného proudu I_2 [kV].....	35
Určení sekundárních (výstupních) hodnot usměrněného napětí U_2 [kV].....	35
Závěr.....	36
Literatura	38

Úvod

Zvyšování životní úrovně stále se rozšiřující lidské populace, které se více-méně poměřuje materiálním zaopatřením sebou nese nemalou zátěž pro životní prostředí. To vede ke zhoršování kvality života na Zemi.

Jedním z mnoha kritérií posouzení kvality životního prostředí je čistota ovzduší. Znečištění ovzduší ať už plynnými, kapalnými nebo tuhými příměsemi přesahuje hranice jednotlivých krajín a jeho ochrana se stala mezinárodní záležitostí. V dnešní době státy vázané mezinárodními dohodami dohlíží na dodržování hygienických norem a vytváří tlak na znečišťovatele. V České republice platí zákon 86/2002 Sb. o ochraně ovzduší a k tomu náležící vyhlášky a nařízení, které stanovují emisní limity, případně další podmínky, pro provozování stacionárních zdrojů znečišťujících ovzduší. Mezi zařízeními používanými k čištění technologických a odpadních plynů od tuhých a kapalných příměsí mají významné místo elektrické odlučovače.

První pokusy o elektrické odlučování se datují okolo roku 1824, kdy učitel matematiky v Lipsku M. Hohlfeld popsal princip navázání elektrických nábojů na prachové částice. První komerčně využitelný systém elektrického odlučovače byl vyvinut v roce 1906 po pokusech F. D. Cottrella na University of California, Berkeley. Podobné pokusy se v té době prováděly i v Německu.

Původní elektrické odlučovače byly sestaveny z drátu (vysokonapěťová-sršící elektroda) vloženého do trubky, která tvořila usazovací plochu pro prachové částice (usazovací elektrodu). Později se vývoj rozšířil na drát proti rovinné ploše usazovacích elektrod. Z počátku byl vývoj značně brzděn nedostupností vhodných zdrojů velmi vysokého usměrněného napětí. S vynálezem rotačního usměrňovače dochází k výraznému rozvoji tohoto odvětví. Na území Československa se začínají první odlučovače objevovat ve čtyřicátých letech dvacátého století. Po roce 1948 u nás začíná systematictější výzkum možností elektrického odlučování, který v roce 1954 přechází pod nově založený Výzkumný ústav vzduchotechnických a chemických zařízení v Praze. Tento v roce 1958 přechází pod státní podnik ZVVZ Milevsko, kde se postupně začíná s výrobou elektrických odlučovačů, trvající nepřetržitě dodnes. Momentálně se výrobou elektrických odlučovačů u nás zabývá firma ZVVZ-Enven Engineering, a.s. a firma Polata. Obě firmy sídlí v Milevsku. Na tyto výrobce jsou u nás navázány firmy ČKD Praha a Bas Elektra Brno, které dodávají potřebné zdroje velmi vysokého napětí vlastní výroby. [5, 6]

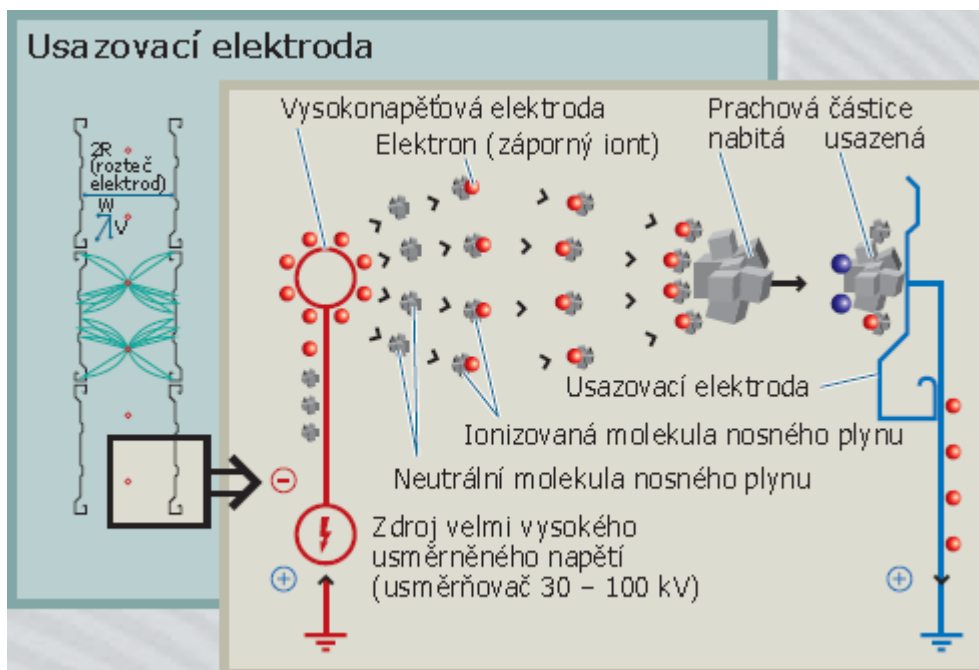
Vzhledem k tomu, že trubkové elektrické odlučovače se v současnosti u nás používají jen výjimečně a to pro speciální případy nebo zvláštní složení plynů (např. odlučování olejů a dehtů), budu se v této práci zabývat jen komorovými (horizontálními) odlučovači z výrobního programu firmy ZVVZ-Enven Engineering, a.s. které jsou v ČR a SR nejrozšířenější. Jejich využití je převážně v energetice pro čištění plynů s vysokými objemovými průtoky ze spalovacích procesů.

Podstata funkce elektrického odlučovače

V elektrických odlučovačích se tuhé nebo kapalné příměsi v nosných plynech odstraňují za pomoci působení elektrických sil. Někdy se také používá ne zcela přesného názvu elektrostatické odlučovače. Elektrické pole vytvořené mezi elektrodami je sice elektrostatické, ale pohybem iontů a potažmo nabitých částic vzniká v prostoru mezi vysokonapěťovými (sršícími) a uzemněnými usazovacími elektrodami proud.

Zásadní roli u elektrických odlučovačů sehrává tvar a výše intenzity elektrického pole mezi elektrodami. Elektrické pole působí na průběh odlučovacího procesu jednak tím, že vyvolá silové působení na částice a pak také za určitých podmínek způsobuje nárazovou ionizaci plynu tzv. koronu a částice jsou vzniklými ionty plynu nabíjeny. Oba procesy na sebe navazují a současně se navzájem ovlivňují.

Překročí-li intenzita elektrického pole v některém místě tzv. kritickou hodnotu, dojde k nárazové ionizaci plynu – koronovému výboji. Při koronovém výboji vznikají volné elektrony a kladné ionty plynu. Hovoříme o tak zvané záporné koruně a to vzhledem k tomu, že u většiny elektrických odlučovačů se na vysokonapěťové elektrody přivádí záporná polarita usměrněného napětí z důvodu vyššího přeskokového napětí, které umožňuje provozovat odlučovač při vyšším napětí. Další důvod je také větší pohyblivost volných elektronů. Vzhledem k vysoké pohyblivosti získají elektrony vysokou rychlost a tím i velkou energii. Narážením na neutrální molekuly plynu vyvolávají sekundární ionizaci. Rychle se pohybující elektrony jsou samy ionizujícími činiteli – dochází k lavinové nárazové ionizaci. Ve větší vzdálenosti od vysokonapěťové elektrody je intenzita elektrického pole nižší, poklesne i rychlost elektronů a ty difundují na neutrální molekuly plynu. Kladné ionty se pohybují působením elektrické síly zpět k vysokonapěťové elektrodě. V určité vzdálenosti od vysokonapěťové elektrody již proudí směrem k usazovacím elektrodám pouze záporné ionty spolu s odlučovanými částicemi.

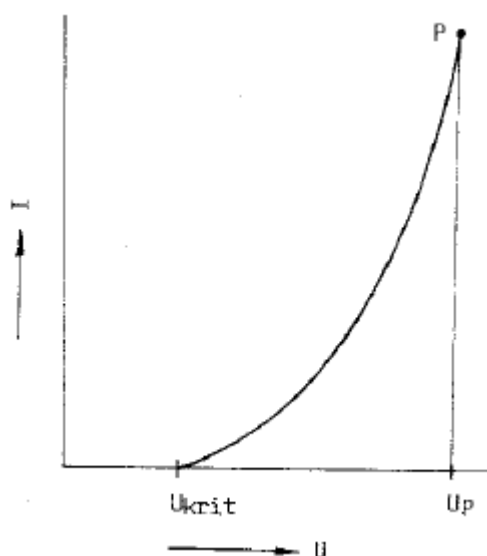


Obr.1: Popis funkce elektrického odlučování

Nevýhodou záporné korony v porovnání s kladnou je, že při ní vzniká zvýšená tvorba ozónu. Proto se u elektrických odlučovačů určených pro přečišťování vzduchu z prostor, kde pobývají lidé a vzduch se po přečištění vrací zpět, využívá méně účinná kladná korona. Odlučovače na bázi kladné korony nejsou předmětem této práce.

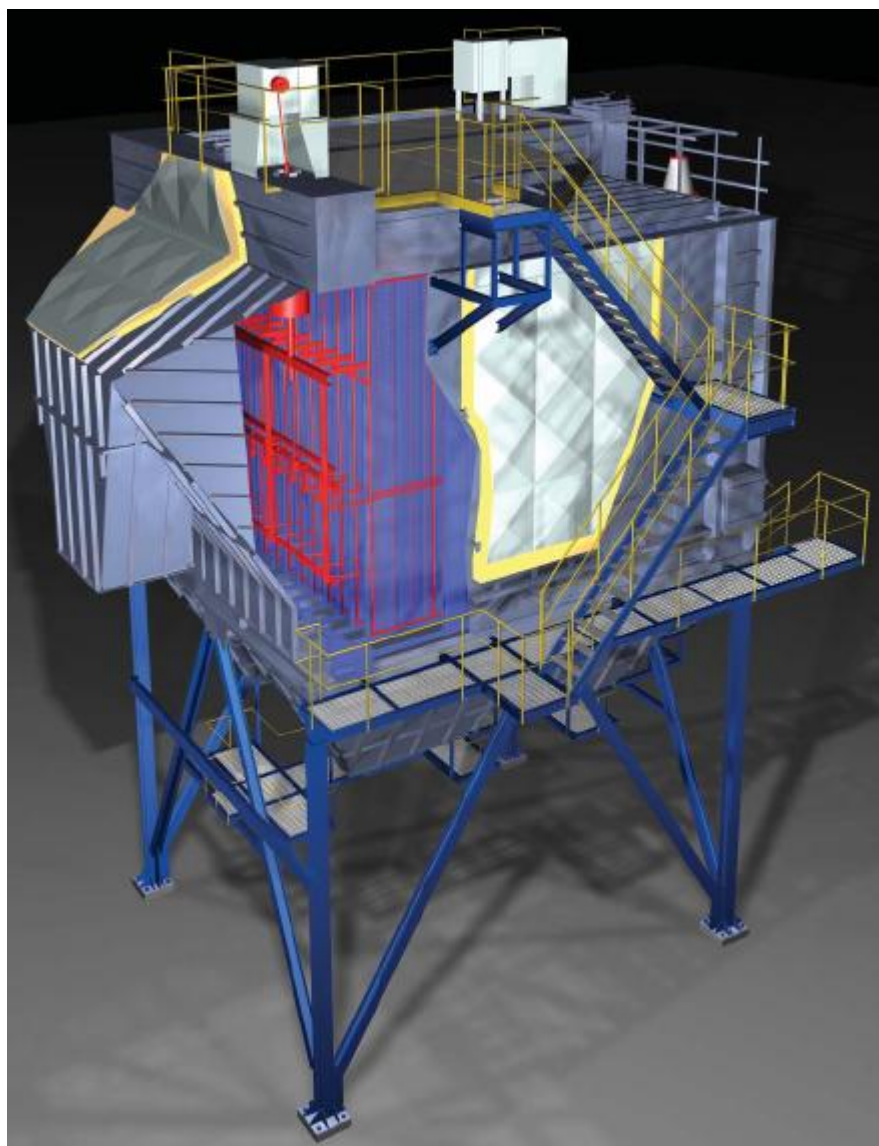
Všechny plyny nelze ionizovat, proto je třeba zajistit, aby v nosném plynu byl obsažen některý z elektronegativních plynů a to alespoň v minimální míře. Elektronegativní plyny snadno tvoří spolu s volnými elektrony negativní ionty. [1, 2, 3]

Závislost proudu na přivedeném napětí se nazývá voltampérová charakteristika. Ta je základní provozní charakteristikou elektrického odlučovače. Důležitý údaj je také velikost přeskokového napětí, což je napětí, při kterém dojde k jiskrovému výboji mezi elektrodami.

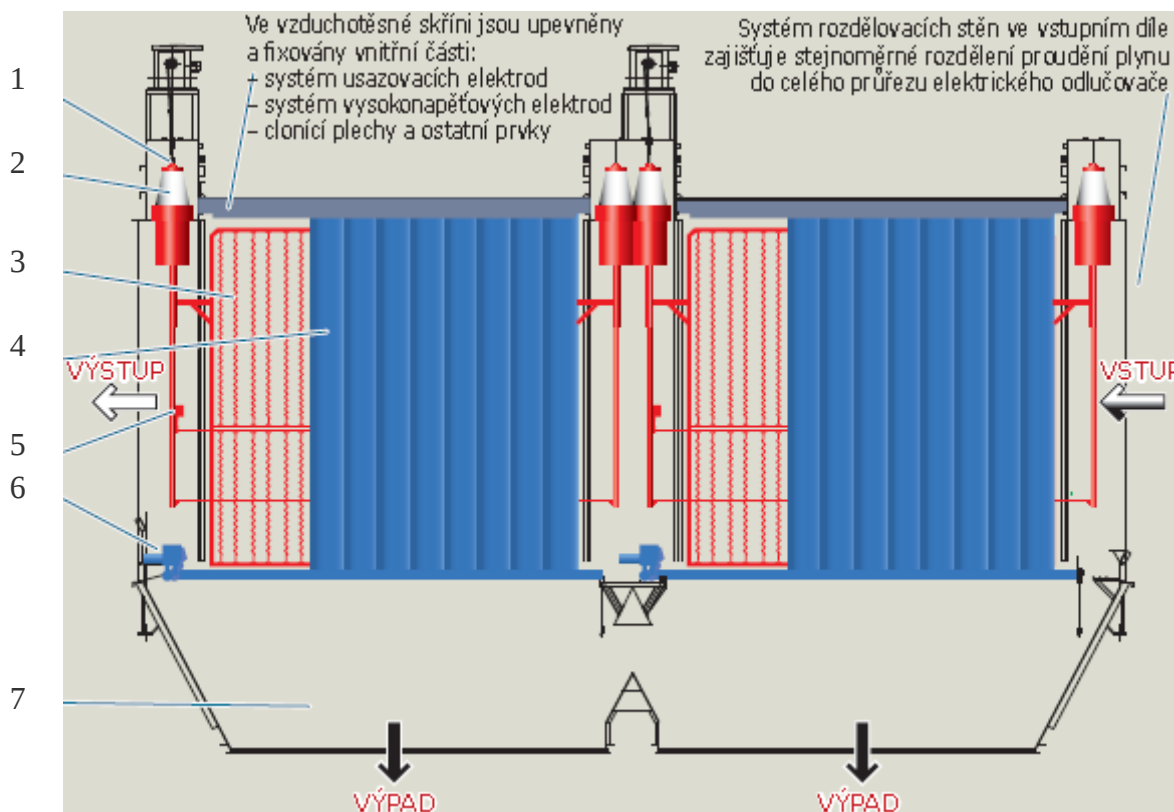


Obr.2: Voltampérová charakteristika elektrického odlučovače

Elektrický odlučovač (EO) - popis



Obr.3: Celkový pohled na uspořádání jednosekcového elektrického odlučovače



Obr.4: Popis vnitřních částí dvousekcového elektrického odlučovače

1. Usměrněné velmi vysoké napětí je přiváděno na vysokonapěťové elektrody přes zavěšení vysokonapěťového systému
2. Vysokonapěťový systém každého el. pole (sekce) je zavěšen na kónických podpěrných izolátorech
3. Vysokonapěťové elektrody jsou vypnuty v tuhých trubkových rámech
4. Usazovací elektrody jsou profily válcované za studena z hlubokotažných plechů
5. Oklepávací systémy pomocí kladiv a nárazníků regenerují (čistí) vysokonapěťové i usazovací elektrody v nastavených cyklech
6. Usměrněné velmi vysoké napětí (VVN) je dodáváno na vysokonapěťové elektrody přes zavěšení vysokonapěťového systému
7. Odloučený prach sklouzává vlivem oklepávání do výsypek, odkud je dál odváděn

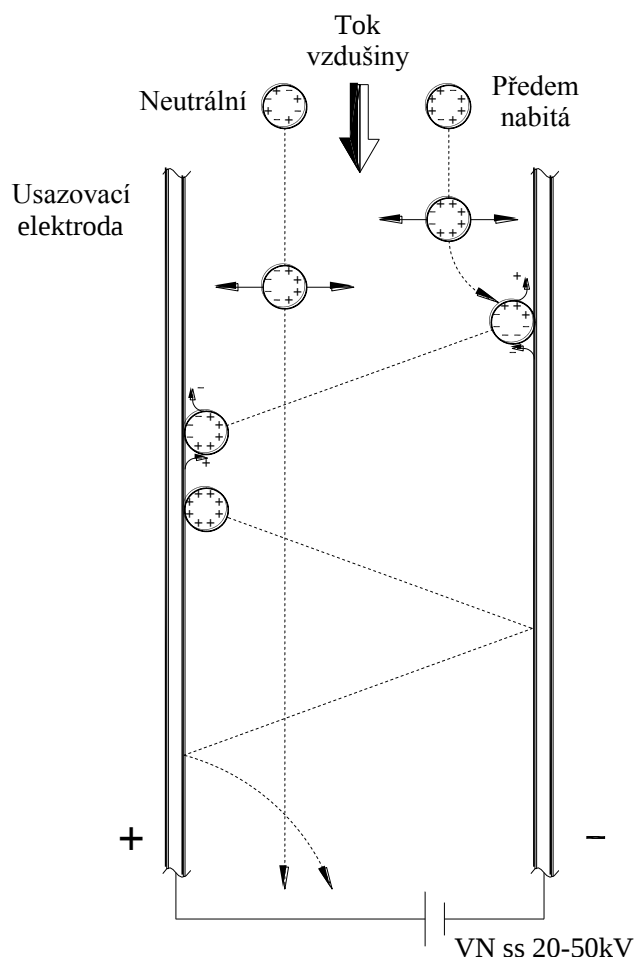
Stručný popis teorie elektrického odlučování

Aktivní vnitřní části elektrických odlučovačů tvoří dva základní systémy:
 systém vysokonapěťových (sršících) elektrod (VNE)
 systém usazovacích (sběracích) elektrod (USE).

Tyto dva systémy jsou vzájemně elektricky izolovány tak, že jediným možným propojovacím elementem mezi nimi je vzdušina – nosný plyn obsahující odlučovaný prach.

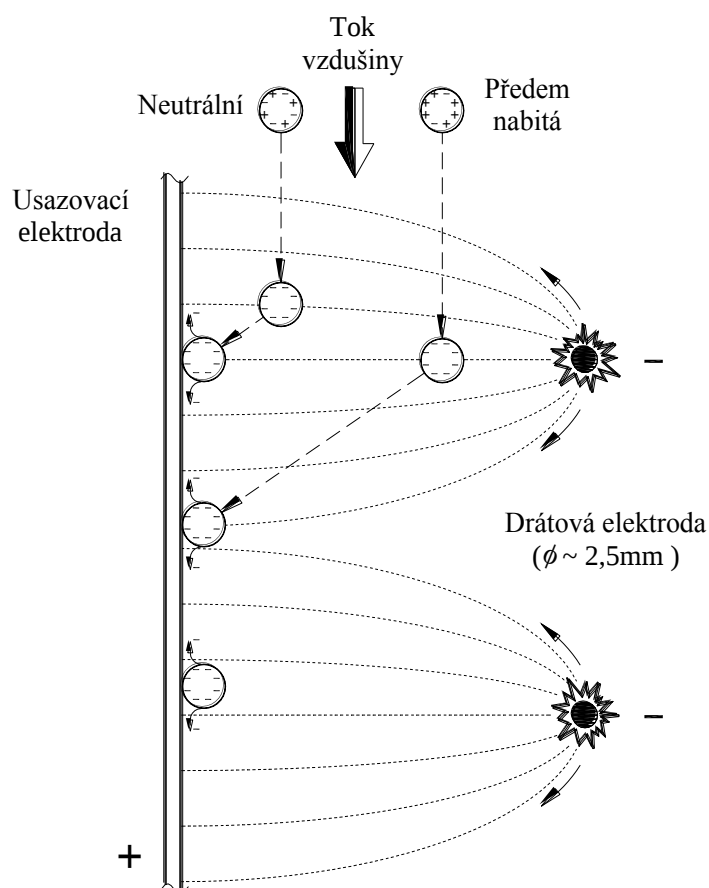
Systém usazovacích elektrod (USE) je tvořen soustavou plochých desek vodivě propojených se skříní, která je spolu s ocelovou konstrukcí a všemi ostatními vnějšími částmi uzemněna, tedy připojena na nulový potenciál elektrického napětí.

Systém vysokonapětových elektrod (VNE) je od zmíněného systému USE elektricky izolován. Systém VNE je zpravidla tvořen vysokonapětovými dráty malého průměru (cca 2,5mm) nebo hroty. Důvodem této konstrukce je využití elektrického jevu tzv. koronového výboje. Na systém vysokonapětových elektrod přivedeme usměrněný záporný potenciál vysokého napětí. Pokud by vysokonapětové elektrody byly stejné desky jako usazovací elektrody, vznikl by zde jev tzv. homogenního elektrického pole, to znamená, že by nevznikly žádné přídržné síly. Částice prachu by pak prošly mezi oběma systémy v podstatě bez následků, kromě toho, že by několikrát změnily svou polaritu, viz (obr. 5).



Obr. 5: Samotné elektrické pole nemůže účinně zachycovat prachové částice.

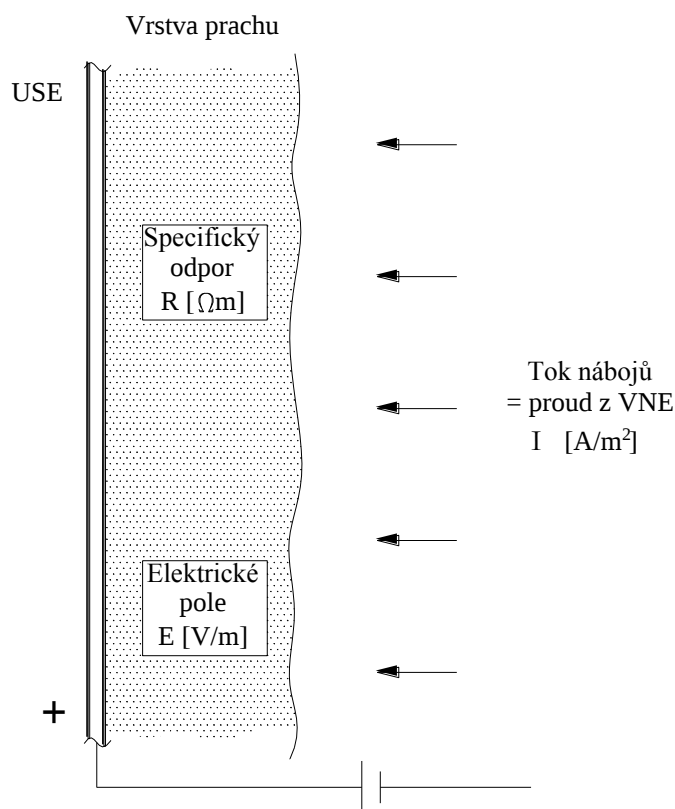
Bude-li vysokonapětová elektroda drát o malém průměru oproti usazovací elektrodě (desce), podstatně vzroste v okolí drátu intenzita elektrického pole a nastane jev zvaný koronový výboj. Vlivem neustále vznikajících koronových výbojů dochází ke vzniku obrovského množství nabitých částic, které „bombardují“ částice prachu proudící mezi systémy. Prachové částice tak získají zápornou polaritu, a díky intenzitě elektrického pole jsou jeho silou přitaženy a drženy na usazovacích elektrodách, které mají opačný (nulový) potenciál napětí, viz. (obr. 6).



Obr. 6: Tok nábojů (=proud) zabraňuje změně polarity, částice zůstává na místě
Celý tento jev lze zjednodušeně popsat za využití Ohmova zákona

$$E(\text{V/m}) = R(\Omega\text{m}) \times I(\text{A/m}^2) \quad (1)$$

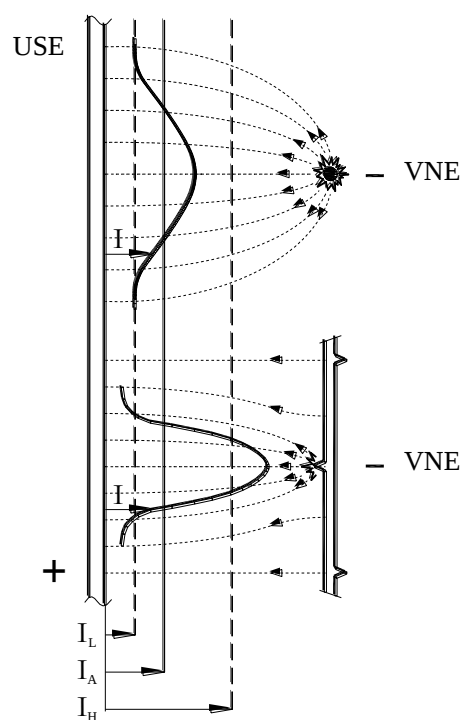
Proces odloučení prachových částic z proudu vzdušiny není však takto ideální, protože prach usazený na usazovacích elektrodách tvoří překážku v podobě elektrického odporu (obr. 7), a tudíž narůstá hodnota potřebného dodávaného el. napětí. Z výše uvedeného vztahu vyplývá, že intenzita E (V/m) je mírou síly, která vrstvu prachu přidržuje na usazovací elektrodě. Tato veličina nesmí být nulová (žádné přidržné síly), ale ani příliš vysoká. Potom totiž, není-li usazený prach včas odstraněn, dochází ke zhoršení účinnosti EO v důsledku jevu zvaného zpětná korona, tj. že intenzita E je tak veliká, že se vyskytují výboje v samotné této vrstvě prachu, tudíž dochází k opačnému toku iontů. Tím vznikne nadbytek opačně nabitých iontů a dochází k neutralizaci „užitečných“ iontů. Celý proces nabíjení a usazování prachových částic je pak v podstatě zmařen. Proto přivedená energie, a tím i intenzita E , musí být vždy taková, aby vyhovovala převládajícím provozním podmínkám. [1, 4]



Obr. 7: Tok proudu procházející odporem vrstvy způsobuje napětí napříč vrstvy

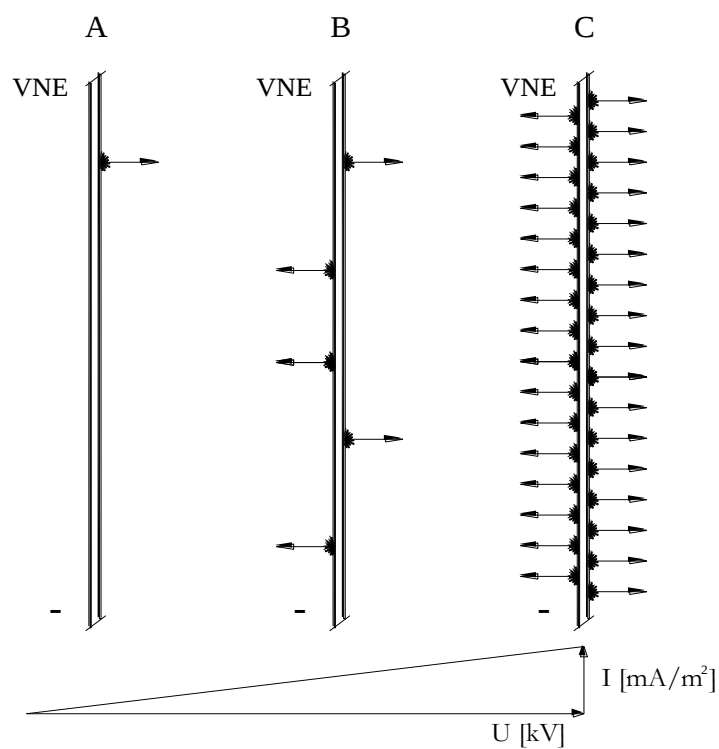
Konstrukce EO je vždy taková, aby geometrie a konstrukce vzájemné polohy vysokonapěťových a usazovacích prvků byla co nejideálnější, tudíž zaručovala co nejrovnoměrnější rozdělení elektrického proudu (obr. 8). Příčin nestejnoměrného rozdělení elektrického proudu je mnoho. Jednou z nich jsou např. nadměrné nánosy prachu na elektrodách. Proto je snaha konstruktérů EO, aby tyto systémy byly účinně čištěny. K odstranění usazeného prachu je potřeba dosáhnout vibrací se zrychlením cca 100 g ($g=9,81 \text{ m/s}^2$). Toto je možno zajistit pouze oklepáváním (úderů kladiv na nárazníky pevně spojené s elektrodami). Z mechanického i elektrického hlediska je vhodné EO rozdělit do více částí (elektricky samostatných sekcí) řazených zpravidla za sebou ve směru proudění čištěného plynu.

Jak vyplývá z uvedeného, vysoký odpor prachu vyžaduje nízký proud k udržení střední intenzity pole v usazené vrstvě prachu (obr. 9). Často musí být napájecí proud nízký, v hodnotách $0,1$ až $0,5 \times 10^{-4} \text{ A/m}^2$, ale pak je velice obtížné zajistit rovnoměrné rozdělení, což má za následek opět snížení účinnosti EO. Proto bylo vyvinuto řízení tyristorového zdroje pro možnost semipulzního výstupu. Místo aby byl EO napájen každou proudovou půlvlnou z frekvence sítě, je napájen jedenkrát za až 16 půlvln usměrněného sekundárního proudu. Střední proud je tedy přibližně pouze $1/16$ z původního proudu, avšak okamžitý proud je dostatečně vysoký k udržení intenzity. Tento jev využívá časové konstanty vrstvy prachu (obr. 10). Ta je díky kapacitě usazené vrstvy prachu vyšší než $T=1s$ a prach tedy nereaguje

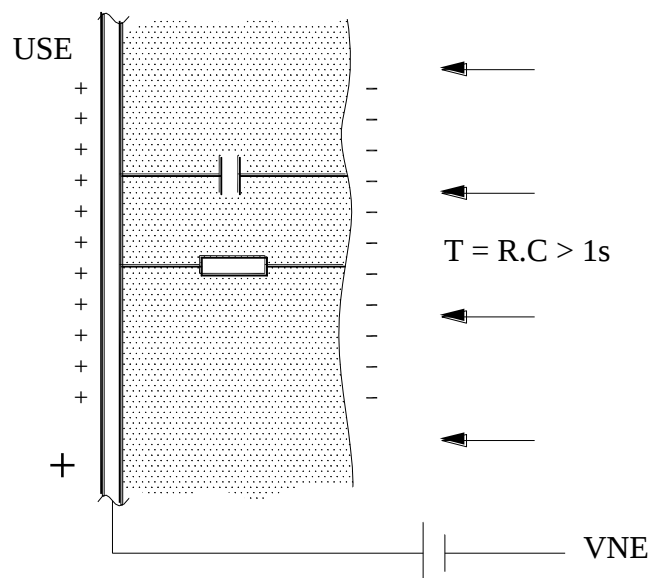


Obr. 8: Rozložení proudu

na změny proudu, které probíhají v čase kratším. Toto tedy umožňuje vynechat napájení až na 15 půlvln. Vysokonapěťová elektroda reaguje na okamžitý proud, ale prach až na proud střední. [4]



Obr. 9: Rozložení proudu jako funkce celkového proudu



Obr. 10: Časová konstanta vrstvy prachu

Stručný souhrn popisu funkce EO

Plyn znečištěný tuhými příměsími se vstupním tvarovým dílem dostává do aktivní části EO mezi soustavu usazovacích a vysokonapětových elektrod. Zde se na částice prachu vážou elektrické náboje vznikající v oblasti koronového výboje, částice prachu se elektricky nabíjí a působením elektrického pole se podle polaritý usazují buď na usazovacích elektrodách (částice se záporným nábojem - 80%) nebo na vysokonapětových elektrodách (částice s kladným nábojem - 20%). Na těchto elektrodách se však kladné náboje ihned neutralizují. Na usazovacích elektrodách odevzdávají částice své elektrické náboje, které se odvádějí do země a částice zůstávají na elektrodách působením přídržných sil intenzity elektrického pole lpět. Řádné a pravidelné odvádění těchto nábojů do země je podmínkou dobré funkce EO a může být nepříznivě ovlivněno nevhodnými fyzikálními vlastnostmi příměsí, vysokým měrným elektrickým odporem vrstvy příměsí, vysokou teplotou a podobně.

Vysokonapětové prvky usazováním příměsí zvětšují svůj povrch a tím zvyšují hodnotu svého počátečního napětí korony a procesu emise iontů. Tím se pak zároveň snižuje prostorový náboj, nabíjení a odlučování tuhých částic z nosného plynu. Proto se musí v pravidelných intervalech čistit oklepávacími mechanismy elektrody obojí polaritý. Příměsí uvolněné z elektrod padají do výsypek, odkud jsou přes vhodné vzduchotěsné uzávěry odváděny do navazujících dopravních zařízení pro odsun prachu. [1, 4]

Výklad některých pojmů

Elektrický odlučovač (EO)

EO sestává z vlastního tělesa (strojní části), zdrojů usměrněného proudu o velmi vysokém napětí a řízení (elektročásti) a ze zařízení na odsun zachycených a odloučených příměsí.

Suchý EO

je EO, kde dochází k regeneraci systémů VNE a USE suchou mechanickou cestou (oklepáváním).

Jednoduchý EO

sestává z jednotlivých odlučovacích sekcí umístěných za sebou ve společné skříni.

Zdvojený EO

sestává ze dvou jednoduchých EO umístěných vedle sebe tak, že v místě styku mezi oběma skříněmi je jedna společná mezistěna. Tato však neodděluje obě poloviny vzduchotěsně a je vybavena ložisky pro společnou podpěrnou konstrukci ve střední části obou polovin EO.

Odlučovací sekce

(dále jen sekce) je vnitřní část EO elektricky oddělená, a zpravidla samostatně napájena. Sekci tvoří usazovací systém a vysokonapětový systém. Délka jednotlivých sekcí jednoho EO (ve společné skříni), ve směru proudění plynu, nemusí být stejná.

Systém usazovacích elektrod (USE)

sestává ze soustavy zavěšení usazovacích elektrod a oklepávacích mechanismů. Systém USE musí být vždy vodivě propojen se skříní a veškerými vnějšími částmi EO a řádně uzemněn.

Systém vysokonapětových elektrod (VNE)

sestává ze soustavy zavěšení vysokonapětových elektrod a oklepávacích mechanismů. Systém VNE je připojen na vývod velmi vysokého napětí (vvn) ze silové části zdroje vvn a musí být řádně elektricky oddělen (odizolován) od systému USE, tedy i od skříně a veškerých vnějších částí EO.

Mechanické části elektrického odlučovače

Elektrické odlučovače se vyrábějí s ocelovou svařovanou skříní v jednoduchém nebo zdvojeném uspořádání (dva paralelně ve společné skříni), s jednou až pěti oddělenými sekcemi ve směru proudění spalin. Rozteč elektrod (šířka komor) bývá variabilní – 300 nebo 400 mm (a pro případné rekonstrukce také 350 a 500 mm). Rozteč může být volena u jednoho EO v každé sekci různá za účelem vyšší účinnosti. Šířka modulu (pasu) je rovněž variabilní, a sice 500 nebo 640 mm což je dáno profilem, v tomto případě válcované, usazovací elektrody.

Skříň

Bývá dvojího provedení.

1. pro aktivní výšky 3,5 až 5,5 m se používá vylehčené provedení.
2. pro aktivní výšky 6 až 16 m má skříň robustní provedení.

Obě varianty jsou osazeny inspekčními průlezy pro kontrolu a opravu zařízení.

Aby nedocházelo ke kondenzaci vodní páry a následné korozi stěn skříně, je tato tepelně zaizolována.

Výsypky u EO

Jsou variabilního provedení – žlabové podélné, žlabové příčné nebo jehlanové a všechny typy mohou být v jednoduchém nebo ve zdvojeném provedení. Volba výsypky vychází ze situace v projektu a je závislá zpravidla na navazujícím zařízení pro odvod odpařků. Některé technologie vyžadují např. dno ploché s podélným vyhrabovačem. Do výsypky jsou shodné inspekční průlezy s vestavěnou vnitřní izolací jako do ostatních částí EO. Vestavby ve výsypkách (svislé stěny) závisí od volby výsypky pro daný typ.

Nosná (podpěrná) ocelová konstrukce pro EO

Je dodávána ve dvojím provedení.

1. Tuhá ocelová konstrukce je svařena z válcovaných profilů jako samonosná. EO je na ní usazen jako oddělený samostatný celek pomocí kluzných ložisek. Tuhá ocelová konstrukce je hmotnější a používá se tam, kde je nutno na ní kotvit ještě další zařízení a prvky mimo vlastní EO.

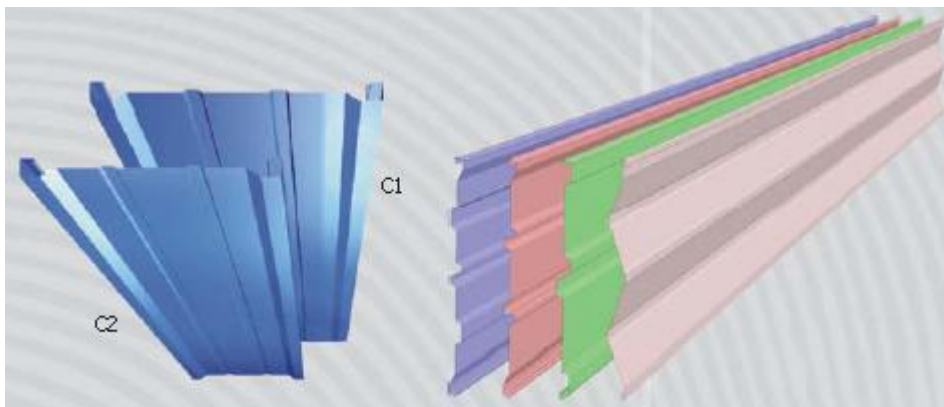
2. Výkyvná ocelová konstrukce je svařena z válcovaných profilů nebo trubek a je řešena pro eliminaci posuvných sil v součinnosti se skříní EO. Tato ocelová konstrukce využívá tuhosti již zmíněného spodního rámu skříně EO a od dilatací se „vykyvuje“ ve štíhlosti hlavních sloupů ocelové konstrukce. Proto nepotřebuje ložiska, je výrazně lehčí oproti tuhé ocelové konstrukci a tedy i levnější. Klade však vyšší nároky na základy, neboť zachycené účinky od posuvných sil se tím pádem přemísťují do jejich úrovně.

Vnitřní části u EO

Jsou rozděleny rovněž na dva již zmíněné systémy.

1. Systém usazovacích elektrod

sestává ze závěsných trámů, na nichž jsou zavěšeny pomocí čepů usazovací prvky – usazovací elektrody, a ze spodních oklepávacích trámů, do nichž jsou tyto usazovací elektrody pevně uchyceny pomocí speciálních trhacích pevnostních nýtů tak, že tato celá soustava tvoří jednu usazovací plachtu po celé délce sekce EO. Závěsné trámy jsou na koncích uloženy (dilatačně) na příčných distančních úhelnících přivařených ke střešním příčným nosníkům. Usazovací elektrody u EO jsou válcovány ze svitků plechu tloušťky 1,25 až 1,5 mm na speciální válcovací stoličce. Jejich ohyby zabraňují strhávání již usazeného prachu zpět do proudícího plynu. Oba typy se od sebe vzájemně liší m.j. šířkou modulu (pasu) tj. 640 a 500 mm. Spodní oklepávací trámy jsou vnitřně suvně vedeny v distančních hřebenech, které zaručují potřebnou rozteč jednotlivých usazovacích plachet, a tím i jednotnou šířku odlučovacích komor sekce.



Obr. 10: Typy usazovacích elektrod

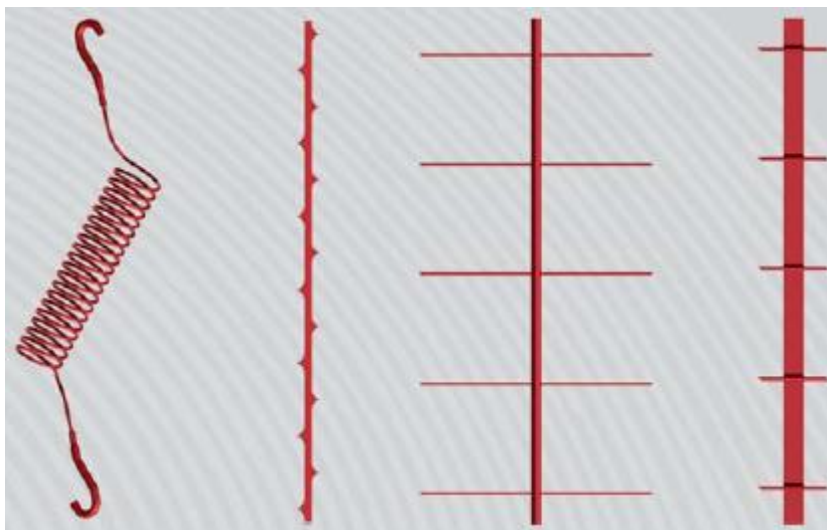


Obr. 11: Systém oklepávání usazovacích elektrod

Čištění usazovacích elektrod se provádí jejich oklepáváním, t.j. úderem přepadových kladiv na konce oklepávacích trámů opatřených nárazníky. Každá sekce EO je vybavena jedním oklepávacím mechanismem (poháněcí jednotka a hřídel s přepadovými kladivy uložená na valivých ložiskách). Poháněcí jednotka, kterou tvoří převodová skříň s elektromotorem, je lehkého šnekového provedení a je umístěna na přírubě z boku skříně. Prostup je proveden speciální utěsněnou spojkou umožňující částečné osové vychýlení nebo nesouosost hřídelí (oklepávací a výstupní hřídele z převodovky). Každou sekci lze oklepávat trvale nebo přerušovaně. Intervaly chodu a klidu jsou nastavitelné a jsou součástí naprogramování řídicího systému. Kladiva jsou pro snadnou výměnu nebo náhradu uchyceny na hřídeli pomocí třmenů. Jako pohony oklepů usazovacích elektrod jsou použity lehké elektropřevodovky. Tyto jsou shodné i pro pohon oklepů vysokonapěťových elektrod.

2. Systém vysokonapěťových elektrod

sestává z tuhých rámců, ve kterých jsou vypnuty vysokonapěťové prvky – vysokonapěťové (sršící) elektrody. Tyto rámy jsou přes ramínka zavěšeny na distančních příčných rámech. Ty jsou pomocí trubkových závěsů uloženy a zavěšeny přes nosné izolátory v příčných střešních nosnících skříně EO. Samotné vysokonapěťové prvky jsou používány dvou základních typů – hrotové a hladké. Hladké elektrody jsou používány spirálové, hrotové pak s výraznými nabíjecími schopnostmi pro elektricky vysoce rezistivní prachy.



Obr. 12: Typy vysokonapětových elektrod



Obr. 13: Systém oklepávání vysokonapětových elektrod

Čištění vysokonapětových elektrod se provádí taktéž mechanickým oklepáváním. Každá sekce je vybavena zpravidla jedním až čtyřmi oklepávacími mechanismy v závislosti na šířce a délce sekce. Každý mechanismus je tvořen táhlovým izolátorem, válečkovým řetězem, táhlem oklepů a hřídelí oklepů s kladivy. Rámy vysokonapětových elektrod jsou k tomuto účelu opatřeny nárazníky. Hřídele jsou uloženy v kluzných ložiskách uchycených na příčných rámech. Kladiva nejsou na rozdíl od oklepů usazovacích elektrod přepadová, ale pouze výkyvná. Na hřídelích jsou přichycena rovněž pomocí třmenů. Poháněcí jednotku tvoří u oklepů vysokonapětových elektrod elektropřevodovka (shodná jako u oklepů usazovacích elektrod) a přepadová klika uložena v kluzných ložiskách, která je spojena s hřídelí zmíněné elektropřevodovky přes spojku umožňující vychýlení. Vše je uchyceno na jednotném rámu nad osou nosného izolátoru. Táhllo pohonů oklepů pak prostupuje dovnitř EO vnitřkem izolátoru a závěsné trubky až ke hřídeli oklepu. [4]

Ke zkrácení nepříznivých vlivů „předprovozních“ stavů (přechodu na provozní teplotu) jsou nosné izolátory opatřeny účinným vyhříváním, které se po dosažení požadované teploty automaticky vypíná.

Vstupní a výstupní tvarové díly

Elektrické odlučovače jsou dodávány včetně vstupních a výstupních tvarových dílů. Tvarové díly slouží především k rovnoměrnému přechodu průtočného množství čištěných spalin do rozměrově odlišného průřezu, při němž dochází k výrazné změně rychlosti proudění, a v mnoha případech i změně směru. Tvarové díly jsou navrženy tak, aby uvedené změny proudění proběhly na co nejkratší trase, tzn. aby délka těchto dílů výrazně neprodlužovala celkovou stavební délku odlučovače.

1. Vstupní tvarové díly

slouží ke zpomalení rychlosti proudění z potrubí (cca 12 m/s) na rychlost potřebnou v elektrickém odlučovači (cca 1 m/s), a dále ke zrovnomení rychlostního profilu (vyrovnání rychlosti po celém průřezu EO) před vstupem do aktivního systému na velice krátké trase. K tomuto účelu byly vstupní díly přesně namodelovány a vybaveny vnitřními vestavbami – rozdělovacími stěnami. Díky zpomalenému proudění ve vstupních dílech, změně směru a odporu rozdělovacích stěn není zanedbatelný ani tzv. mechanický „předzáchyt“ prachu, což se ve velké míře uplatňuje hlavně u technologií, kde do odlučovače vstupuje vysoká vstupní koncentrace tuhých znečišťujících látek (např. cementárny, fluidní kotle, aj.). Všechny vstupní díly mohou být vybaveny oklepáváním rozdělovacích stěn, což závisí od výšky elektrického odlučovače a technologie na níž je vyprojektován. Oklepávání rozdělovacích stěn je na obdobném principu jako oklepávání usazovacích elektrod (přepadová kladiva). Rozdělovací stěny jsou tvořeny speciálními děrovanými a klapkovými plechy, a navrženy pro každý typ vstupního dílu zvlášť. Pokud je vstupní díl vybaven oklepáváním rozdělovacích stěn, je také zpravidla vybaven inspekčním průlezem v úrovni hřídele oklepů.

2. Výstupní tvarové díly

slouží k opětovnému zrychlení proudění vyčištěného plynu do výstupního potrubí, a dále do ventilátoru a odvod do komína nebo další technologie. Toto zrychlení se musí opět odehrát na co možná nejkratší trase tak, aby usměrněné proudění na konci aktivní části odlučovače nebylo ještě touto změnou narušeno (strháváno). [1, 4]

Užití EO

Elektrické odlučovače se používají v podtlakových částech vzduchotechnických zařízení pro odlučování tuhých příměsí obsažených ve vzdušině (v nosném plynu) do max. teploty +350°C a při použití speciálních materiálů do +450°C. EO nejsou vhodné pro odlučování výbušných vzdušin a příměsí. Konstrukčně jsou řešeny do max. podtlaku 16 kPa a do max. přetlaku 4 kPa.

EO lze běžně použít v těchto technických a průmyslových odvětvích:

- odlučování popílku ze spalin různých druhů kotlů
- odlučování popílku ze spalin neodsířených i odsířených při spalování tuhých paliv
- odlučování popílku ze spalin spaloven městských i průmyslových odpadků

- odlučování odprašků ze spalin rotačních pecí na pálení slinku a z šachtových pecí
- čištění vzdušin z mlýnic a sušáren vápence a strusky
- čištění vzdušin z cementových mlýnů
- odlučování prachu ze spalin z šachtových a rotačních pecí na pálení vápna
- čištění vzdušin odsávaných z dopravních cest v cementárnách
- čištění spalin z aglomeračních a peletizačních zařízení železné rudy
- odprašení vzdušin odsávaných z drtičů, třídičů a přesypů aglomerátu
- čištění vzdušin z rudných zavážecích mostů vysokých pecí
- odprašení vzdušin z licích hal vysokých pecí
- čištění spalin ze SM pecí, elektrických obloukových pecí, kyslíkových konvertorů a z kuploven
- čištění spalin z pecí na spékání bauxitu, z pecí na žhání kysličníku hlinitého a ze sklářských pecí
- odprašení vzdušin z výklopníků (př. fosfátu)
- čištění spalin při výrobě pigmentů
- čištění spalin z melasových výpalků v lihovarech
- odlučování síranu bornatého ze spalin
- čištění spalin za rotačními pecemi na výpal lupků
- čištění spalin z rotačních pecí na pálení magnezitu
- odprašení vzdušin z magnezitových závodů. [4]

Systém řízení

Provozní změny výkonu zdroje, znečištěného plynu a podmínek provozu celé technologie vyžadují provádět úpravy programového řízení - optimalizaci elektrického odlučování v EO na základě obdržených hodnot a signálů. Schéma oklepávání elektrod může být změněno při změně výkonu. Napájení vvn musí být regulovatelné na vysoký nebo nízký proud, na pulzní napájení nebo průběžné. Poruchové stavy musí být evidovány a ohlášeny.

Systém řízení elektrických odlučovačů je rozdělen do dvou základních skupin:

1. Řízení napájení EO

zde se jedná o regulátor zdroje vvn, který je vybaven moderními prvky elektroniky a je adaptabilní, tzn. že se dá nastavit pro nejrůznější typy provozů, ve kterých je EO nasazen.

2. Řízení přidružených úkonů

tato část obsluhuje pohony oklepů, vyhřívání výsypek a izolátorů, chod zařízení pro dopravu odprašků, chod ventilátoru a další potřebné úkony, které jsou nezbytné pro spolehlivý chod EO. Vše je propojeno s monitorovacím systémem přes nadřazenou komunikační jednotku, nebo přes PC se speciálním softwarem. Celý software je udělán na celkovou optimalizaci odlučovacího procesu, kdy se za pomoci různých čidel mapují i ostatní technologické veličiny. Po jejich vyhodnocení se nastaví na regulátorech takové žádané veličiny, které zaručují optimální provoz, tzn. že bude vždy splněna požadovaná maximální úletová koncentrace TZL při co možno nejekonomičtějším provozu.

Popis systému řízení napájení EO

V současnosti jsou pro řízení napájení EO dostupné řídicí jednotky ať již od tuzemských nebo zahraničních dodavatelů, a lze jimi podle přání zákazníka osadit různé typy EO i nahradit stávající řízení. U nás se využívají pro tento účel např. systémy od firem ČKD, BaS Elektra, KRAFT, ALSTOM, aj.

Účelem řídicí jednotky je řízení dodávky velmi vysokého napětí do elektrického odlučovače. Vkládání dat a nastavení parametrů se provádí zpravidla pomocí menu komunikačního rozhraní systému, kde se současně zobrazují i nezbytné pokyny a hlášení.

Funkce – základní režim buzení

Řídicí jednotka udržuje vysoké napětí elektrického odlučovače v blízkosti limitu napětí pro přeskok platného pro momentální spaliny. Po spuštění usměrňovače se zvyšuje proud v odlučovači podle spouštěcí rampy nastaveného programu. Toto platí, dokud nedojde k přeskoku nebo dokud není dosaženo limity proudu nebo napětí. Pokud v odlučovači nedochází k přeskokům, výstupní proud bude narůstat až do úrovně nastavené maximální hranice napětí nebo proudu. Aby bylo možno dosáhnout skutečně nejlepšího výkonu u různých typů odlučovačů, je možnost volby mezi řízením napětí nebo proudu. Řízením napětí se dosahuje snížení napětí, a řízením proudu se dosahuje snížení proudu po přeskoku v krocích, podle nastavených hodnot. Rozsah kroku napětí je $0 \div 25\%$ nominálního špičkového napětí a rozsah kroku proudu je $0 \div 25\%$ nominálního proudu. Algoritmus řízení spouštěcí rampy udržuje frekvenci přeskoků v blízkosti nastavené hodnoty v rámci provozních podmínek odlučovače, například při oklepávání nebo náhlé změně množství nebo chemického složení spalin. Počet přeskoků (rychlost jiskření) může být nastaven zpravidla v rozsahu $1 \div 100$ za minutu.

Některé stavy odlučovače vyžadují deionizaci, aby nedocházelo k nepřetržitému dosahování limity pro přeskok. Chceme-li dosáhnout deionizace, plně odpojíme proud po dostatečně dlouhou, ale ne delší než nezbytně nutnou, dobu. Tato doba deionizace se definuje jako počet cyklů napájecího kmitočtu, a má nastavený rozsah cca $0 \div 32$ cyklů.

K uspokojení různých požadavků optimalizace jsou k dispozici dva režimy. Režim „jiskření 1“ zahrnuje dobu deionizace po každém jiskření podle nastavené hodnoty. Režim „jiskření 2“ zahrnuje dobu deionizace až když dojde k jiskření ve dvou následných poločasech, kterým se říká „dvojitě jiskření“. Doba deionizace se řídí podle nastavených hodnot. Po zablokovaném časovém úseku se proud dostane velmi rychle zpět na úroveň řízenou sestupným napětím/proudem, jak je definováno v nastavení. Napětí vzroste na normální strmost až do nového „jiskření“.

Přerušovaný režim buzení – semipulsní

Po jedné nabuzené polovině cyklu následuje nastavený počet blokováných cyklů. Ovládací prvky frekvence napětí a přeskoků fungují jako v základním režimu buzení.

Řízení opacity

Jedná se o řídicí režim, který optimalizuje spotřebu proudu odlučovače ve vztahu ke koncentraci tuhých znečišťujících látek (TZL) na výstupu z odlučovače. Může být označen také jako energetický řídicí systém, který se používá především u malých odlučovačů nebo v omezeném počtu zón velkých odlučovačů.

Výstupní signál z prachoměru (proudová smyčka 4-20 mA), je napojen do řídicí jednotky zdroje (zdrojů) vvn. Ta v závislosti na úletu TZL nastaví výkon dodávaný do EO potřebný na dodržení požadované koncentrace TZL. Požadovaná koncentrace TZL bývá většinou nastavena těsně pod hranicí zákonem stanoveného emisního limitu. To umožňuje provozovat zařízení při optimální spotřebě el. energie a zároveň nepřekračovat emisní limity. Hysterese ($\pm 5\%$) nastavené limity emisí zabraňuje překmitům při malých změnách vypouštěných emisí.

Pokud dojde k poruše signalizace emisí, tj. dostane-li se signál pod 4 mA, řídicí jednotka automaticky přepne na základní režim buzení.

Řízení zpětné korony

Výskyt zpětné korony je zjišťován skenovacími cykly v intervalech, které lze nastavit v rozsahu 1-600 minut (dle typu regulátoru zdroje vvn). Při zjištění zpětné korony dojde ke stažení výkonu dodávaného EO a jeho následnému zvyšování dle nastaveného požadavku.

Teorie výpočtu a návrhu kapacity EO

Základní parametr pro dimenzi kapacity (usazovací plochy) EO je tzv. odlučovací (migrační) rychlost w [m/s], vycházející ze základního vztahu pro návrh kapacity EO (experimentálního vztahu tzv. Deutschovy formule) pro odlučivost (účinnost) EO:

$$o = 1 - e^{-fus \cdot w} = 1 - Qm_2/Qm_1 = 1 - k_2/k_1 \quad [-] \quad (2)$$

kde:

o [-].....odlučivost (účinnost) EO
 fus [s/m].....měrná (specifická) usazovací plocha EO
 w [m/s].....odlučovací rychlost EO
 Qm_2 [g/m³_{ef}].....výstupní hmotnostní tok TZL
 Qm_1 [g/m³_{ef}].....vstupní hmotnostní tok TZL
 k_2 [g/m³_{ef}].....výstupní koncentrace TZL
 k_1 [g/m³_{ef}].....vstupní koncentrace TZL
 e [-].....základ přirozeného logaritmu (ln)

Z uvedených vztahů dále vyplývá:

měrná (specifická) usazovací plocha

$$-fus = \ln(1-o)/w \quad [s/m] \quad (3)$$

což je poměr potřebné usazovací plochy EO a průtočného objemového množství čištěných spalin a zároveň platí:

měrná (specifická) usazovací plocha

$$fus = Fus / Qv \quad [m^2 / (m^3/s)] \quad (4)$$

kde již zmíněná odlučovací rychlost w [m/s] je určena experimentálně a je funkcí mnoha chemických, fyzikálních, elektrických a geometrických parametrů:

$w_{0,35} = f$ (vlhkost, chemické složení spalin a prachu, granulometrie, nedopal, měrný odpor prachu, teplota, rychlost proudění, rozteč komor EO, počet sekcí, typ napájení,... atd.).

Pozn.:

Index 0,35 znamená platnost pro rozteč komor 0,35 m. Vztah mezi $w_{0,35}$ a například $w_{0,40}$ (tj. pro rozteč komor EO 0,35 m a 0,40 m) je:

$$w_{0,40} \approx 1,23 \cdot w_{0,35} \quad (5)$$

EO s větší roztečí komor dosahuje tedy vyšší odlučovací rychlosti, tj. že může mít pro stejný efekt menší usazovací plochu, ale klade vyšší nároky na napájecí zdroje VVN. Z toho vyplývá, že pokud to dovolí zdroje VVN, je výhodnější použít větších roztečí komor EO.

Pro konečnou dimenzi kapacity celkové usazovací plochy EO pak platí z výše uvedeného vztah:

celková usazovací plocha EO

$$Fus = fus \cdot Qv \quad [m^2] \quad (6)$$

kde Qv [m³_{ef}/s] je průtočné množství plynu efektivní (při provozní teplotě a tlaku).

Střední průtočná rychlost spalin uvnitř EO v [m/s]:

Závisí hlavně na stupni požadovaného vyčištění spalin, granulometrii a měrné hmotnosti částic TZL. Zpravidla bývá volena tak, aby nepřesahovala hodnotu $v = 1$ m/s. Obzvláště pro TZL ze spalování dřevního odpadu, kdy je prach jemnější a lehčí, a v případě vyšší průtočné rychlosti v [m/s] jsou částice TZL snáze strhávány zpět do proudu spalin při oklepu usazovacích elektrod. EO pak není schopen tento prach odloučit a dochází tak k navýšení úletové koncentrace TZL, tj. k_2 ven z EO.

Pozn.:

Odlučovací rychlost w [m/s] mívá u většiny EO zhruba 10-krát nižší hodnotu, než střední průtočná rychlost spalin

$$v \approx 10 \cdot w \quad (7)$$

Elektrické napájení a řízení sekcí EO

Jak již bylo popsáno a vysvětleno v předchozích kapitolách, jednotlivé články (elektrické sekce EO) je nutno napájet zdroji velmi vysokého usměrněného napětí (VVN), a protože jde o pohyb a práci záporně nabitých iontů (elektronů), je nutno přivádět na vysokonapěťové elektrody záporný usměrněný potenciál napětí proti uzemněným usazovacím elektrodám.

Samotná regulace výkonu dodávaného do EO se provádí většinou omezováním sekundárního napětí a proudu regulátorem, na základě požadovaného úletu a vyhodnocování provozních stavů EO.

Ve výpočtu se omezím na základní principy a návrh velikosti zdroje VVN pro sekci EO. Nejvhodnější zdroje VVN se pak na základě těchto parametrů objednávají včetně řídicích regulátorů přímo z katalogových řad výrobců.

Základní a limitující pro návrh a objednávku zdroje VVN jsou:

1. Rozteč jednotlivých komor, sekcí EO (čím větší, tím vyšší nároky na max. sekundární napětí U_2 [kV])
2. Usazovací plocha napájené sekce EO (čím větší, tím vyšší nároky na max. hodnoty proudu na sekundární straně I_2 [mA]).

V praxi návrh probíhá tak, že po návrhu EO se jeho celková usazovací plocha rozdělí do zpravidla stejných sekcí tak, aby každá sekce byla obsažitelná jedním zdrojem, který je výrobce schopen dodat. Z vypočítané celkové usazovací plochy EO např. 10000 m² a při měrném sekundárním elektrickém proudu $i_2 = 0,4$ mA/m² (dáno zpravidla odlučovanou technologií) bychom potřebovali zdroj VVN, který by dodával na sekundární straně $0,4 \times 10000 = 4000$ mA. Většina výrobců však dodává zdroje o maximu sekundárního proudu 2000 mA, z čehož vyplývá, že celkovou usazovací plochu EO je nutno rozdělit do dvou stejně velikých samostatně napájených elektrických sekcí.



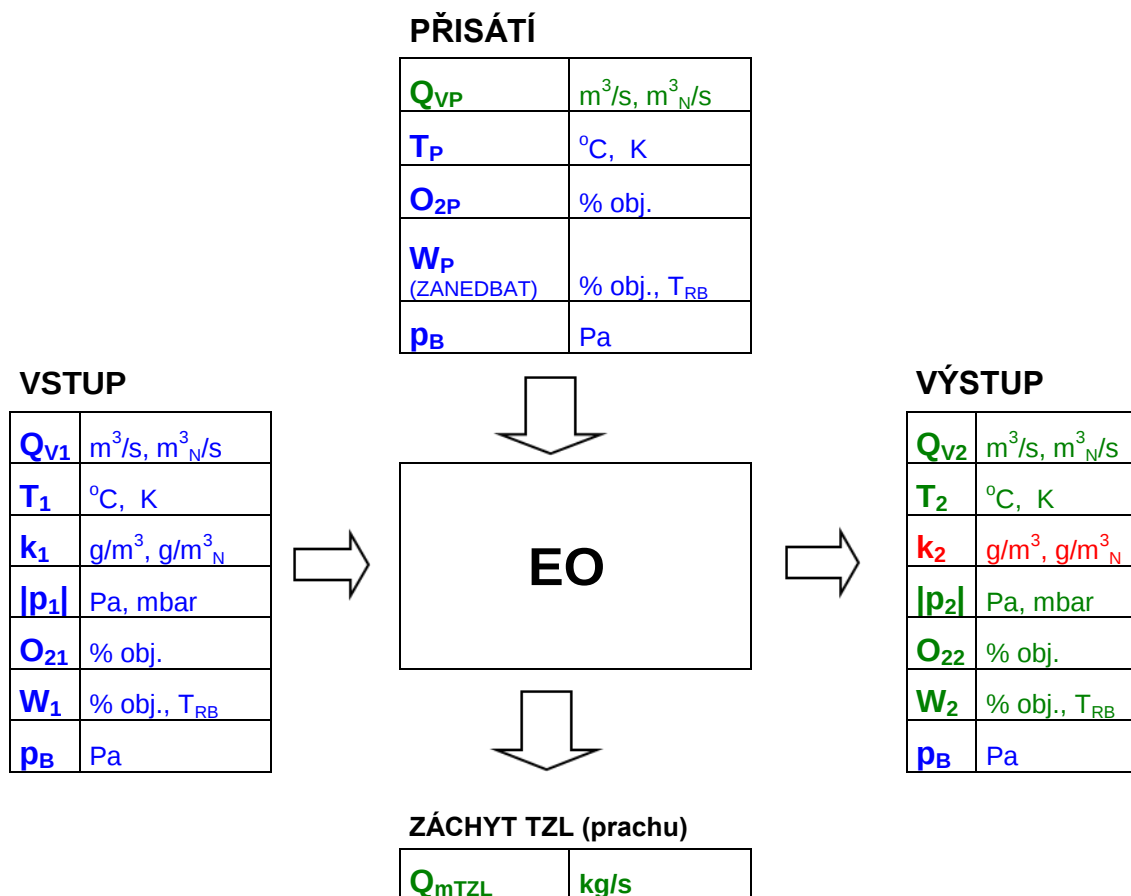
Obr.14: Umístění a napojení zdrojů VVN na dvou sekcovém EO (2 zdroje VVN na střeše EO)

Schéma parametrů pro návrh a výpočet kapacity EO

PARAMETRY ZADANÉ

PARAMETRY POŽADOVANÉ

PARAMETRY VYPOČTENÉ



Q_V objemový průtok spalin (znečištěného plynu)

T teplota spalin

k koncentrace TZL (prachu)

p tlak spalin proti p_B

O_2 objemový podíl kyslíku ve spalinách

W objemový podíl H_2O ve spalinách

p_B tlak okolního prostředí (barometrický)

Návrh a výpočet kapacity EO pro konkrétní zadanou akci

Při psaní této práce jsem spolupracoval s největším tuzemským dodavatelem elektrických odlučovačů TZL, firmou ZVVZ-Enven Engineering, a.s. Milevsko. Bylo mi v rámci této práce umožněno prostudovat některé materiály návrhu a nabídky EO této firmy pro konkrétní zadání výstupu z kotelní jednotky na spalování biomasy. K tomu mi bylo umožněno využít i vnitropodnikový software návrhu kapacity EO, podchycující plně teorie uvedené výše v kapitolách a z nichž do této práce uvedu z kapacitních důvodů a pro přehlednost pouze hlavní výstupní formuláře.

Zadávací parametry pro návrh EO

	Jednotka	Rozměr
Popis technologie:		
Provoz:	výtopna	
Zařízení:	Energetický parní kotel na spal. biomasy	
Výkon kotle:	t/h	28,5
Tepelný výkon kotle:	MW	-
Palivo:		
Druh paliva:	Biomasa (90% dřevní štěpka + 10% odpady)	
Spalované množství:	t/h	neudáno
Jakostní parametry:		
Výhřevnost:	MJ/kg	10
Obsah vody v surovém palivu:	%	40
Obsah popele v surovém palivu:	%	1
Obsah síry v surovém palivu:	%	0-0,04
Stabilizační palivo - předpoklad	-	zemní plyn
Čištěné kouřové plyny (spaliny):		
Množství plynu – maximální	m ³ _N /s	15,7
Teplota plynu – minimální	°C	140
Teplota plynu – provozní	°C	160
Teplota plynu – maximální	°C	200
Tlak plynu před EO – maximální	kPa	-2
Vstupní koncentrace TZL do EO k₁ max.	g/m ³ _N	3
Výstupní úletová koncentrace TZL za EO k₂	mg/m ³ _N	-
Výstupní úletová koncentrace TZL za EO k₂	mg/m ³ _R	15
Objemové složení vlhkého plynu - N ₂	% obj.	59,12
- CO ₂	% obj.	10,04
- SO ₂ +SO ₃	% obj.	0,01
- H ₂ O	% obj.	25,62
- O ₂	% obj.	5,21
Granulometrické složení prachu (TZL)	neudáno	
Chemické složení prachu (TZL)	neudáno	
Elektrická síť:		
Napěťová soustava	TNC-S, 3/N/PE AC 400/230 V, 50 Hz	

Zadané požadavky

Nabídnout dodávku elektrického odlučovače pro koncentraci TZL za odlučovačem
 $k_2 \leq 15 \text{ mg/m}^3_R$ ($= 0,015 \text{ g/m}^3_R$)
(0°C , 101325 Pa , $0\% \text{ H}_2\text{O}$, $6\% \text{ O}_2$)

Podmínky okolí

	Jednotka	Rozměr
Nadmořská výška	m.n.m.	283
Barometrický tlak	Pa	neudáno
Min. venkovní teplota	$^\circ\text{C}$	-15
Průměrná venkovní teplota v topné sezóně	$^\circ\text{C}$	-
Max. venkovní teplota v létě	$^\circ\text{C}$	+32

Konstrukční požadavky na elektrický odlučovač

Podmínky pro návrh odlučovače:

EO bude navržen podle platných českých norem, kompatibilních s normami EU.
Všeobecné konstrukční podmínky jsou:

1)	Tlak plynu	[kPa]	± 3
2)	Maximální teplota plynu	$^\circ\text{C}$	300
3)	Maximální zatížení osobami na obslužné plošiny, ochozy a schodnice	$[\text{kN.m}^{-2}]$	2,1
4)	Seismické zatížení	$[\text{°Merc.}]$	neuvažuje se
5)	Zatížení prachem - setřesná hmotnost	$[\text{kg.m}^{-3}]$	ca.800
	- měrná hmotnost	$[\text{kg.m}^{-3}]$	ca.1000
6)	Teplota okolí – léto	$^\circ\text{C}$	+ 32
7)	- zima	$^\circ\text{C}$	- 12
8)	Umístění	[-]	venku

Vlastní výpočet a návrh EO – rozbor, postup a algoritmus, mechanický návrh

Význam indexů:

e_f vztaženo na okamžité provozní (efektivní) podmínky

N vztaženo na normální podmínky [0°C , $101,325 \text{ kPa}$]

R vztaženo na referenční podmínky [0°C , $101,325 \text{ kPa}$, $0\% \text{ H}_2\text{O}$, $6\% \text{ O}_2$]

T [$^\circ\text{C}$]provozní teplota

$|p|$ [Pa]provozní podtlak

p_B [Pa]barometrický tlak

W [%]obsah H_2O ve spalínách

O_2^m [%]obsah O_2 ve spalínách

Rozbory a úpravy zadávacích parametrů

Průtočné množství odprašovaných (čištěných) spalin $Q_v = 15,7 \text{ m}^3_{\text{N}}/\text{s}$ a vstupní koncentrace TZL do EO $k_1 = 3 \text{ g}/\text{m}^3_{\text{N}}$ jsou zadány pro normální vlhké stavové podmínky nosného plynu (0°C , 101325 Pa). Pro další návrhy dimenzí, je nutno tyto přepočítat na reálné efektivní stavové podmínky, tj. pro skutečnou teplotu a tlak.

Přepočtový koeficient stavu plynu

$$N = (273,15 + T)/273,15 \cdot 101325/(p_B - |p|) \quad (8)$$

kde ze zadání $T = 200^\circ\text{C}$ (maximální provozní), $|p| = 2000 \text{ Pa}$, $p_B = ? [\text{Pa}]$ není zadáno, ale určíme ze zadané nadmořské výšky $h = 283 \text{ m}$ dle empirického vztahu

$$p_B = 101325 \cdot e^{-(h/7991)} = 101325 \cdot e^{-(283/7991)} \approx 97800 \text{ Pa}$$

Po dosazení je

$$N = (273,15 + 200)/273,15 \cdot 101325/(97800 - 2000) = 1,832$$

Dále pak pro přepočet zadaných hodnot platí

$$Q_v [\text{m}^3_{\text{ef}}/\text{s}] = Q_v [\text{m}^3_{\text{N}}/\text{s}] \cdot N = 15,7 \cdot 1,832 = 28,76 \text{ m}^3_{\text{ef}}/\text{s}$$

$$k_1 [\text{g}/\text{m}^3_{\text{ef}}] = k_1 [\text{g}/\text{m}^3_{\text{N}}] / N = 3 / 1,832 = 1,64 \text{ g}/\text{m}^3_{\text{ef}}$$

Požadovanou výstupní koncentraci TZL $k_2 \leq 15 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{R}}$ ($= 0,015 \text{ g}/\text{m}^3_{\text{R}}$), zadanou pro referenční podmínky nosného plynu (0°C , 101325 Pa , $0\% \text{ H}_2\text{O}$, $6\% \text{ O}_2$) přepočítáme na okamžité provozní podmínky.

Přepočtový koeficient stavu plynu

$$R = (273,15+T)/273,15 \cdot 101325/(p_B - |p|) \cdot 100/(100-W) \cdot (21-X)/(21-\text{O}_2^{\text{m}}) \quad (9)$$

což zapíšeme zkráceně, za využití výše odvozeného vztahu pro koeficient N

$$R = N \cdot 100/(100-W) \cdot (21-X)/(21-\text{O}_2^{\text{m}}), \text{ kde ze zadání a provedených výpočtů}$$

$N = 1,832 [-]$ viz výše vypočteno, $W = 25,62\% \text{ obj. H}_2\text{O}$ je objemový podíl vodní páry ve vlhkých spalinách, $X = 6\% \text{ obj. O}_2$ je referenční objemový podíl kyslíku v přepočtu na suché spaliny. $\text{O}_2^{\text{m}} (\% \text{ obj.})$ pro suché spaliny není zadáno, ale určíme ze zadaného $\text{O}_2 = 5,21\% \text{ obj.}$ ve vlhkých spalinách.

$$\text{O}_2^{\text{m}} = \text{O}_2 \cdot 100 / (100-W) = 5,21 \cdot 100 / (100 - 25,62) \approx 7\% \text{ obj. suchých.}$$

Po dosazení je

$$R = (1,832 \cdot 100/(100-25,62) \cdot (21-6)/(21-7)) = 2,639$$

Dále pak pro přepočet zadaných hodnot platí

$$k_2 [\text{g}/\text{m}^3_{\text{ef}}] = k_2 [\text{g}/\text{m}^3_{\text{R}}] / R = 0,015 / 2,639 = 0,0057 \text{ g}/\text{m}^3_{\text{ef}} = 5,7 \text{ mg}/\text{m}^3_{\text{ef}}$$

Pozn.:

Z uvedeného vyplývá, že aby za EO bylo dosaženo požadované referenční výstupní koncentrace TZL $k_2 \leq 15 \text{ mg/m}^3_R$, musí být ve skutečnosti navržen na reálnou (měřitelnou) hodnotu výstupní koncentrace $k_2 \leq 5,7 \text{ mg/m}^3_{ef}$.

Určení potřebné účinnosti (odlučivosti) EO

Platí vztah (2) pro odlučivost EO

$$o \approx 1 - k_2/k_1 \dots [-]$$

Po dosazení výše vypočtených $k_1 = 1,64 \text{ g/m}^3_{ef}$ a $k_2 = 0,0057 \text{ g/m}^3_{ef}$ dostaneme potřebnou odlučivost EO

$$o \approx 1 - k_2/k_1 = 1 - 0,0057 / 1,64 = 0,9965 = 99,65 \%$$

Určení potřebné odlučovací rychlosti w [m/s]

Z předchozích výpočtů a podkladů ZVVZ-Enven Engineering pro elektrické odlučování zvolíme jako nejvhodnější EO typ EKG, který má rozteč jednotlivých komor tvořených usazovacími plachtami $2R = 350 \text{ mm}$ (tj. kolmá vzdálenost každé VN elektrody od US plachty $R=175 \text{ mm}$). Pro tento EO a danou technologii odlučování volíme návrhovou odlučovací rychlost v prvním přiblížení

$$w_{0,35} = 0,09 \text{ m/s}$$

Určení potřebné usazovací plochy (kapacity) celého EO

Dle vztahu (4), pro potřebnou aktivní usazovací plochu (tj. celkovou promítnutou plochu usazovacích elektrod) EO, je odvozen vztah

$$F_{us} = f_{us} \cdot Q_v \dots [\text{m}^2], \text{ kde}$$

$Q_v = 28,76 \text{ m}^3_{ef}/\text{s}$ bylo přepočteno výše ze zadaného průtočného objemového množství čištěných spalin. Pro specifickou usazovací plochu $f_{us} [\text{s/m}]$ platí vztah (3)

$$-f_{us} = \ln(1-o)/w \dots [\text{s/m}],$$

kde po dosazení získáme

$$-f_{us} = \ln(1 - 0,9965) / 0,09 = - 62,83 \text{ s/m}$$

$$f_{us} = 62,83 \text{ s/m}$$

Potřebná aktivní usazovací plocha EO je po dosazení

$$F_{us} = 62,83 \cdot 28,76 = 1807 \text{ m}^2 \text{ (potřebná bez rezervy)}$$

Určení aktivního průtočného průřezu EO a průtočné rychlosti čištěných spalin

Maximální průtočná rychlost čištěných spalin se vypočte dle vztahu (7)

$$v \approx 10 \cdot w = 10 \cdot 0,09 = 0,9 \text{ m/s}$$

při průtočném množství spalin $Q_v = 28,76 \text{ m}^3_{ef}/\text{s}$, musí aktivní průtočný průřez EO být minimálně

$$S_{min} = Q_v / v = 28,76 / 0,9 \approx 32 \text{ m}^2$$

Vzhledem k vlastnostem TZL (prachu) z dané technologie je však nutno průtočnou rychlost v snížit pod hodnotu $v \leq 0,7 \text{ m/s}$, protože tento prach je velice jemný a při vyšší rychlosti hrozí zpětné strhávání již usazeného prachu do proudu spalín a ven z EO. Potom minimální průtočný průřez EO bude

$$S_{\min} = Q_v / v = 28,76 / 0,7 \approx 41 \text{ m}^2$$

Zvolíme-li aktivní výšku EO rovnu $H = 7,5 \text{ m}$ (modul z řady ZVVZ-Enven Engineering), vyjde nám potřebná aktivní šířka EO rovna výpočtem z plochy obdélníka

$$B = S_{\min} / H = 41 / 7,5 = 5,47 \text{ m}$$

Zvolená řada EO EKG používá rozteč komor $350 \text{ mm} = 0,35 \text{ m}$, jak již bylo uvedeno výše. Proto minimální počet komor EO bude vypočten ze šířky B vztahem

$$PK_{\min} = B / 0,35 = 5,47 / 0,35 \approx 16$$

Jednu usazovací komoru EO přidáme jako rezervu, takže volíme $PK_{\text{skut}} = 17$. Zpětnými přepočty pak určíme skutečnou aktivní šířku EO, tj.

$$B_{\text{skut}} = PK_{\text{skut}} \cdot 2R = 17 \cdot 2 \cdot 0,175 = 5,95 \text{ m}$$

skutečný aktivní průřez EO, tj.

$$S_{\text{skut}} = B_{\text{skut}} \cdot H = 5,95 \cdot 7,5 \approx 44,62 \text{ m}^2$$

a skutečnou průtočnou rychlost čištěných spalín, tj.

$$v_{\text{skut}} = Q_v / S_{\text{skut}} = 28,76 / 44,62 \approx 0,65 \text{ m/s}$$

Určení aktivní délky EO a počtu elektrických sekcí v sérii (za sebou)

Celková aktivní usazovací plocha F_{us} daného geometrického uspořádání EO je dána geometrickým vztahem

$$F_{\text{us}} = 2 \cdot PK_{\text{skut}} \cdot H \cdot L \dots [\text{m}^2]$$

Pozn.:

celkovou usazovací plochu budeme chtít vzhledem k lepším napájecím podmínkám rozdělit na dvě elektrické sekce o stejných kapacitách.

Z toho pak vyjádřená aktivní délka L celého EO je

$$L = F_{\text{us}} / (2 \cdot PK_{\text{skut}} \cdot H) \dots [\text{m}]$$

Po dosazení výše určených hodnot je pak minimální potřebná aktivní délka EO

$$L = 1807 / (2 \cdot 17 \cdot 7,5) \approx 7,1 \text{ m}$$

Zvolená řada EO EKG firmy ZVVZ Enven Engineering využívá délkový element (modul jednoho usazovacího pasu) válcovaného profilu usazovací elektrody $LP = 0,64 \text{ m}$ (tzv. délka jednoho pasu). Pro celkovou minimální aktivní délku celého EO vypočtenou výše jako

$L = 7,1 \text{ m}$ bude minimální počet pasů usazovacích elektrod PP dán vztahem

$$PP = L / 0,64 = 7,1 / 0,64 = 11$$

Celý EO resp jeho celkovou usazovací plochu máme rozdělenou do dvou sekcí, proto volíme sudý nejbližší počet pasů, dělitelný dvěma

$$PP_{skut} = 12 (= 2 \cdot 6)$$

Zpětnými přepočty pak určíme skutečnou aktivní délku EO, tj.

$$L_{skut} = PP_{skut} \cdot 0,64 = 12 \cdot 0,64 = 7,68 \text{ m}$$

tj. $L_{skut} / 2 = 6 \cdot 0,64 = 3,84 \text{ m}$ pro každou ze dvou elektrických sekcí, dále pak určíme skutečnou celkovou usazovací plochu EO, tj.

$$Fus_{skut} = 2 \cdot PK_{skut} \cdot H \cdot L_{skut} = 2 \cdot 17 \cdot 7,5 \cdot 7,68 \approx 1958 \text{ m}^2$$

tj. $Fus_{skut} / 2 = 979 \text{ m}^2$ pro každou ze dvou elektrických sekcí.

Určení napájecích zdrojů VVN pro jednotlivé sekce EO

Navržený EO má celkovou plochu usazovacích elektrod $Fus_{skut} / 2 = 979 \text{ m}^2$ pro každou ze dvou elektrických sekcí kapacitně shodných. Každá elektrická sekce bude napájena vlastním transformátorem - zdrojem velmi vysokého stejnosměrného napětí (VVN). Sekundární hodnoty zdroje VVN pro napájení sekce určíme v souladu s předešlými výpočty.

Určení sekundárních (výstupních) hodnot usměrněného proudu I_2 [kV]:

Navržený EO typu EKG má, jak je uvedeno výše, plochu usazovacích elektrod každé sekce, $Fus_{skut} / 2 = 979 \text{ m}^2$. Při volbě hodnoty měrného elektrického proudu $i_2 = 0,38 \text{ mA/m}^2$ pro danou technologii spočítáme potřebnou hodnotu proudu I_2 [mA], tj.

$$I_2 = i_2 \cdot Fus_{skut}/2 = 0,38 \cdot 979 = 372 \text{ mA}$$

K této hodnotě volíme pak nejbližší vyšší z katalogu zdrojů VVN, tj. $I_2 = 400 \text{ mA}$.

Určení sekundárních (výstupních) hodnot usměrněného napětí U_2 [kV]:

EO typu EKG má, jak je uvedeno výše, rozteč usazovacích komor $2R = 350 \text{ mm}$, z čehož je přeskoková vzdálenost od každé vysokonapěťové elektrody (napájené) k usazovací elektrodě (uzemněné) $R = 175 \text{ mm}$. Pro tuto vzdálenost zvolíme z řady napájecí zdroj VVN, který dosáhne na sekundární výstupní straně $U_{2-0} = 90 \text{ kV}$ ($I_{2-0} = 0 \text{ mA}$) naprázdno, tj. bez připojené zátěže (tabulková hodnota zjištěna experimentálně). Tato hodnota zabezpečí, že po připojení proudové zátěže sekce EO (při $I_2 = 400 \text{ mA}$) bude výstupní hodnota napětí na sekci EO cca $U_2 = 65 \text{ kV}$. Takže lze určit přibližný výkon (el. spotřebu) každé sekce – potažmo zdroje VVN, tj.

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 = 65 \cdot 400 = 26000 \text{ W} = 26 \text{ kW}$$

Z výkonu zdroje P_2 [kW] lze přibližně stanovit přes tzv. transformační poměr $\approx$ cca 1,4 (určený experimentálně vzhledem k typu zátěže) také příkon napájecího zdroje P_1 [kW].

$$P_1 = 1,4 \cdot P_2 = 1,4 \cdot 26 = 36,4 \text{ kW}$$

Tento výpočet nám pro hrubé určení stačí.

S určenými hodnotami I_2 [mA], U_2 [kV], U_{2-0} [kV], P_1 [kW] určíme z katalogu zdrojů VVN vhodný zdroj VVN pro daný EO, tj.

U_1 [V]	3/N/PE AC 400 V, (50 Hz)
I_2 [mA]	400
U_{2-0} [kV]	90
U_2 [kV]	≈ 65
P_1 [kW]	37

Závěr

Vyžaduje-li provoz stavbu odlučovače nebo filtru pro tuhé znečišťující látky (TZL), je v současné době k dispozici většinou výběr ze tří možností.

- mechanické odlučovače (MO)
- elektrické odlučovače (EO)
- látkové filtry (LF)

Mechanické odlučovače (MO)

Pro odloučení TZL se nejčastěji používají tzv. cyklony, založené na bázi odstředivé síly. Využívají se v provozech, kde je odsáváno velké množství materiálu. Snesou provozní teplotu spalin až 350 °C, při použití speciálních ocelí i více a nevadí jim rozdmýchané částice (jiskry). Jejich výhodou je jednoduchost a nezávislost na dalším zdroji energie. Z toho se odvíjí i poměrně nízká pořizovací cena a také malé náklady na údržbu.

Nevýhodou je jejich omezená účinnost, závislá na tvaru a hmotnosti odlučovaných částic TZL. Při dnešních požadavcích na úroveň TZL ve spalinách (50 mg na 1m³) tento typ odlučovačů samostatně nestačí. Další nevýhodou MO je tlaková ztráta, tvoří odpor průchodu spalin 500 až 800 Pa. Z toho vyplývá nutnost instalace výkonnějšího spalinového ventilátoru.

Elektrické odlučovače (EO)

Jejich výhodou je široký rozsah velikostí a oblastí použití. Lze jimi čistit spaliny od malých kotlů s průtokem od 3 000 m³/h až po spaliny z obrovských energetických elektrárenských bloků až 3 600 000 m³/h. Koncentrace TZL v přečištěných spalinách se pohybuje pod 50 mg na 1m³, záleží na granulometrii (velikost, povrchová plocha, tvar, hmotnost odlučovaných částic) a chemickém složení TZL. Vydrží provozní teplotu spalin až 350°C, při výrobě ze speciálních ocelí až 450°C. Nevadí jim rozdmýchané částice (jiskry). Mají velmi malou tlakovou ztrátu 50 až 250 Pa, což neklade velké požadavky na výkon spalinového ventilátoru. Výhodou je vysoká životnost, zpravidla 10 až 25 let.

Nevýhodou je závislost na chemickém složení spalin, granulometrii, elektrochemii TZL. Velký zastavěný prostor, vysoká hmotnost, vyšší pořizovací náklady.

Látkové filtry (LF)

Jejich největší výhodou je vysoká účinnost v podstatě nezávislá na vstupní koncentraci a granulometrii TZL. Koncentrace TZL v přečištěných spalinách se pohybuje pod 5 mg/m³, což závisí také na použité tkanině.

Hlavní nevýhodou je omezení použitelnosti při vyšších teplotách spalin nad 200°C. Nejsou vhodné pro prostředí, kde je vysoký podíl nespálených částic v TZL, které mohou ve filtru dohořívát. To může způsobit propálení tkanic. Mají vysokou tlakovou ztrátu, tvoří odpor průchodu spalin 1000 až 1500 Pa. To klade také vysoké nároky na výkon spalinového ventilátoru. Další nevýhodou je vysoká pořizovací cena a krátká životnost tkanin cca 2-3 roky.

Pomineme-li mechanické odlučovače, které dnes již nesplňují nároky na čistotu spalin a v energetice se téměř nepoužívají, pak můžeme porovnat EO a LF také z hlediska ekonomiky provozu. Provoz odlučovacího zařízení je poměrně nákladný.

Za stejných vstupních podmínek do EO a LF (průtočné množství spalin, teplota spalin, koncentrace popílku atd.) se dá říct, že LF má asi o 20-30% vyšší spotřebu elektrické energie než EO. Je to dáno především nutností výkonnějšího spalinového ventilátoru a potřeby tlakového vzduchu pro zpětné profukování filtračních hadic (čištění). Také náklady na očekávané opravy za dobu 15 let provozu jsou v dnešní době u LF asi o 20-25% vyšší, což je způsobeno výměnou filtračních hadic každé 2-3 roky. U EO se uvažuje výměna elektrod po cca 12 letech. Také náklady na pořízení LF jsou v dnešní době asi o 4-8% vyšší oproti EO.

Při dnešním tlaku na spalování různých druhů biomasy, kde vstupní hodnota koncentrace TZL bývá nízká, teplota spalin se pohybuje okolo 180-250°C a obsahuje velké procento nespálených částic, se jako vhodnější jeví EO. Pokud však dojde ke zpřísnění hygienických norem pro čistotu vypouštěných spalin, pak vysoká účinnost čištění u LF bude tyto čím dál více upřednostňovat před EO. Což se začíná projevovat už dnes a to i přes vyšší provozní i pořizovací náklady. Tomuto trendu také přispívá vývoj nových materiálů pro výrobu filtračních tkanin odolávajících vyšší teplotě. Ty jsou zatím příliš drahé pro běžné použití v LF. Se zvládnutím výroby odolných tkanin se však dá očekávat velký nárůst zavádění LF v energetice.

Literatura

- [1] Böhm. Elektrické odlučovače. 1. vydání. Praha. SNTL, 1977. 328s.
- [2] Nový a kol. Technika životního prostředí (skripta). Praha. ČVUT, 2000.
ISBN 80-01-02108-4
- [3] Hemerka. Odlučování tuhých částic (skripta). Praha. ČVUT, 1994. ISBN 80-01-01088-0
- [4] Kabát. Elektrické odlučovače - vnitrofiremní dokumentace. ZVVZ Milevsko
- [5] www.chemistryexplained.com
- [6] www.britannica.com