ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra elektroenergetiky

Ověření elektrické pevnosti izolátoru elektrostatického odlučovače

Electric strength verification of electrostatic precipitator insulator

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektroenergetika

Vedoucí práce: Ing. Radek Procházka, Ph.D.

Vypracoval: Bc. Martin Mizner

Praha 2016

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Martin Mizner**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Ověření elektrické pevnosti izolatoru elektrostatického odlučovače**

Pokyny pro vypracování:

1. Popis konstrukce a činnosti elektrostatického odlučovače elektrárenského bloku
2. Realizace numerického modelu metodou FEM a jeho ověření na základě experimentálních měření
3. Návrh nejvhodnější konstrukce vysokonapěťového přívodu elektrostatického odlučovače s ohledem na maximální elektrickou pevnost

Seznam odborné literatury:

[1] Bém, J. : Elektrické odlučovače, SNTL, 1977
[2] J. Kuffel, Kuffel E., and W.S. Zaengl., High Voltage Engineering Fundamentals. Elsevier Science, 2000

Vedoucí: Ing. Radek Procházka, Ph.D.

Platnost zadání: do konce zimního semestru 2017/2018

doc. Ing. Zdeněk Müller, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 24. 5. 2016 …….

Bc. Martin Mizner

Poděkování

Tímto bych chtěl velmi poděkovat vedoucímu práce Ing. Radkovi Procházkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a čas při jejím zpracování.
Dále bych touto cestou rád poděkoval i mojí ženě za podporu po celou dobu mého studia.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá elektrostatickými odlučovači a jejich částmi. První část se zabývá popisem jednotlivých typů odlučovačů. Druhá část je zaměřena na popis funkce a konstrukčním řešením jednotlivých částí elektrického odlučovače. Ve třetí části je popsáno měření a jsou prezentovány výsledky tohoto měření. Ve čtvrté části je popsána realizace numerického modelu metodou FEM pomocí software a zevrubný popis vhodných programů. Dále byla provedena konkrétní realizace numerických modelů a porovnání s výsledky měření.

Klíčová slova:

Elektrostatický odlučovač, izolátor, elektrická pevnost, FEM, Agros 2D

Abstract

This master's thesis deals with electrostatic precipitators and their parts. The first part describes the various types of separators. The second part focuses on the description of the function and design of the individual parts of the electrostatic precipitator. The third section describes the measurement and presents the results of this measurement. The fourth part describes the implementation of a numerical model by using FEM software and a comprehensive description of suitable programs. The specific implementation of numerical models and their comparisons with experimental measurements were carried out.

Keywords:

Electrostatic precipitator, insulator, electrical strength, FEM, Agros 2D

Obsah

Obsah **6**

Seznam použitých zkratek a symbolů **7**

1. Úvod **8**

2. Odlučování **8**

2.1. Rozdělení odlučovačů 9

2.1.1. Suché mechanické odlučovače 10

2.1.2. Textilní odlučovače 11

2.1.3. Mokré mechanické odlučovače 12

2.1.4. Elektrické odlučovače 14

3. Elektrické odlučovače **16**

3.1. Konstrukce elektrických odlučovačů 16

3.2. Elektrické pole a koróna 25

4. Měření **30**

4.1. Použité přístroje 30

4.2. Postup a naměřené hodnoty 31

4.3. Nejistoty měření 31

4.4. Výsledky měření 34

5. Výpočet elektrického pole numerickými metodami **35**

5.1. Přehled dostupného software 35

5.2. Model zkoušek izolátorů pomocí software Agros 2D 36

5.3. Příprava modelu 36

5.4. Výsledky simulace a porovnání s měřením 39

6. Závěr **49**

Seznam použité literatury **50**

Seznam příloh **52**

Přílohy **53**

Seznam použitých zkratek a symbolů

E	$[V.m^{-1}]$	Intenzita elektrického pole
E_0	$[V.m^{-1}]$	Počáteční intenzita elektrického pole
E_{max}	$[V.m^{-1}]$	Maximální intenzita elektrického pole
E_r	$[V.m^{-1}]$	Intenzita elektrického pole na povrchu elektrody
E_{krit}	$[V.m^{-1}]$	Kritická intenzita elektrického pole
U	[V]	Elektrické napětí
U_0	[V]	Počáteční elektrické napětí
U_p	[V]	Přeskokové elektrické napětí
U_{krit}	[V]	Kritické elektrické napětí
r, r_i	[m]	poloměr elektrody
u_A	[V],[%]	nejistota typu A
u_B	[V],[%]	nejistota typu B
u	[V],[%]	kombinovaná nejistota
R	[m]	Vzájemná vzdálenost elektrod
z_{jmax}	[V],[%]	maximální odchylka
FEM		Metoda konečných prvků (Finite Element Method)

1. Úvod

Cílem této diplomové práce je popsat konstrukci a činnost elektrického odlučovače elektrárenského bloku, dále realizovat numerický model metodou FEM a jeho ověření na základě experimentálního měření a v poslední řadě navrhnout nejvhodnější konstrukci vysokonapěťového přívodu elektrického odlučovače s ohledem na maximální elektrickou pevnost. V první části je popsáno rozdělení odlučování a nejčastěji používané typy odlučovačů. V druhé části je podrobněji představeno konstrukční uspořádání, popis jednotlivých částí a princip elektrického odlučovače. Ve třetí části se nachází popis měření, jeho postup, naměřené hodnoty a zhodnocení výsledků měření. Závěrečná část diplomové práce seznamuje s dostupným software pro simulaci polí metodou FEM a jejich základní součástí a je nastíněn postup při vytváření modelů v programu Agros 2D, následné nastavení parametrů a simulace působení elektrického pole na jednotlivé části.

2. Odlučování

Znečišťování ovzduší pevnými, kapalnými a plynnými škodlivými emisemi, které kromě člověka působí na životní prostředí, je jedním z mnoha faktorů mající zřejmý negativní dopad ve smyslu negativně působící změny přírodní struktury ovzduší a prostředí. Proto se snahy směřující k ochraně životního prostředí stalo objektem mezinárodní spolupráce v mnoha vědních oborech, které se touto problematikou zabývají z různých hledisek. Eliminace nebo alespoň zmírnění dopadů na životní prostředí je snaha účelně vynakládat prostředky, které výrazně omezují množství škodlivin vznikajících v průmyslové výrobě dříve, než se mohou dostat do ovzduší. Každý zdroj znečištění také podléhá dodržování ustanovení zákona č. 201/2012 Sb., a poslední platnou Vyhlášku č.415/2012 Sb. ze dne 21. listopadu 2012 o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší, která mimo jiné stanovuje limity povolených emisí pro jednotlivé zdroje rozdělené nejen podle typu emisí, ale i podle výkonu zdroje. Tyto zařízení, schopna odloučit nežádoucí příměsi z nosného plynu se souhrnně označují jako odlučovací zařízení nebo jen odlučovače.

Odlučovače můžeme rozdělit podle několika hledisek:

- podle druhu fyzikálního procesu pro účely odlučování příměsí z proudícího plynu;

- podle relativního postavení odlučovače vzhledem ke zdroji a spotřebiči;

- podle použití odlučovače v integrované soustavě [1,3,17].

2.1. Rozdělení odlučovačů

První aspekt odlučovacího zařízení podle převažujícího fyzikálního procesu můžeme rozdělit na tyto základní druhy:

- odlučovače mechanické suché a mokré;

- odlučovače elektrické suché a mokré;

- filtry suché a smáčené;

- zařízení kombinující odlučovače různého druhu.

Z druhého hlediska se odlučovače rozdělují dle umístění:

- **Primární proces odlučování**

Odlučovač je umístěn bezprostředně za zdroj znečištěného plynu. V tomto případě odlučovač slouží k čištění odpadního plynu přiváděných do komína a do volné atmosféry (např. odlučování popílku ze spalin).

- **Sekundární proces odlučování.**

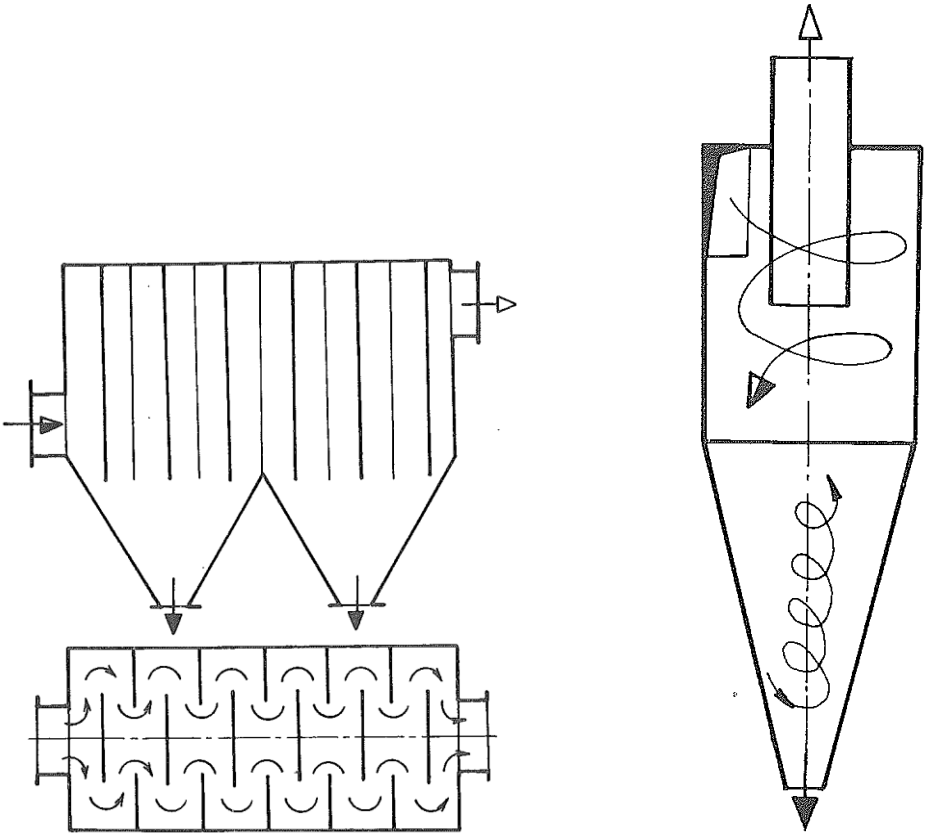
V tomto případě je odlučovač umístěn před spotřebič. Znečištěný plyn je odebírán z prostoru (např. čištění vzduchu z atmosféry). Do této skupiny patří i odlučovací proces uskutečňovaný recirkulací [1,3]

2.1.1. Suché mechanické odlučovače

Suché mechanické odlučovače se řadí mezi nejstarší a v praxi často využívané odlučovače. Princip odlučování částic příměsí je založen na využití gravitačního, setrvačného a odstředivého principu.

Mezi kladné vlastnosti těchto odlučovačů jsou jednoduchá konstrukce, provozní spolehlivost, nenáročnost na obsluhu a údržbu, nízké pořizovací náklady, nízká spotřeba energie, vhodnost i pro vyšší teploty plynu. Nevýhodou tohoto typu odlučovačů je nízká odlučivost pro jemné frakce. Mez odlučivosti různých typů těchto odlučovačů se nachází v rozmezí ve velikosti částic příměsí 2 až 100 μm. Měrná spotřeba energie je nízká a pohybuje se přibližně v mezích 0,1 až 0,3 kWh/1000 m^3.

Samostatně použité odlučovače dnes již nesplňují požadavky na emisní limity tuhých znečišťujících látek, z tohoto důvodu se většinou používají jako první stupeň u vícestupňových odlučovacích systému k odloučení hrubších frakcí částic [1,3].

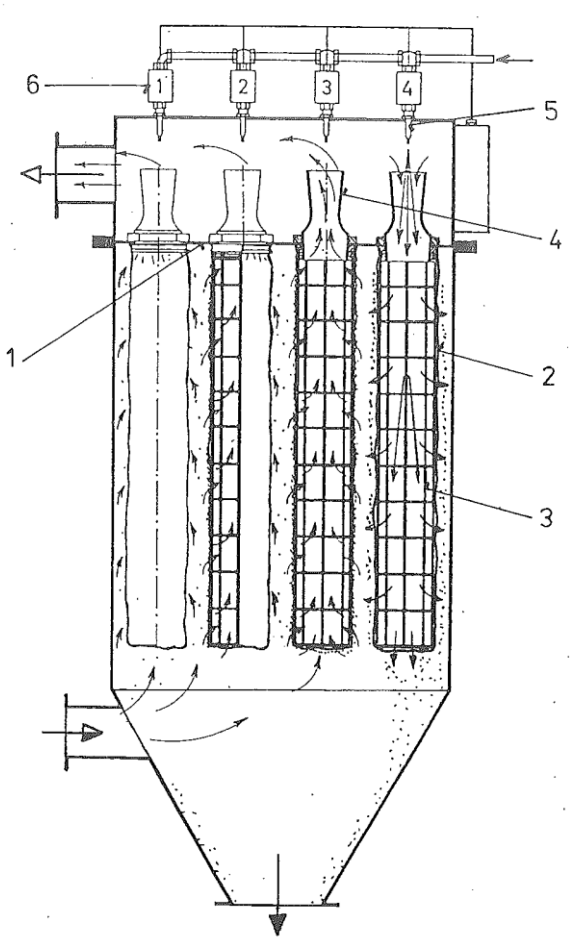


Obr. 2.1 Příklad suchého gravitačního odlučovače, zde se svislými přepážkami, a vírového odlučovače (převzato z [3])

2.1.2. Textilní odlučovače

V poslední době s rozvojem technologií a materiálů dochází k rozvoji odlučovačů textilních. Základním principem těchto odlučovačů je odloučení příměsí z nosného plynu pomocí porézní tkaniny nejčastěji ve tvaru kapes nebo hadic. Tyto prvky (hadice nebo kapsy) se z důvodu větší odlučovací plochy seskupují do větších celků – komor. Pro velké objemy kouřových plynů je vhodné těchto komor vkládat několik paralelně (popř. paralelně-sériově – např. dvě sériové větve, každá větev složena s několika paralelně zapojených komor).
Kladné vlastnosti těchto typů odlučovačů jsou nejvyšší odlučivost pro jemné částice, naopak nevýhodou bývá vyšší tlaková ztráta (0,8 – 1,5 kPa), podobně jako u elektrických odlučovačů vysoké investiční náklady, potřeba značného obestavěného prostoru a kvalifikovaná obsluha a údržba. Na obr. 2.2 je znázorněna komora hadicového odlučovače s regenerací tlakovým vzduchem.

Dělící rovina ***1*** mezi zanesenou a čistou částí komory nachází v horní části, kde jsou na přírubách zavěšeny jednotlivé hadice ***2*** a odlučování probíhá zvenku dovnitř. Zborcení hadic a tím snížení odlučovací plochy zabraňuje drátěná vestavba ***3***, na kterou jsou jednotlivé hadice nasunuty. Čistý plyn protéká dýzovými nástavci ***4*** do sběracího prostoru. Proti ústí každé hadice jsou umístěny dýzy ***5***, kterými je v krátkých časových intervalech přiváděn přes solenoidové ventily ***6*** tlakový vzduch o tlaku přibližně 0,5 MPa. Uvnitř hadice náhlá změna průtoku vyvolá výrazný tlakový impuls, který se rychle přenese po celé délce hadice a způsobí tak svým dynamickým účinkem intenzivní regeneraci filtrační textilie [3].



Obr. 2.2 Komora hadicového odlučovače s regenerací tlak. vzduchem (převzato z [3])

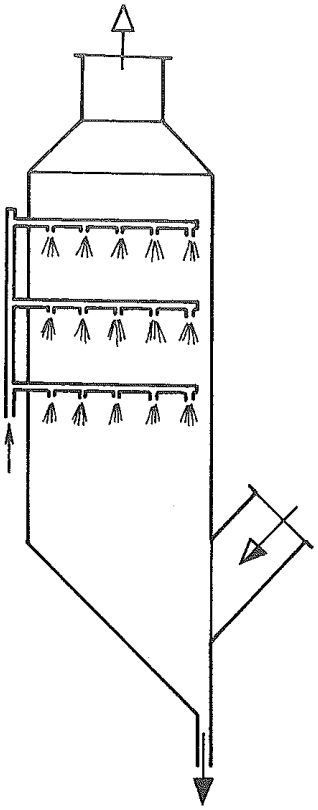
2.1.3. Mokré mechanické odlučovače

Mokré mechanické odlučovače jsou podloženy využitím setrvačného a odstředivého odlučovacího principu. K odloučení částic příměsí do kapaliny dochází v podstatě těmito čtyřmi způsoby: odloučením částic na kapičkách vlivem setrvačného principu, odloučením částic na smáčeném povrchu obtékaných těles vlivem setrvačného, případně odstředivého principu, odloučením částic na hladině kapaliny vlivem setrvačného principu a v neposlední řadě odloučením částic na povrchu bublin plynu při průchodu vrstvou kapaliny.

Podle způsobu vytvoření kontaktního povrchu plyn - kapalina a použitého odlučovacího principu můžeme mokré mechanické odlučovače rozdělit do šesti podskupin: sprchové, setrvačné, vírové, pěnové, proudové a rotační.

Za pozitivní charakteristické znaky mokrých odlučovačů v porovnání se suchými mechanickými odlučovači je dosahováno lepší odlučivosti pro jemné prachové částice, jsou vhodnější pro lepivé a abrazivní částice, společně s tuhými částicemi můžeme zachycovat i plynné znečisťující látky (např. odsíření), můžeme je použít pro vysoké koncentrace částic příměsí, kondenzace plynu nenarušuje odlučování, ale fakticky jej u jemných částic příměsi zlepšuje, jsou vhodné pro odlučování výbušných prachů (minimalizuje se vznik nebezpečné koncentrace), ve srovnání s elektrickými odlučovači jsou méně náročné na obestavěný prostor.

Nevýhodou mokrých odlučovačů patří především spotřeba vody, která se odpaří a je nutné ji doplňovat a může být omezujícím prvkem při odlučování plynů o vyšší teplotě, nutnost kalového hospodářství, nebezpečí koroze, nebezpečí zamrzání, vyšší tlaková ztráta u některého typu odlučovačů, ochlazení plynu před vypouštěním do ovzduší, nevhodnost použití pro cementující prachy a v poslední řadě náročnost na obsluhu a údržbu. Předpokladem vhodnosti použití mokrých odlučovačů pro daný prach je jeho dobrá smáčivost. Z provozních důvodů (nežádoucí tvorba pěny) i z finančních důvodů se smáčivost částic zpravidla neupravuje, proto je přirozená smáčivost částic odloučených příměsí limitujícím faktorem použitelnosti tohoto typu odlučovačů [3].

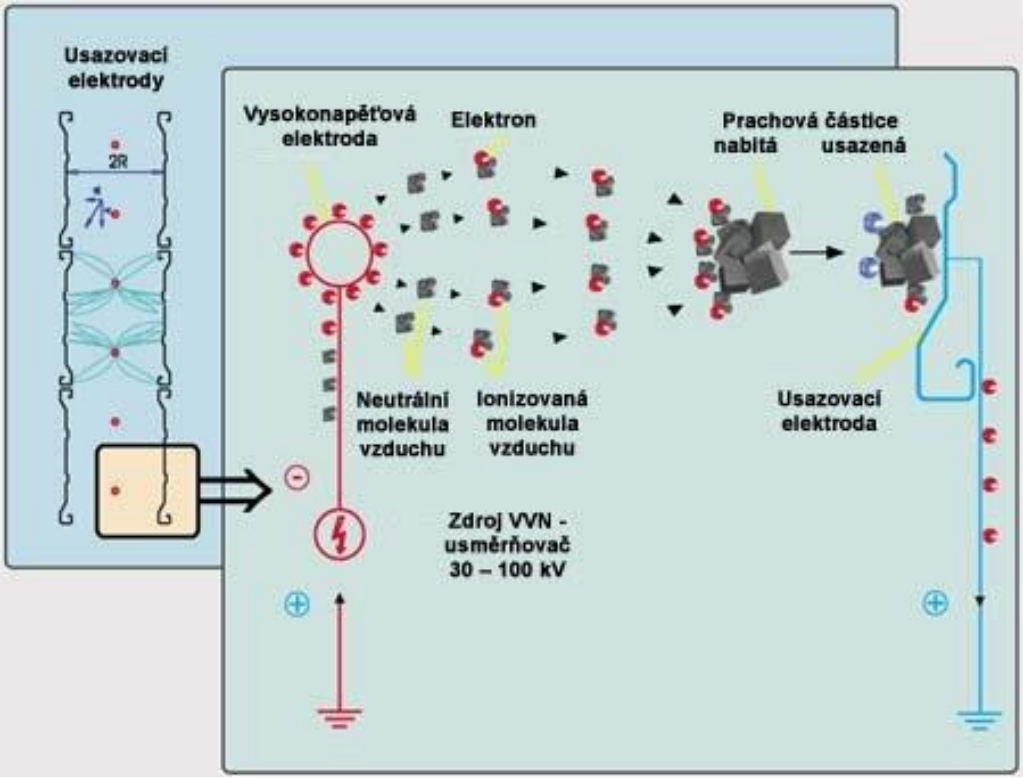


Obr. 2.3 Příklad mokrého mechanického odlučovače – sprchová věž (převzato z [3])

2.1.4. Elektrické odlučovače

Elektrické odlučování v elektrárenském provozu je proces, při kterém jsou tuhé částice popílku odstraněny z nosného kouřového plynu působení elektrických sil. Pro elektrické odlučovače se používá i ne zcela přesné označení elektrostatický odlučovač. Elektrické pole vytvořené mezi elektrodami těchto odlučovačů je sice elektrostatické, pohybem iontů a nabitých částic ale vzniká mezi elektrodami proud. První elektrické odlučovače byly použity na počátku 20. století a od té doby se staly nejběžnějšími odlučovači pro čištění kouřových (obecněji odpadních) plynů s vysokými objemovými průtoky. Dnes jejich použití převládá v energetice u velkých elektrárenských bloků při čistění kouřových plynů ze spalovacích procesů.

Za typické kladné vlastnosti elektrických odlučovačů jsou považovány vyšší odlučivost i pro jemné částice příměsí, nízká tlaková ztráta do 200 Pa určená spíše ztrátami v kouřovodech než při průchodu odpadního plynu vlastním odlučovačem. Velmi vhodné jsou pro velké objemové průtoky odpadních plynů, nízká měrná spotřeba energie, možnost použití pro vysoké teploty plynu danou použitými materiály.



Obr. 2.4 Princip odlučování (převzato z [18])

Jako nevýhodné vlastnosti je menší citlivost na abrazivní částice, poměrně vysoké investiční náklady, vysoké nároky na půdorysný i obestavěný prostor, náročnost na kvalifikovanou obsluhu a údržbu, omezena je vstupní koncentrace prachu, citlivost na změny ve složení prachu, významnou míru má měrný elektrický odpor příměsí, proto jsou nevhodné pro odlučování příměsí s vysokým nebo naopak nízkým elektrickým odporem [1,3,17].

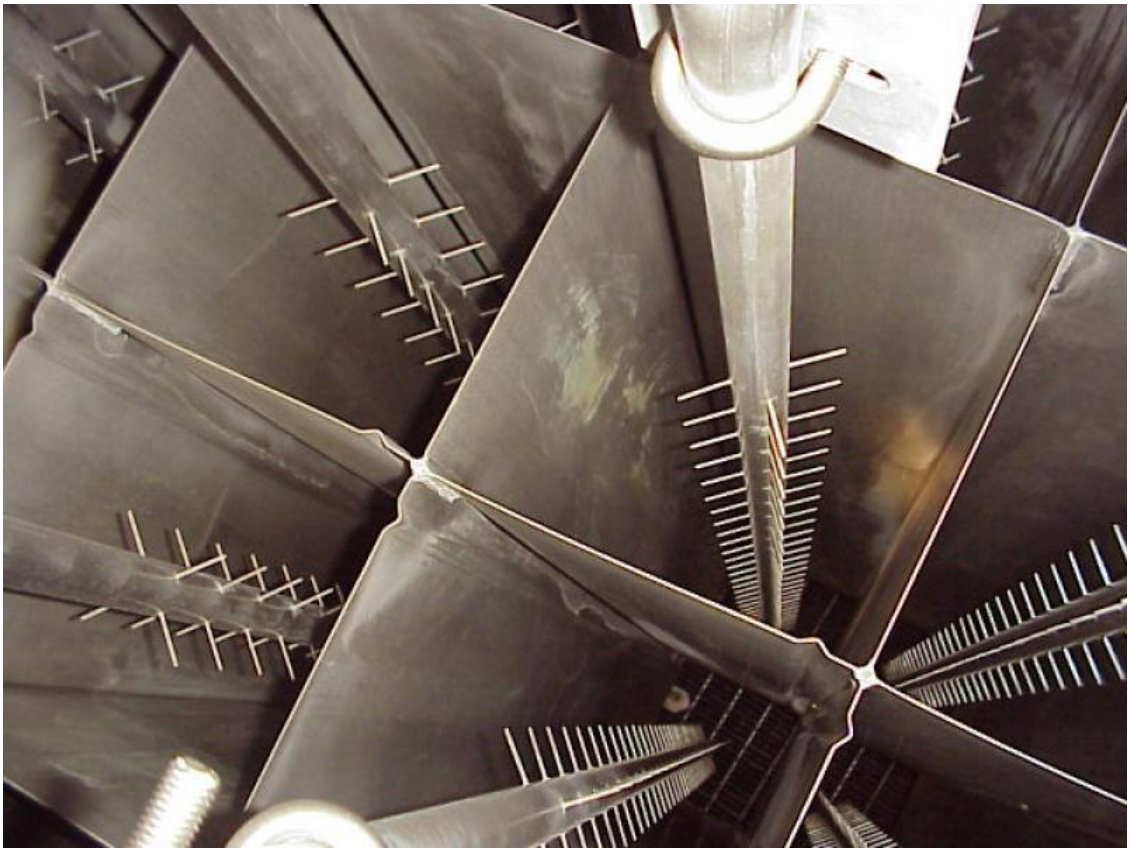
3. Elektrické odlučovače

Elektrické odlučovače podle uspořádání soustavy elektrod můžeme rozdělit na elektrické odlučovače trubkové a komorové. Dnes se používají dominantně odlučovače komorové, proto jsem ve své práci konstrukci tohoto typu popsal podrobněji a konstrukci trubkových jsem popsal jen okrajově.

3.1. Konstrukce elektrických odlučovačů

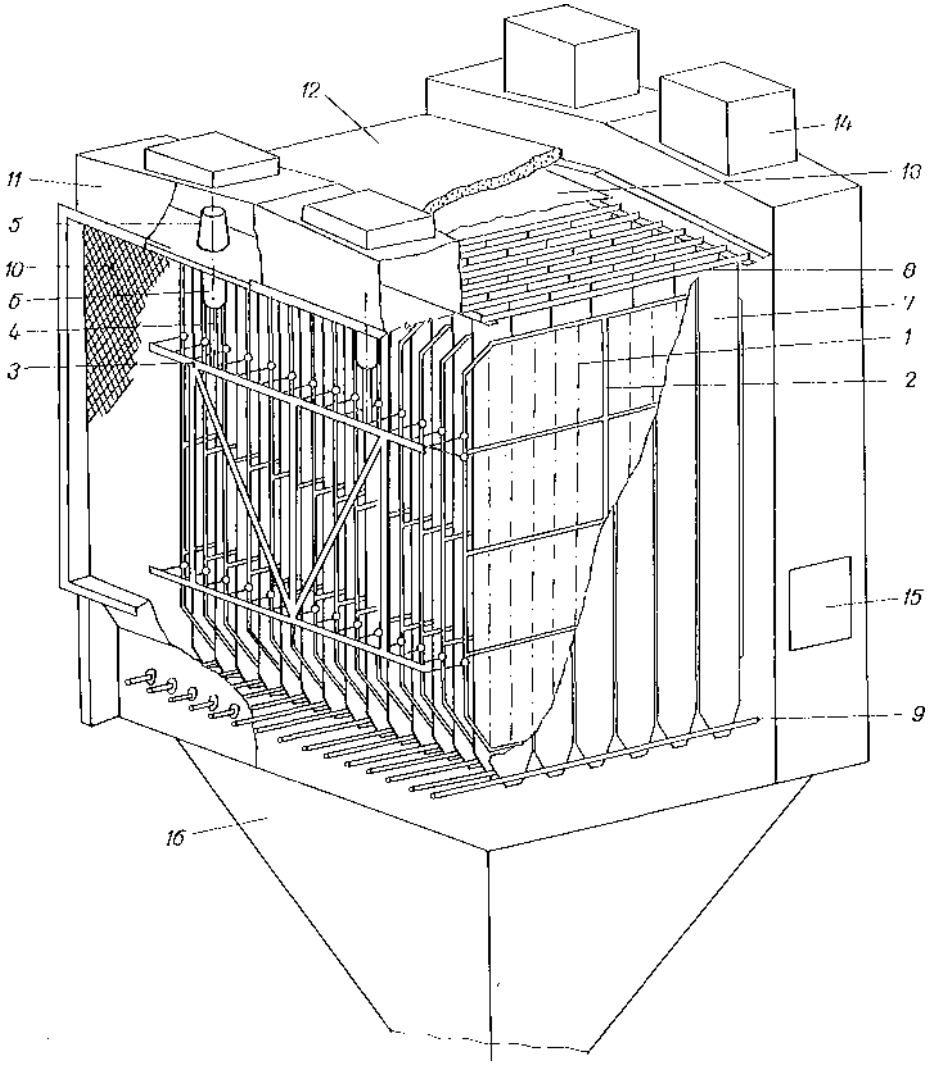
Trubkové odlučovače se používají jen ve specifických případech pro odlučování většinou kapalných příměsi, jako dehtu, olejů a mlh. U tohoto typu odlučovače se systém elektrod skládá z osově symetrických válcových, šestihranných nebo čtvercových sběracích elektrod, ve kterých se v ose prvku nachází elektrody ionizační zavěšené na rámu. Většinou se skládá trubkový odlučovač z jedné či několika sekcí. V případě suchého provedení je oklep sběracích elektrod převážně společný pro jednu sekci, která se pro snížení úletu dle potřeby uzavře, stále však zůstává pod napětím. Při použití k odlučování kapalných příměsí nebo úmyslné použití kapalné vrstvy na sběracích elektrodách k účinnému odplavení příměsí se oklep nepoužívá. Skříň odlučovače je společná pro všechny sekce a má válcový či obdélníkový průřez [1,3,17].

Obr. 3.1 Detail elektrod trubkového mokrého odlučovače (převzato z [10])



Obr. 3.2 Detail elektrod trubkového mokrého odlučovače (převzato z [13])

Komorové odlučovače jsou v energetice nejrozšířenějším typem odlučovače. Tyto odlučovače se dají rozdělit do dvou skupin podle vstupu čištěného plynu na vertikální a horizontální. V energetice, zejména u energetických výrobních bloků, se nejčastěji používají komorové odlučovače horizontální. Jak už z názvu vyplývá, odpadní či kouřový plyn vstupuje do odlučovače v horizontálním směru a ve stejném směru jej opouští plyn vyčištěný od nežádoucích příměsí [1,3].

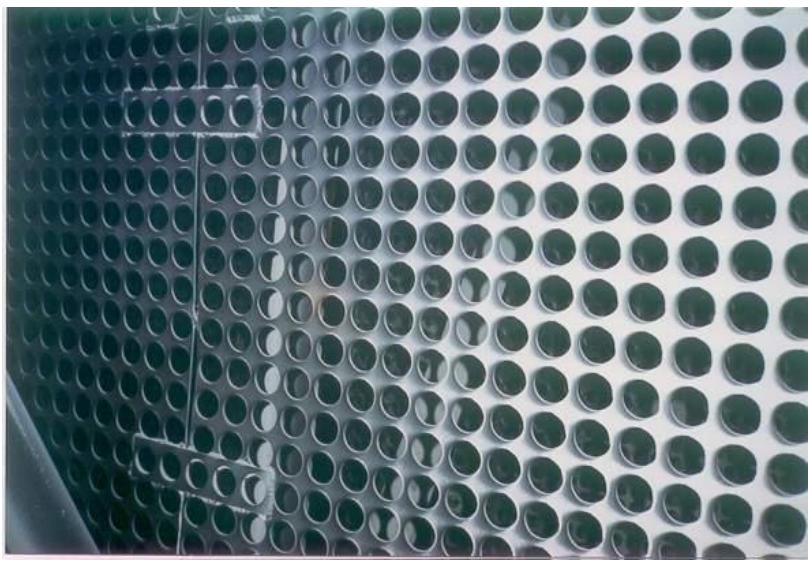


Obr. 3.3 Komorový horizontální odlučovač – jedna sekce
1 — ionizační elektroda; *2* — nosný rám ionizačních elektrod; *3* — závěsný rám; *4* — závěsné táhlo; *5* — izolátor; *6* — ochranná trubka; 7 — sběrací elektroda; *8* — nosný trám sběrací elektrody; *9* — vodicí a oklepávací trámy; *10* — rozdělovači stěna; *11* — nosník skříně; *12* — střecha skříně; *13* — mezistrop; *14* — komůrky izolátorů; *15* — průlez; *16* — sběrač (převzato z [1])

Celý systém odlučovače se skládá z několika sekcí, které jsou uloženy do společné skříně tak, že mezi sekcemi je mezera, ve které se umisťují závěsné rámy elektrod a jejich oklepávání, dále je tato mezera využitá pro montáž, revizi, údržby a opravy. Touto mezerou je zabezpečena také dostatečnou vzdálenost mezi sekcemi, které jsou napájeny různou velikostí napětí [1,3].

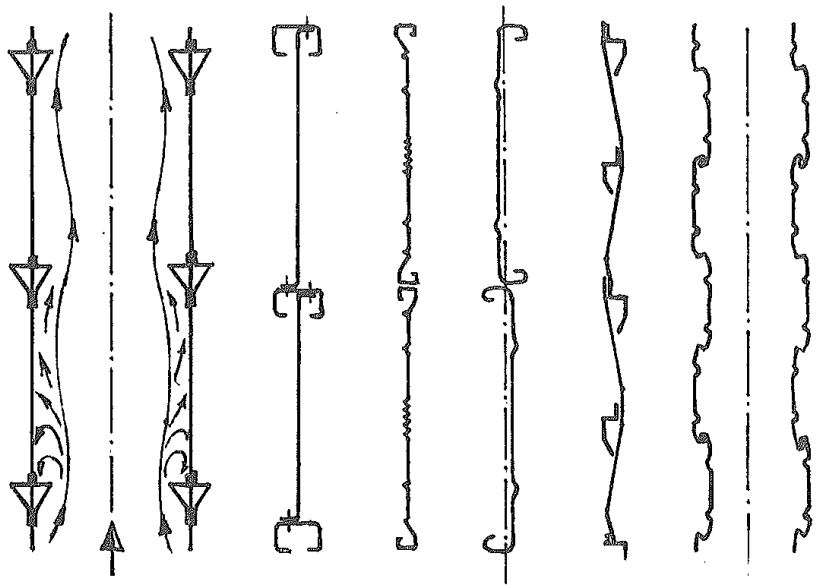
Obr. 3.4 Detail mezery mezi sekcemi – zde je vidět rošt pro snadný pohyb pracovníků údržby, oklepávací kladívka oklepu usazovacích elektrod a uchycení rámu vysokonapěťových elektrod (vlastní fotografie s vědomím provozovatele)

Kvůli rovnoměrnému rozložení znečištěného plynu po celém profilu odlučovače se do vstupních kanálů zabudovávají rozváděcí lopatky, které ovlivňují proudění, na vstup odlučovače se vkládá do proudu ještě mříž k dalšímu zlepšení rozložení proudu plynu [1,3,5,6,8].



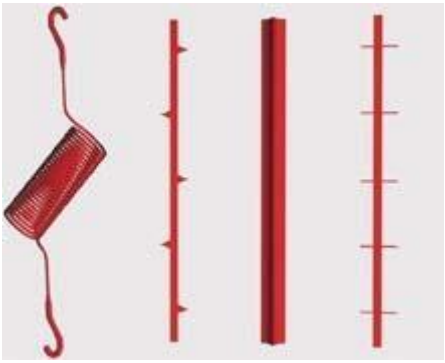
Obr. 3.5 Detail mříže (převzato z [6])

Ve skříni odlučovače jsou usazovací elektrody umístěny rovnoběžně tak, aby kladly co nejmenší odpor protékajícímu plynu. Každý blok usazovacích elektrod se skládá z několika spolu spojených profilovaných pásů zavěšené na horním trámci pomocí čepů. Dolní části těchto pásů jsou připevněny na oklepávací trámce uložené kluzně umožňující pohyb v podélném směru a v příčném směru slouží k vymezení požadované rozteče mezi jednotlivými bloky. Tyto bloky jsou vodivě pospojovány se skříní [1,3].



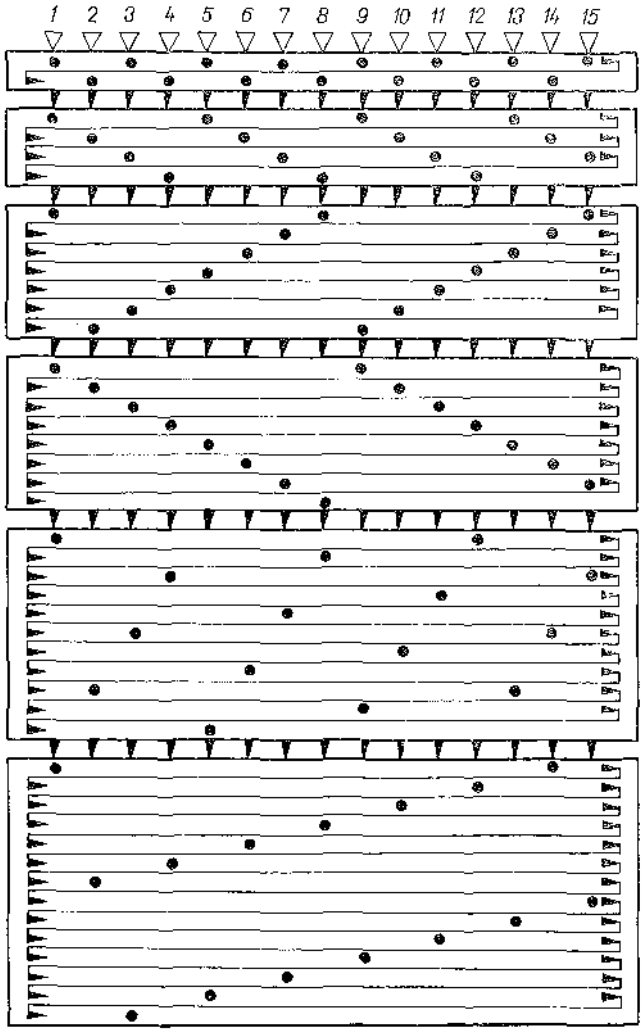
Obr. 3.6 Příklady profilů usazovacích elektrod (převzato z [3])

Vysokonapěťové ionizační elektrody jsou drátové popř. hrotové kruhového, čtvercového, asteroidického nebo šestihranného průřezu. Můžou mít tvar plochých pásků s prolisy či prostřihy, na kterých po vyhnutí prolisu nebo prostřihu vzniknou požadované hroty. Elektrody se nejčastěji umisťují do kovových rámů z důvodů udržení roviny, pro snadnější oklep, vodivé spojení všech elektrod a také z důvodu dostatečné tuhosti. Tyto rámy jsou pak zavěšené pomocí nosných izolátorů, které zajišťují izolované spojení se skříní odlučovače [1,3,18].



Obr. 3.7 Druhy vysokonapěťových elektrod (převzato z [18])

Další důležitou součástí elektrického odlučovače jsou oklepávací zařízení usazovacích a vysokonapěťových elektrod. Tyto oklepy zajišťují odstranění ulpívajících částic příměsí z elektrod. Oklepy usazovacích elektrod je většinou řešeno pomocí přepadávajících kladiv, které se otáčí na hřídeli (obr.3.4). Oklepy rámu vysokonapěťových elektrod je řešeno také většinou kladivy, které se pohybují pomocí táhel procházející izolátorem. Pohyb je zajištěn klikovým mechanismem, který je umístěný nad izolátorem. U těchto odlučovačů je potřebné oklepy rámu elektrod jednotlivých sekcích rozdělit jednak intenzitou, ale také i frekvencí. Vstupní sekce se oklepávají menší intenzitou a vyšší frekvenci z důvodu nejvyššího zachycení příměsí.Výstupní sekce je vhodné oklepávat elektrody intenzivněji a s nižší frekvencí. Pokud konstrukce neumožňuje rozdělení do sekcí, jsou elektrody oklepávány se stejnou intenzitou a frekvencí [1,3,15].



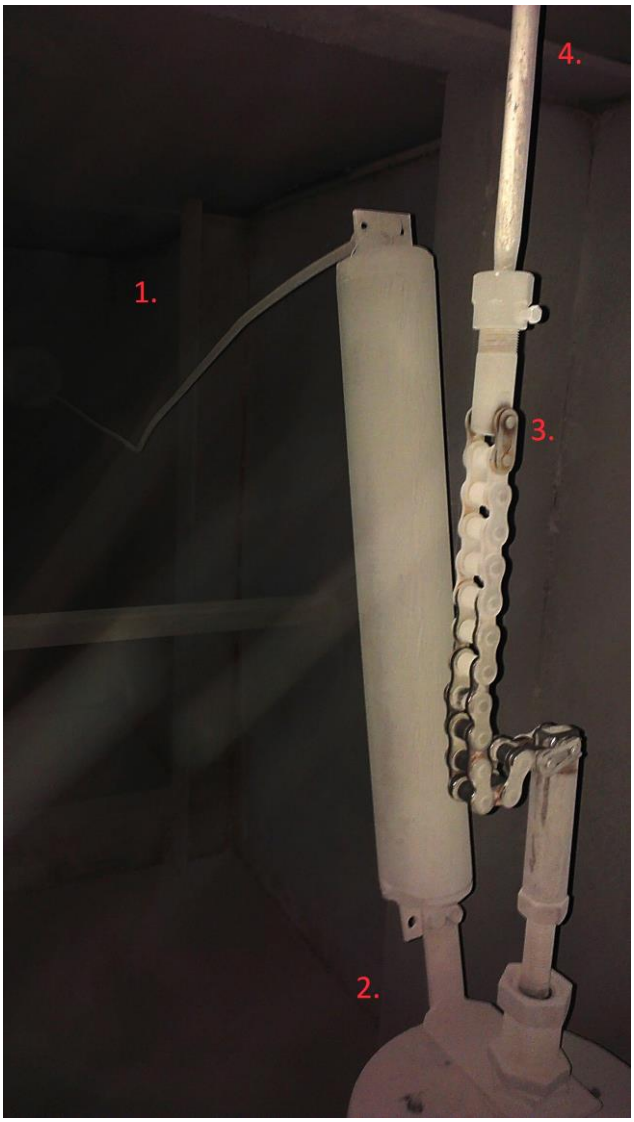
Obr. 3.8 Pořádí oklepávání usazovacích elektrod (převzato z [1])

Čas potřebný k oklepu toho samého rámu elektrod nemá být příliš krátká ani příliš dlouhá (úbytkem napětí na vrstvě dochází ke snížení účinku). U odlučovače se tento čas určuje buď z předešlých zkušeností nebo při provozu zkusmo s ohledem na úletové množství. Také se může použít přerušovaného oklepávání, kdy po oklepávacím jednoho nebo několika cyklech učiní přestávka. Vysokonapěťové elektrody v jedné sekci odlučovače se většinou oklepávají současně [1,3,18].

Obr. 3.9 Detail oklepávacích kladiv rámů vysokonapěťových elektrod (vlastní fotografie s vědomím provozovatele)

Izolátory jsou používány v elektrických odlučovačích nejen k oddělení části pod napětím (přiváděné k rámům vysokonapěťových elektrod) a uzemněné části, ale mají i funkci nosného prvku a často i prvku těsnícího. V elektrických odlučovačích se používají izolátory zvonové, průchodkové a podpěrné. Izolátory podpěrné mají funkci pouze izolační a nosnou, jsou na nich podepřeny např. rámy vysokonapěťových elektrod. Průchodkové izolátory se používají zejména pro svojí izolační a těsnící schopnost. Zvonové izolátory plní funkci nosnou, izolační i těsnící. Tyto izolátory jsou konstruovány pro velké zatížení v tlaku svým tvarem.

Každý zvonový izolátor je zde opatřen ve vrchní části kovovou „čepičkou“ s otvorem v ose kvůli průchodu táhla oklepu rámu vysokonapěťových elektrod a tím přivedení napětí k rámu vysokonapěťových elektrod. Ve spodní části je upevněn do patky spojeného se skříní. Vnější povrch izolátorů je od znečištěného plynu téměř izolován, vnitřní povrch se nachází ve znečištěném plynu, což bývá nevýhodou. Protože se každá strana nachází v rozdílném prostředí, bývá problém kondenzace par vlivem rozdílných teplot uvniř a vně izolátoru a tím i ke snížení elektrické pevnosti. Řešení je vyhřívání izolátoru, který lze regulovat a tím podřizovat teplotu aktuálním podmínkám provozu [1,3].



Obr. 3.10 Přívod vysokého napětí ***1*** k „čepičce“ ***2***, je zde patrné táhlo k oklepu rámu vysokonapěťových elektrod přes řetěz ***3*** a laminátovou tyč ***4***, která slouží jako izolátor (vlastní fotografie s vědomím provozovatele).

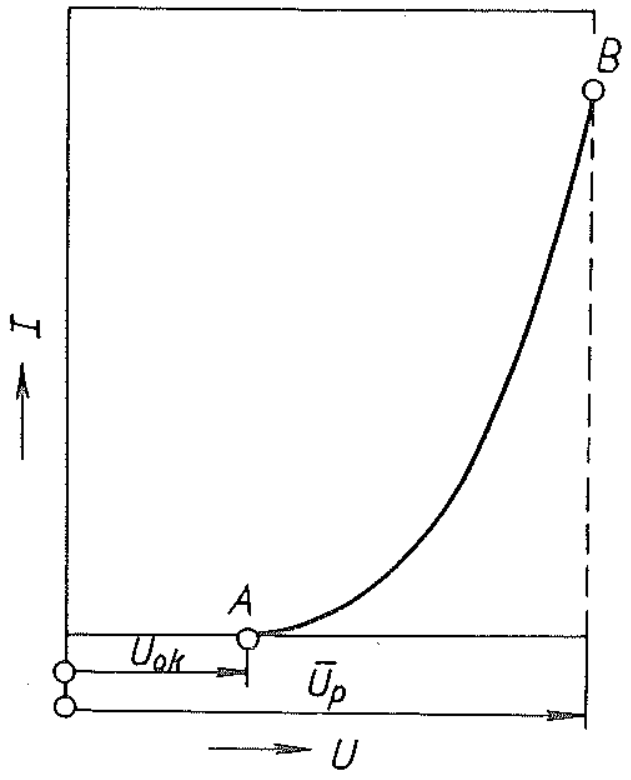
Mezi poslední z důležitých částí, které je nedílnou součástí elektrických odlučovačů, jsou napájecí zdroje vysokého napětí. Zpravidla má každá sekce svůj napájecí zdroj, který je tvořen vysokonapěťovým transformátorem a usměrňovačem. Transformátor většinou bývá jednofázový a mívá v sérii s primárním vinutí vřazenou tlumivku omezující zkratové proudy při přeskoku. Usměrňovač je zapojen na straně sekundárního vinutí. V dnešní době bývá součást zdroje sofistikované řízení, které je schopné aktivně omezovat velikost napájecího napětí a proudu, počítat přeskoky, signalizovat poruchy a podobně [1,3,18].

Obr. 3.11 VN transformátory (zde olejové) se skříněmi řízení (vpravo) (vlastní fotografie s vědomím provozovatele)

Samozřejmě nesmíme zapomínat na odvod odloučených příměsí. Zpravidla bývá pod každou sekcí elektrického odlučovače výsypka, kam odloučené příměsi vlivem gravitace padají. Tyto výsypky je vhodné vyhřívat a izolovat od okolního prostředí kvůli možné kondenzaci par a nežádoucí korozi. Odvod těchto příměsí pak je dále realizován buď pneumaticky, nebo pomocí rotačního podavače [1,3].

3.2. Elektrické pole a korona

Elektrické pole se chová jako pole elektrostatické jen do té doby, než dosáhne velikosti hodnoty napětí nazvané kritické počáteční napětí U_{0k}. Pokud velikost napětí dále zvyšujeme nad hodnotu U_{0k}, překročí velikost intenzity elektrického pole mezní hodnotu, kterou označujeme počáteční intenzitou elektrického pole E_0, která zapříčiní vznik samostatného elektrického výboje.



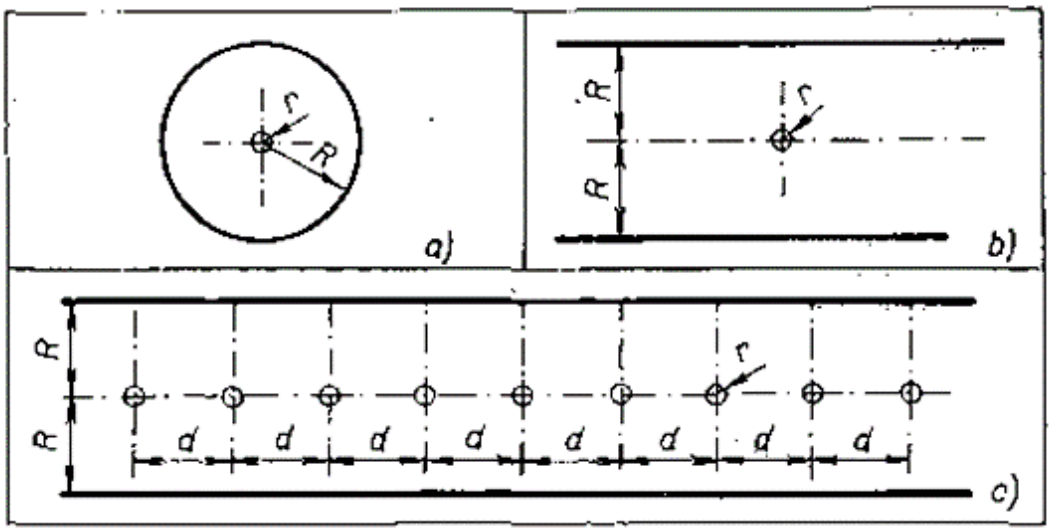
Obr. 3.12 Voltampérová charakteristika (převzato z [1])

V blízkosti povrchu vysokonapěťových elektrod a zejména na jejich hrotech dochází k nárazové ionizaci plynu, která se nazývá korona. Prakticky můžeme používat jak zápornou tak kladnou koronu (vysokonapěťové elektrody připojíme k zápornému či kladnému napětí), v praxi však mnohem častěji vyžíváme účinky korony záporné, která vlivem kladného prostorového náboje v blízkosti elektrod snižuje intenzitu elektrického pole a tím přispívá k vyšší elektrické pevnosti. V případech odlučování příměsí ze vzduchu se používá kladná korona z důvodu menší produkce ozonu oproti koroně záporné [1,3].

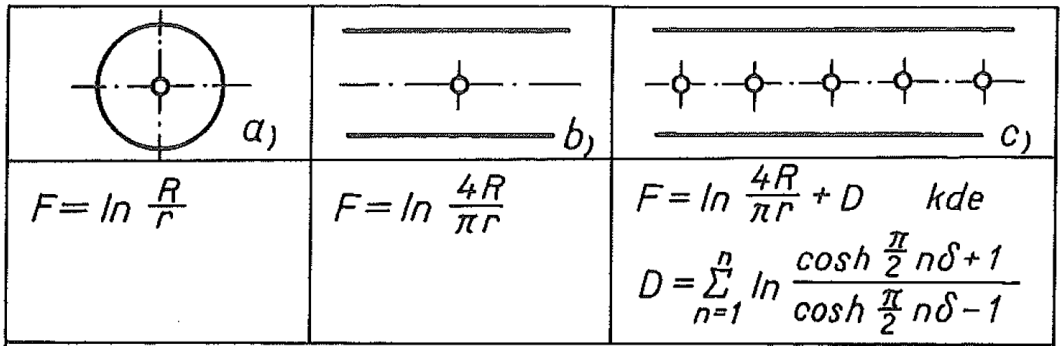
Intenzita elektrostatického pole ***E*** závisí na uspořádání elektrod a lze jej obecně zapsat vztahem

$$E = \frac{U}{x.\,ln(\frac{R}{r})} = \frac{U}{x.F} \tag{3.1}$$

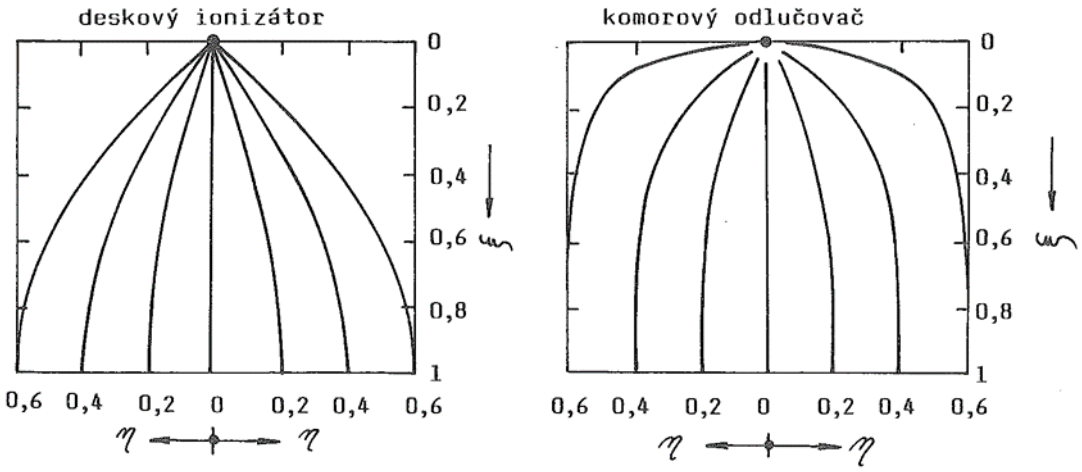
kde ***r*** je poloměr vysokonapěťové elektrody, ***R*** označujeme vzdálenost elektrod, ***F*** je označen činitel geometrického uspořádání elektrod, který je dán složitějšími vztahy, obsahujícími v bezrozměrných souřadnicích vzdálenost sledovaného bodu od osy vysokonapěťové elektrody a u komorového uspořádaní ještě tvar.



Obr. 3.13 – Idealizovaný systém elektrod odlučovačů a) trubkový, b) deskový, c) komorový (převzato z [1])



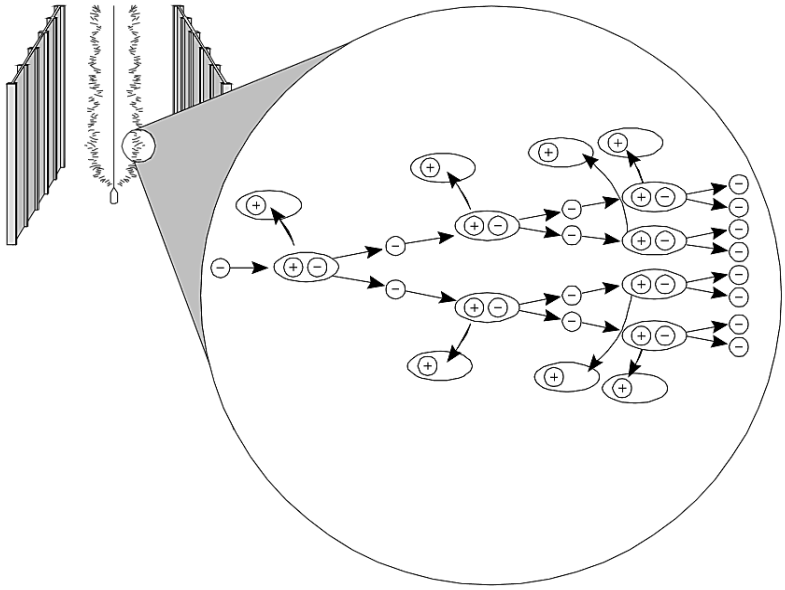
Obr. 3.14 Činitele geometrického uspořádání (převzato z [1])



Obr. 3.15 Průběhy elektrostatického pole ***E*** u deskového ionizátoru a komorového odlučovače (převzato z [1])

Ze srovnání je zřejmé, že uspořádání s více vysokonapěťovými elektrodami v soustavě způsobuje, že siločáry intenzity elektrického pole jsou ve velké části téměř rovnoběžné, tj. intenzita ***E*** je v těchto místech konstantní.

Překročí-li intenzita ***E*** určitou kritickou hodnotu E_{krit} , dochází v tomto místě k nárazové ionizaci plynu zvaném korónový výboj. Korónový výboj působí jako zdroj volných elektronů a kladných iontů. U většiny průmyslových elektrických odlučovačů bývají vysokonapěťové elektrody napájené napětím záporné polarity, mluvíme tedy v tomto případě o záporné koróně. Uvolněné elektrony se u záporné koróny pohybují působením elektrické sily po siločarách od vysokonapěťové elektrody. Protože elektrony, vzhledem ke své vysoké pohyblivosti, získávají vysokou rychlost a tím i vysokou kinetickou energii, narážejí do neutrálních molekul plynu a vyvolávají tím sekundární ionizaci. Dochází tak k lavinové nárazové ionizaci. V určité vzdálenosti od vysokonapěťové elektrody, kde poklesne intenzita, klesá i rychlost elektronů a ty difundují na neutrální molekuly plynu. Působením síly elektrického pole se pohybují kladné ionty zpět směrem k elektrodě. Od určité vzdálenosti od vysokonapěťové elektrody proudí směrem k usazovacím elektrodám pouze záporné ionty. Záporná koróna je tedy zdrojem záporných iontů [1,3].



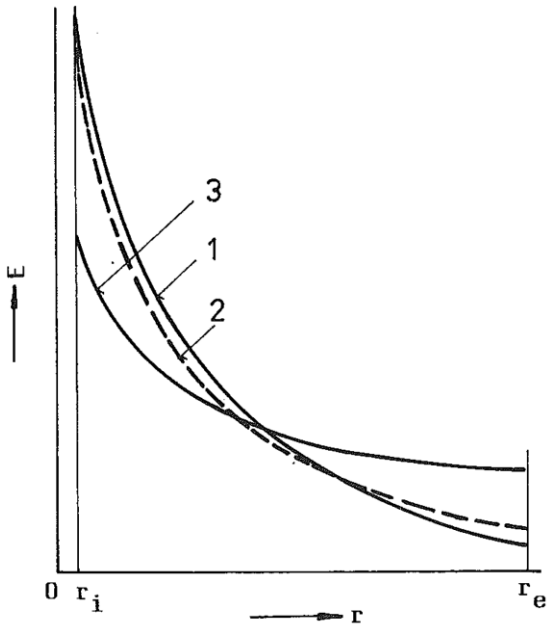
Obr. 3.16 Lavinová nárazová ionizace (převzato z [14])

U kladné koróny vznikají v místě překročení kritické intenzity E_{krit} kladné ionty a elektrony. Elektrony jsou přitahovány zpět ke kladné elektrodě. Kladné ionty jsou od elektrody odpuzovány a naráží do neutrálních molekul plynu a tím opět vyvolají lavinovou nárazovou ionizaci. Od určité vzdálenosti od elektrody proudí směrem k usazovacím elektrodám pouze kladné ionty. Kladná korona je tak zdrojem kladných iontů plynu.

Korónový výboj je charakterizován relativně malou proudovou hustotou. Zóna elektrického pole, kde dochází k nárazové ionizaci plynu, se nazývá ionizační oblast a je možno ji určit z podmínky $E > E_{krit}$. Je nutno provozovat odlučovač při napětí $U > U_{krit}$ a současně zajistit dostatečný rozdíl napětí U_p a U_{krit}. Proto se volí vysokonapěťové elektrody s malými hodnotami poloměru r_i, přičemž je zapotřebí respektovat jejich mechanickou pevnost.

Pokud se v určité soustavě elektrod přivádí na vysokonapěťové elektrody napětí $U < U_{krit}$, je $E_{max} < E_{krit}$ a elektrické pole je elektrostatické, korónový výboj nevzniká a mezi elektrodami neprochází proud. Přivedeme-li však na vysokonapěťové elektrody napětí $U > U_{krit}$, dojde ke korónovému výboji a vzniku iontu plynu. Průběh intenzity $E\ (r)$ v okamžiku vzniku koróny je vyjádřen na obr. 3.17 křivkou ***1***. Po určité době, kdy dojde k vytvoření prostorového náboje iontů, se počáteční závislost $E\ (r)$ poněkud změní, neboť prostorový náboj iontů vytváří své vlastní elektrické pole. Změněnou závislost $E\ (r)$ lze vyjádřit křivkou ***2***.

Nacházejí-li se v prostoru mezi elektrodami tuhé částice, získávají dříve uvedenými způsoby elektrický náboj a v prostoru tak vzniká i prostorový náboj od nabitých částic, který opět vytváří své vlastní elektrické pole. Vlivem prostorového náboje částic může dojít k výrazně změně závislosti ***E (r),*** kterou lze vyjádřit na obr. 3.17 křivkou ***3***. Charakteristickým znakem je pokles intenzity na povrchu vysokonapěťové elektrody E_r a vzrůst intenzity v blízkosti usazovací elektrody ***E***. Při vyšší koncentraci částic může dojit ke stavu, kdy již není splněna podmínka E_{ri} a dojde k potlačení korony. Se zvyšováním koncentrace částic se proto zvyšuje i hodnota kritického napětí U_{krit} .



Obr. 3.17 Průběh závislostí ***E(r):*** *1*-okamžik vzniku korony, *2*-po určité době vlivem prostorového náboje, *3*-s částicemi příměsi (převzato z [1])

Je potřeba také poznamenat, že ne všechny plyny lze ionizovat. Složky plynu se dělí na elektropozitivní a elektronegativní. Elektropozitivní plyny mají vhodnou strukturu elektronového obalu atomu a jsou schopné vytvářet volný elektron a kladný iont. Naproti tomu elektronegativní plyny jdou těžko ionizovat, ale snadno tvoří spolu s volnými elektrony negativní ionty. Protože většina průmyslových elektrických odlučovačů pracuje se zápornou koronou, musí být v nosném plynu zaručen určitý minimální obsah některých z elektronegativních plynů. Pořadí důležitosti těchto plynů u odpadních plynů ze spalovacích procesů je SO_2, O_2, H_2O a CO_2, přičemž minimální obsahy se uvádějí 0,5 až 1% SO_2 , 2 až 3% O_2 , 5% H_2O. Pokud se týká CO_2, jeho obsah může byt zanedbatelný, jestliže je v odpadním plynu přítomen v požadovaném množství některý z ostatních uvedených plynu. [1,3,4,5]

4. Měření

Měření bylo realizováno v laboratoři vysokých napětí na katedře elektroenergetiky FEL-ČVUT v Praze. Úkolem měření bylo ověřit elektrickou pevnost soustavy se zvonovým nosným izolátorem vysokonapěťového systému používaný v elektrostatických odlučovačích jako průchod táhla oklepů vysokonapěťových elektrod a také jako přívod vysokého napětí (jako např. na obr. 3.10) ve dvou různých provedeních. Zároveň bylo provedeno měření elektrické pevnosti při instalaci clonící a ochranné trubky. Katalogový list izolátorů je uveden v příloze. Přívodní tyčová elektroda modelu elektrostatického odlučovače, která ve skutečném odlučovači je použita jako táhlo oklepů vysokonapěťových elektrod a také jako přívod vysokonapěťového systému, byla napájena z regulovaného zdroje stejnosměrného napětí záporné polarity, ostatní konstrukční části byly v průběhu napěťových testů uzemněny. Vnitřní rám s elektrodami byl při měření odstraněn. Přeskokové napětí bylo zjišťováno pro následující konfigurace vstupní průchodky:

- zkouška č. 1 – izolátor typ M4597 s clonící trubkou
- zkouška č. 2 – izolátor typ M4597 s clonící a ochrannou trubkou
- zkouška č. 3 – izolátor typ M4597 bez clonící a ochranné trubky
- zkouška č. 4 – izolátor typ M4597 s ochrannou trubkou, bez clonící trubky
- zkouška č. 5 – izolátor typu M470905 bez clonící a ochranné trubky
- zkouška č. 6 – izolátor typu M470905 s ochrannou trubkou, bez clonící trubky

4.1. Použité přístroje

Přeskokové napětí bylo měřeno pomocí stejnosměrného děliče HIGH VOLT GMR 500/270 a voltmetru HIGH VOLT MU 17 při atmosférických podmínkách: t = 25 °C, p = 992 hPa. Katalogové listy děliče a voltmetru jsou součástí příloh.

4.2. Postup a naměřené hodnoty

Měření bylo prováděno tak, že se plynule zvyšovalo napětí na stejnosměrném zdroji až do okamžiku přeskoku. Pro každou konfiguraci bylo provedeno vždy deset měření. Hodnoty měření jsou uvedeny v následující tabulce. Všechny hodnoty změřeného přeskokového napětí v tabulce jsou v kV.

		Zkouška č.					
		1.	2.	3.	4.	5.	6.
Měření č.	1.	163	160	162	140	172	110
	2.	157	170	157	133	169	114
	3.	170	175	158	127	171	115
	4.	172	172	162	134	177	115
	5.	158	165	162	132	171	115
	6.	161	159	156	133	173	129
	7.	158	175	159	134	166	129
	8.	164	172	160	131	167	120
	9.	159	165	156	137	166	129
	10.	158	160	166	135	164	129

Tab. 1 Naměřené hodnoty

4.2.1. Nejistoty měření

Nejistoty můžeme podle způsobu vyhodnocování rozdělit na nejistoty typu A, nejistoty typu B a kombinovanou nejistotu, která vznikne sloučením předešlých nejistot. Nejistoty typu A jsou získávány statistickými metodami z naměřených hodnot, příčiny těchto nejistot nejsou známé a s počtem měření jejich hodnoty klesají. Nejistoty typu B souvisí se známými nebo identifikovatelnými zdroji, jako například třída přesnosti použitých měřících přístrojů apod. a jejich hodnoty nejsou vázané počtem měření. Kombinovaná nejistota slučuje předcházející nejistoty.

U nejistoty typu A je vhodné provést alespoň deset měření, abychom mohli počítat bez korekčního činitele vzorce uvedeného níže, což jsme v našem případě splnili pro každou konfiguraci. Nejprve spočítáme aritmetický průměr ze vzorce

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \tag{5.1}$$

pro každou konfiguraci, kde $\boldsymbol{n}$ je počet měření a $\boldsymbol{x_i}$ je naměřená hodnota. Poté můžeme spočítat nejistotu pro každou z nich. Použijeme vzorec ve tvaru

$$u_A(x) = \sqrt{\frac{1}{n.(n-1)}\sum_{i=1}^{n} \Delta x_i^2} \tag{5.2}$$

kde $\boldsymbol{n}$ je počet měření a výraz $\Delta\boldsymbol{x_i}$ je rozdíl naměřené hodnoty a hodnoty aritmetického průměru.

Nejistotu typu B určíme ze všech možných zdrojů nejistot (měřicí přístroje, etalony apod., v našem případě voltmetr a odporový dělič), provedeme odhad maximální rozsah odchylek od správné hodnoty $\pm z_{jmax}$, aby jeho překročení bylo nepravděpodobné. Odhadneme, jakému rozdělení pravděpodobnosti odpovídají odchylky Δz_j z intervalu $\langle -z_{jmax}, +z_{jmax} \rangle$. Pokud si nejsme jisti, jaké rozdělení máme použít, použijeme rovnoměrné rozdělení. Pro každý zdroj nejistoty typu B pak dostaneme vzorec

$$u_{jx} = \frac{\Delta z_{jmax}}{m} \tag{5.3}$$

kde $\boldsymbol{m}$ je koeficient pro rozdělení, pro rovnoměrné rozdělení je $\boldsymbol{m} = \sqrt{3}$.

Celková nejistota typu B je pak dána vzorcem

$$u_B(x) = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} u_{jx}^2} \tag{5.4}$$

Kombinovaná nejistota je geometrickým součtem obou předcházejících nejistot a spočítáme jí podle vzorce

$$u = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} \tag{5.5}$$

Nyní můžeme spočítat jednotlivé nejistoty pro každé měření. Nejdříve spočítáme nejistoty typu A ze vzorce 5.2. Aritmetické průměry pro jednotlivé zkoušky jsme spočítali podle vzorce 5.1, výsledek pro první zkoušku bude

$$u_{A1} = \sqrt{\frac{1}{10.(10-1)}.(1^2+5^2+8^2+10^2+4^2+1^2+4^2+2^2+3^2+4^2)} = 1{,}7kV$$

Stejně postupujeme s výpočtem u každé zkoušky. Dále určíme nejistotu typu B. Přímo v katalogových listech voltmetru a odporové děliče můžeme odečíst rozsahy odchylek, spočítáme dílčí nejistoty typu B ze vzorce 5.3 a celkovou nejistotu B dle vzorce 5.4

$$u_{1x} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0{,}58\% \ , \ u_{2x} = \frac{4}{\sqrt{3}} = 2{,}31\%$$

$$u_B = \sqrt{u_{1x}^2 + u_{2x}^2} = 2{,}38\%$$

Poté můžeme spočítat kombinovanou nejistotu z nejistot typu A a B dle vzorce 5.5

$$u_1 = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = \sqrt{1{,}7^2 + 4{,}8^2} = 5{,}2kV$$

Celkové výsledky jsou uvedené v následující tabulce

	Zkouška č.					
	1.	**2.**	**3.**	**4.**	**5.**	**6.**
Průměr	162	167	160	134	170	121
$\boldsymbol{u_A}$	1,7	2,0	1,0	1,1	1,2	2,4
$\boldsymbol{u_b}$	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
$\boldsymbol{u}$	5,0	5,2	4,9	4,9	4,9	5,3

Tab. 2 Průměrné hodnoty a nejistoty měření

4.3. Výsledky měření

Z provedených měření přeskokových napětí výše uvedených konfigurací vysokonapěťového izolátoru elektrického odlučovače jsme určili jako elektricky nejpevnější konfigurace při zkoušce č. 2 a zkoušce č. 5, kdy bylo zjištěno přeskokové napětí (167 ± 6) kV v případě izolátoru typu M4597 a (170 ± 5) kV v případě izolátoru M470905. Nejmenšího přeskokového napětí bylo dosaženo při konfiguraci zkouška č. 6 a to hodnoty (121 ± 6) kV.

5. Výpočet elektrického pole numerickými metodami

Elementární metody výpočtu elektrického pole pro základní modely, jako je koule nebo válec, jsou matematicky jednoduché. Výpočty elektrického pole u složitějších tvarů, jako jsou např. tvary elektrod, jsou analyticky řešitelné jen poměrně složitě pomocí diferenciálních a integrálních rovnic a v řadě případů prakticky nemožné. S rozvojem výpočetní techniky je numerické řešení elektrického pole pomocí vhodného software snadné. Mezi numerické metody, které se používají k řešení elektrických polí, patří i metoda konečných prvků (Finite Element Method, FEM). Tato metoda je založená na řešení okrajových podmínek popsaných diferenciálními rovnicemi. Stejně jako ostatní metody numerického řešení polí i tato metoda rozděluje celý výpočet na dílčí kroky. V prvním kroku je zadaná geometrie popisující tvar a rozměry, která se rozdělí na elementární rovinné prvky, jako jsou trojúhelník, čtyřúhelník, prostorové prvky pak čtyřstěn, pětistěn apod. Tímto rozdělením vzniknou uzly a neznámé uzlové potenciály ve vrcholech elementárních prvků. Tyto prvky mohou být rozmístěné nerovnoměrně a tím sledovat tvar. V druhém kroku se aproximuje hledaná veličina a sestaví soustava rovnic pro neznámé uzlové potenciály a ty se vyřeší. V posledním kroku se z vypočítaných uzlových potenciálů vypočítá potenciál na jednotlivých elementech a intenzita.
Požadovaný software existuje jak v placených verzí, tak verzí zdarma [2,4].

5.1. Přehled dostupného software

Programy využívané pro modelování elektrických polí musí splňovat několik základních předpokladů. V první řadě bychom měli být schopni v programu nakreslit model, ať už se jedná o plně prostorový model ve 3D nebo jen plošný ve 2D, popřípadě by měl mít funkci exportu z běžně používaných formátů výkresů, další krok je zadání za pomocí definice počátečních podmínek, jako je například volba materiálů a jejich elektrických vlastností, velikost přivedeného napětí a podobně, takto označená funkce programu se nazývá preprocesor. Druhý předpoklad je rozdělení řešeného problému na trojúhelníkovou síť a diskretizaci geometrie, tato funkce programu se nazývá procesor.

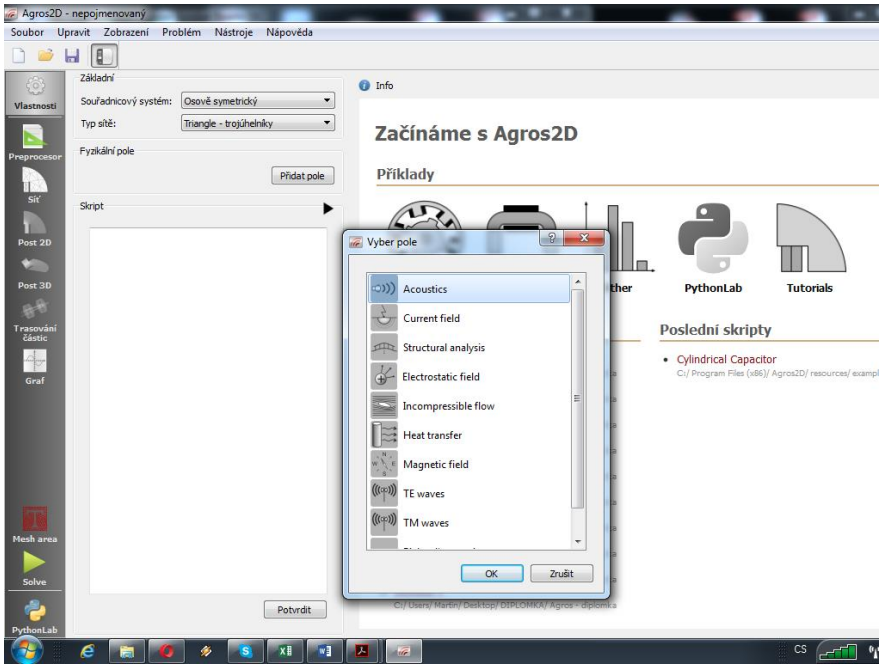
Poslední funkcí řeší příslušné elektrické pole a jeho rozložení v zadané soustavě, provádí analýzu vypočtených dat a má na svědomí jejich vhodnou prezentaci, takto označená funkce programu se nazývá postprocesor.
Těmto požadavkům vyhovují programy, jako jsou Ansys, Comsol Multiphysics, FEMM, Quickfield a v poslední řadě Agros2D. Všechny tyto programy mají všechny tyto funkce, navíc některé tyto programy umožňují řešení polí magnetických, tepelných, akustických, mechanického namáhání, ale také i řešení problémů kombinující jednotlivá pole. Umožňují také analýzu ustáleného stavu, harmonickou analýzu a analýzu přechodných dějů.

5.2. Model zkoušek izolátorů pomocí software Agros 2D

Pro svou práci jsem se rozhodl použít program Agros 2D, který je volně ke stažení. Tento program splňuje všechny předpoklady pro řešení elektrického pole. Umožňuje nakreslit model, lze exportovat výkresy CAD z formátů dxf, zadávat jednotlivá napětí a zobrazit výsledky graficky i numericky.

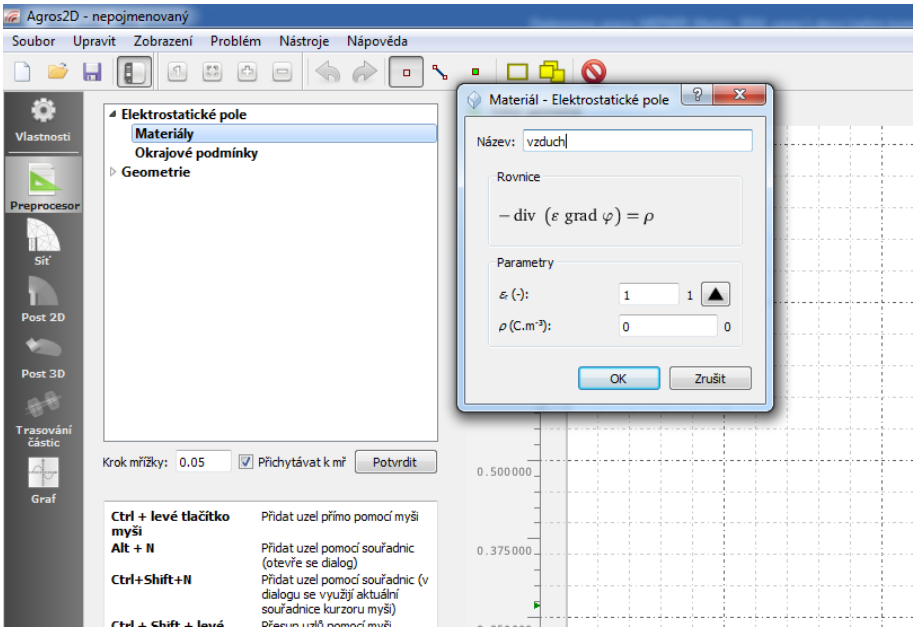
5.3. Příprava modelů

V úvodní části je potřebná příprava modelu, ať už jej nakreslíme v nějakém CAD programu a následně exportujeme, nebo přímo nakreslíme v programu Agros 2D. Výhodou je, že při kreslení do programu Agros 2D můžeme rovnou definovat jednotlivé spojnice, jejich potenciál či rozložení napětí.
V prvním kroku zadáme typ souřadnicového systému, zvolit můžeme buď kartézský souřadnicový systém, nebo osově symetrický. Protože daný izolátor, táhlo procházející izolátorem, jako i ochranná a clonící trubka je rotačního tvaru, zvolíme osově symetrický systém. Dalším krokem je určit typ fyzikálního pole, které má program řešit. Program nabízí výběr z polí elektrostatického, magnetického, elektrického proudového, tepelného, dále elektromagnetické vlnění, mechanika a nestlačitelné proudění. Pro náš případ zvolíme pole elektrostatické.



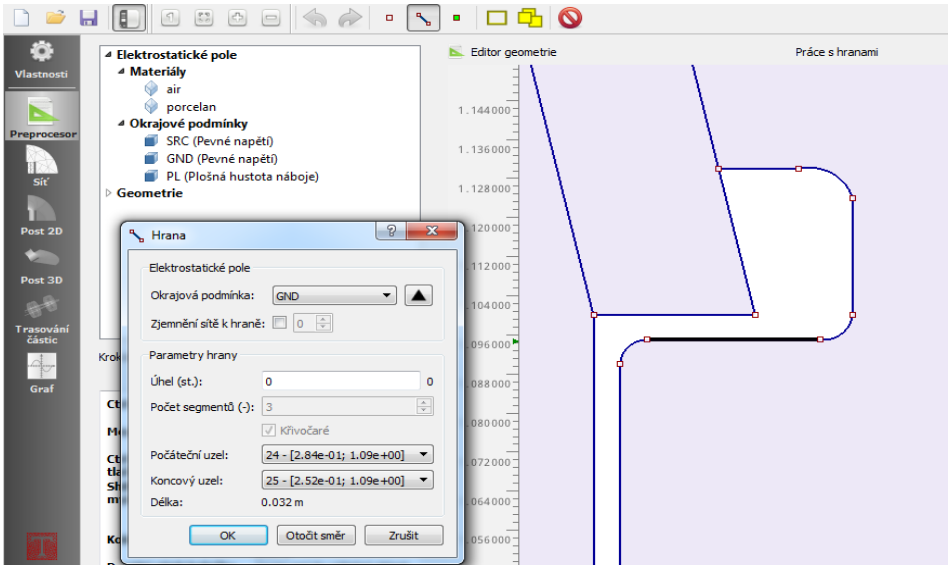
Obr. 6.1 Volba fyzikálního pole

Dalším krokem je zadání elektrických vlastností materiálů, okrajové podmínky, v našem případě použijeme dva materiály, vzduch a porcelán, a jejich relativní permitivity. U porcelánu jsem zvolil relativní permitivitu $\varepsilon_r = 6{,}5$, u vzduchu $\varepsilon_r = 1$. Okrajové podmínky zadáváme celkem tři, první bude záporné napětí, druhé je uzemnění a třetí bude plošné rozložení náboje. Abychom mohli porovnat jednotlivé konfigurace s měřením, zadáme jednotné záporné napětí 100 kV pro všechny konfigurace.



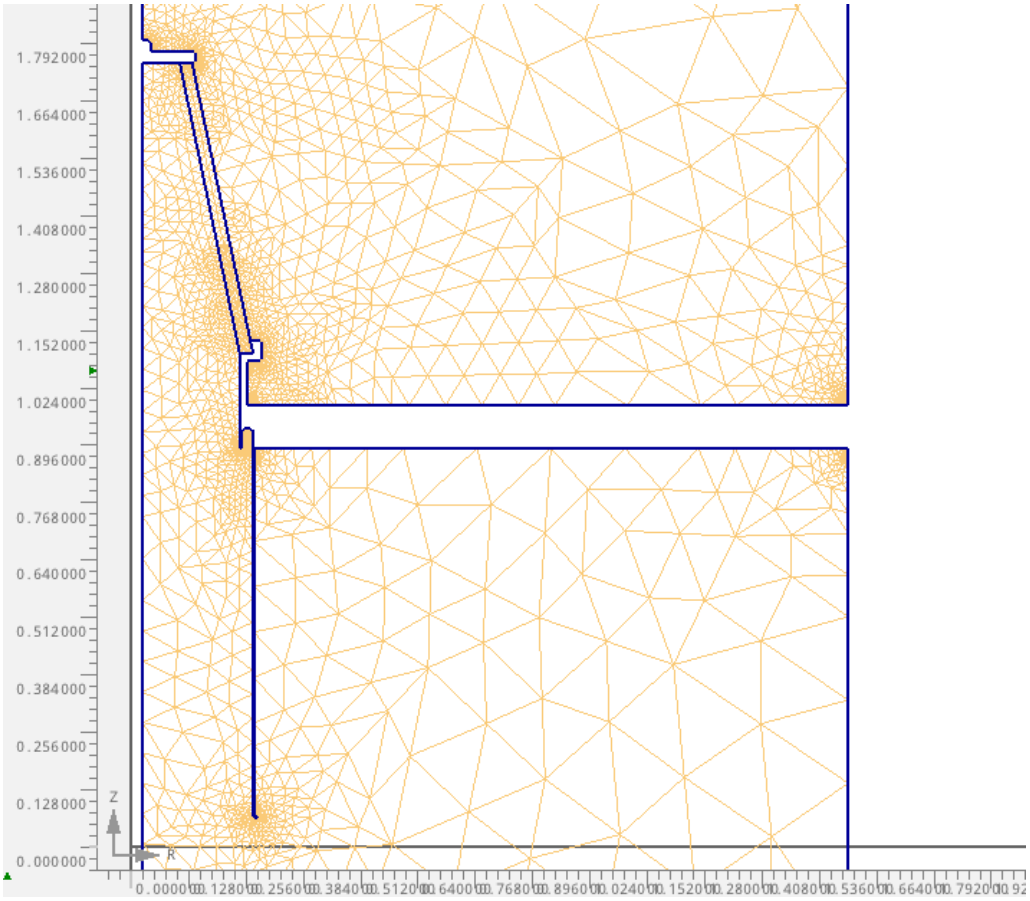
Obr. 6.2 Definice materiálů

Nyní můžeme pokračovat v kreslení modelu. Při exportu z výkresu CAD se nám automaticky převede na soustavu uzlů a úseček pojmenovaných v programu hrany. Program samozřejmě umožňuje kreslení požadovaného modelu. Prvním krokem kreslení modelu je definování koncových uzlů, následně tyto uzly spojuji hranami a definuji okrajovou podmínku každé hrany. Máme na výběr z pevného napětí a plošného rozdělení náboje. Následně umístím značky materiálu izolátoru a okolí.



Obr. 6.3 Definice okrajové podmínky hrany

Následujícím krokem je generování elementární trojúhelníkové nebo čtyřúhelníkové sítě programem, které v případě chybějící definice materiálu, prostředí nebo okrajových podmínek všech úseček, skončí chybovým hlášením. V místech, kde program předpokládá větší složitost řešení, generovaná síť je složená z většího počtu trojúhelníků. Na obr. 6.4 je toto patrné zejména u patky izolátoru a „čepičky“.

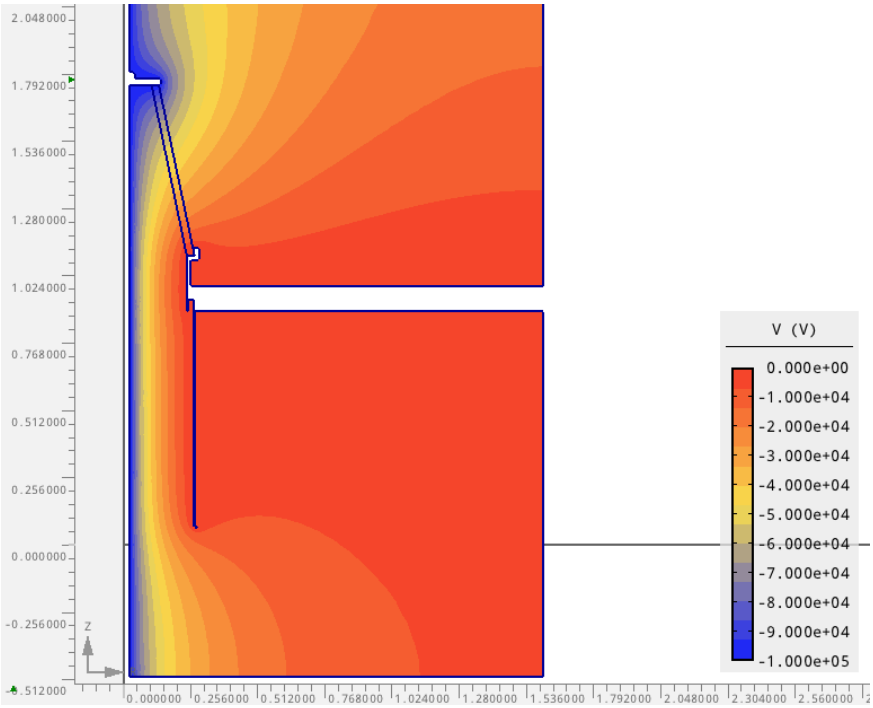


Obr. 6.4 Trojúhelníková síť

5.4. Výsledky simulace a porovnání s měřením

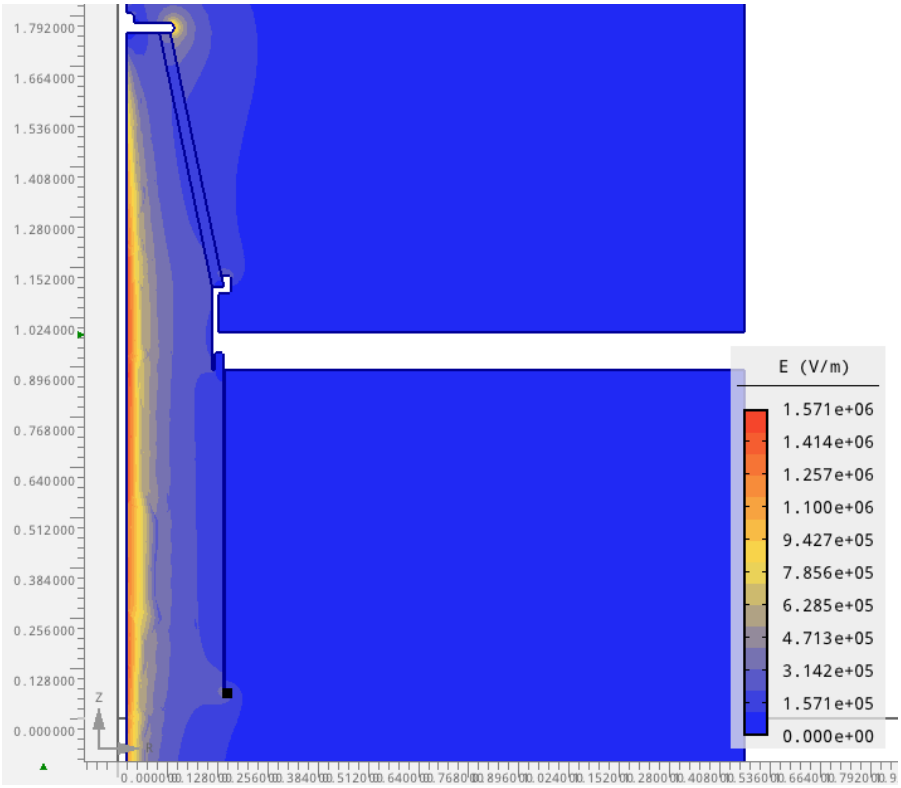
Nyní máme připravené modely, definované okrajové podmínky a materiály, tudíž můžeme přistoupit k simulaci jednotlivých zkoušek.

U zkoušky č. 1 byl testován izolátor typ M4597 a byla instalována pouze clonící trubka.



Obr. 6.5 Rozložení potenciálu zkoušky č. 1

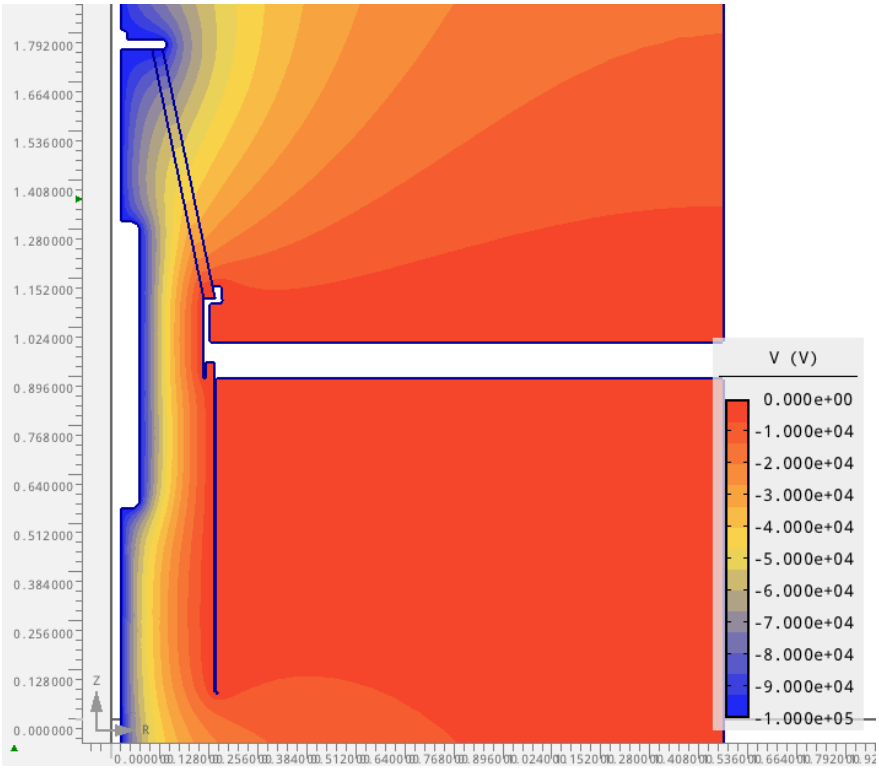
Na obrázku 6.5 je patrné rozložení potenciálu, kde modrou barvou je napájecí napětí -100kV a červená odpovídá uzemnění. Takovéto zobrazení ve smyslu použitých barev a hodnot napětí je použito na všech obrázcích s rozložením potenciálu.



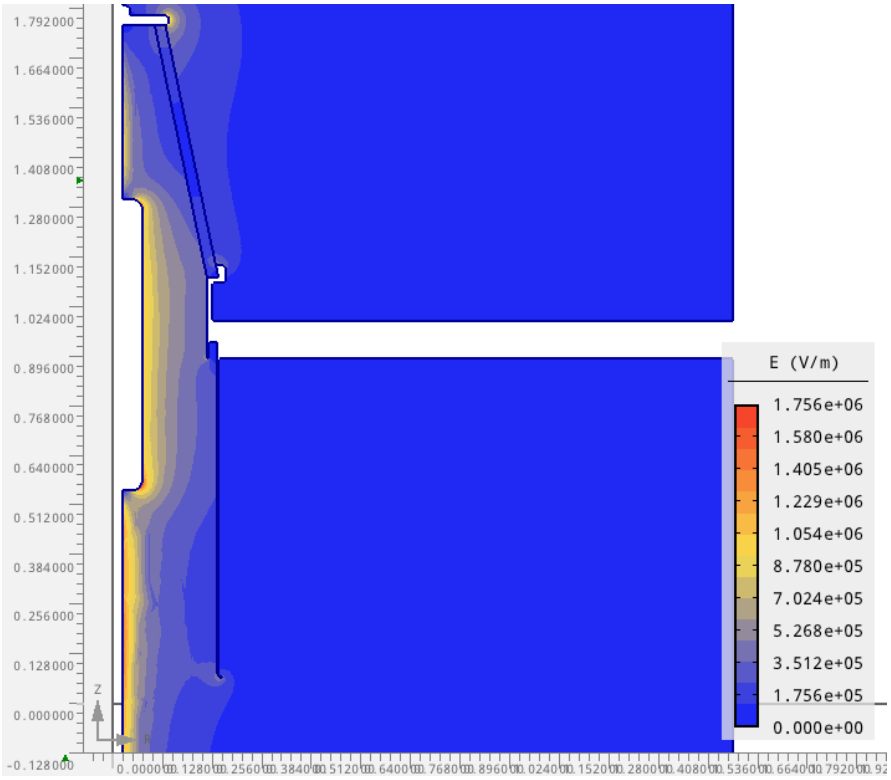
Obr. 6.6 Rozložení intenzity zkoušky č.1

Na obrázku 6.6 je patrné rozložení intenzity elektrického pole, jehož maximální hodnota je 1,571 MV.m^{-1}, největší intenzitu dosahujeme táhla v úrovni patky izolátoru, vysoká intenzita je u „čepičky“ izolátoru. Hodnotu maximální intenzity elektrického pole je potřeba z hlediska elektrické pevnosti snížit co možná nejníže.

U další simulace zkoušky č. 2 byl testován opět izolátor typ M4597 a byla instalována jak ochranná, tak trubka clonící.



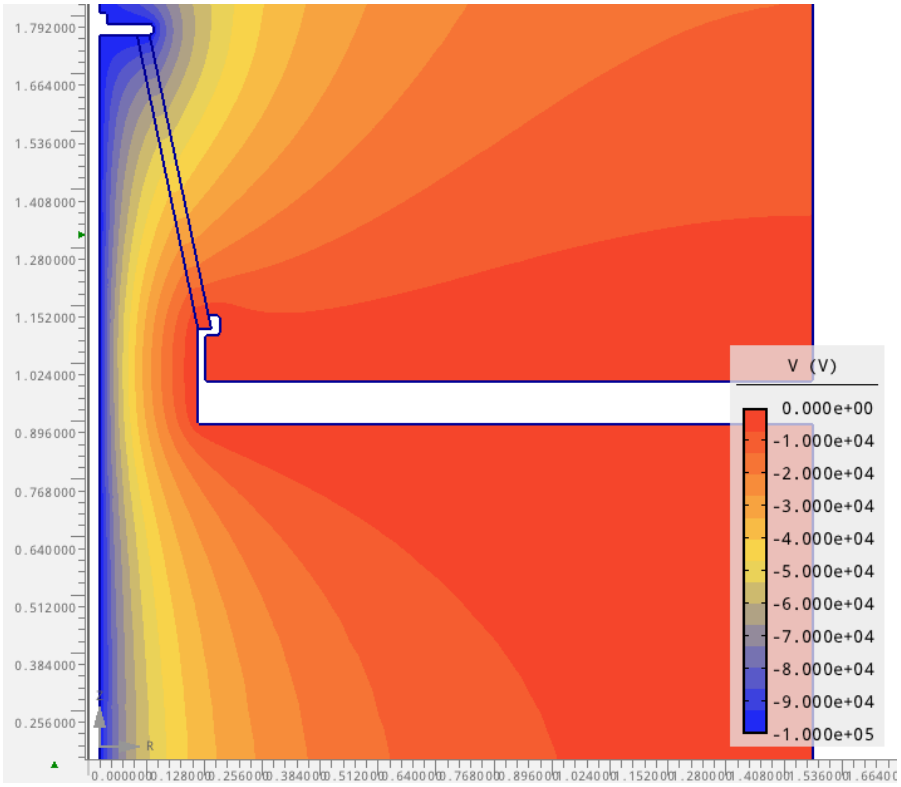
Obr. 6.7 Rozložení potenciálu zkoušky č. 2



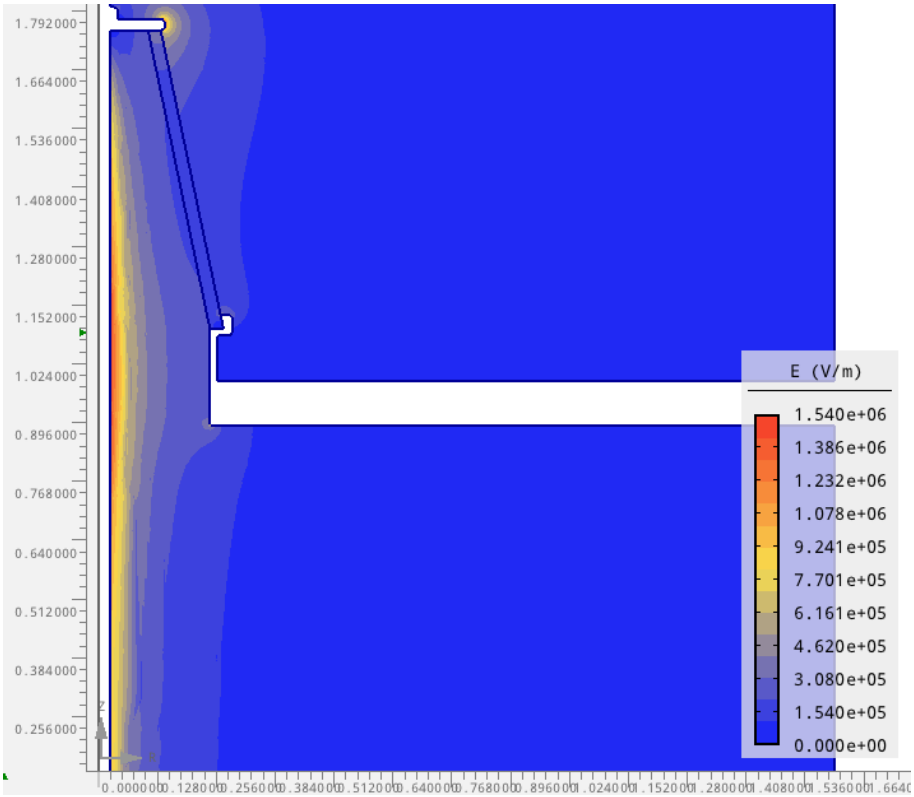
Obr. 6.8 Rozložení intenzity zkoušky č.2

Na obrázku 6.8 pozorujme změny oproti zkoušce č. 1 v rozložení intenzity elektrického pole, jehož maximální hodnota je 1,756 $MV.m^{-1}$, nejvyšší intenzity dosahujeme u ochranné trubky v zaoblených hranách, dále je patrná vysoká hodnota intenzity u „čepičky“ izolátoru. V případě, že by tyto hrany byly ostré, velikost intenzity by byla o mnoho vyšší.

Další simulace zkoušky č. 3 byl testován izolátor typ M4597 a ochranná a clonící trubka nebyla instalována.

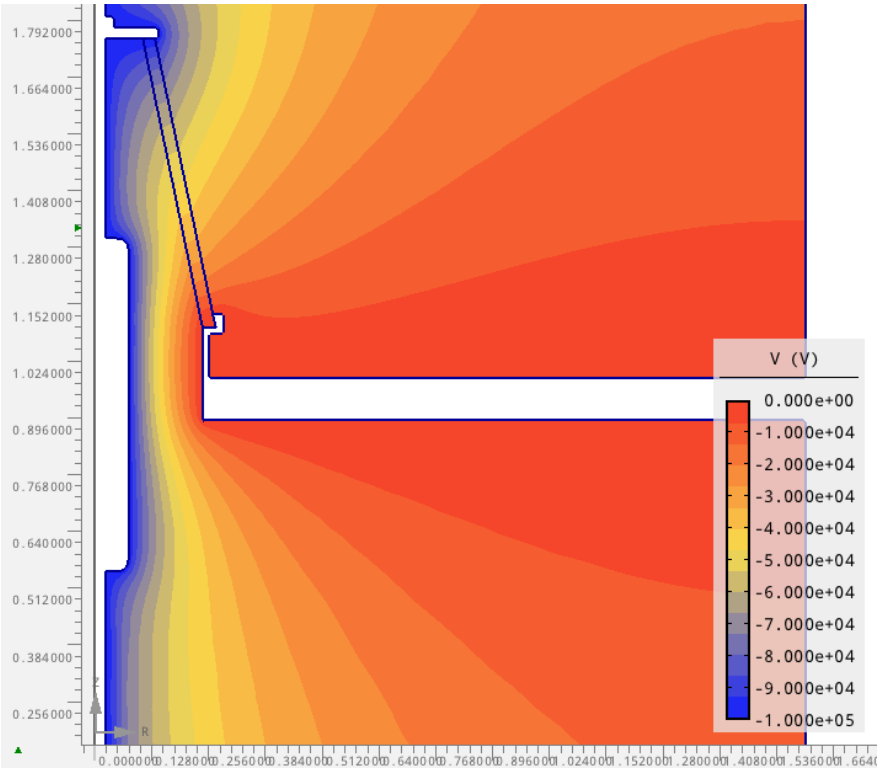


Obr. 6.9 Rozložení potenciálu zkoušky č. 3

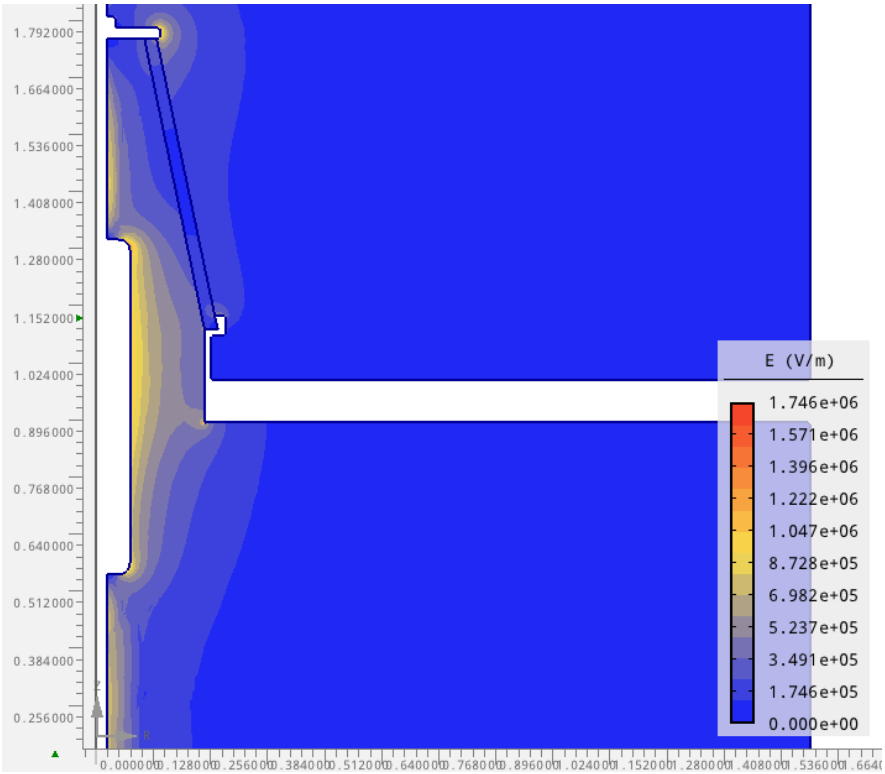


Obr. 6.10 Rozložení intenzity zkoušky č. 3

U simulace zkoušky č. 3 byla nejvyšší intenzita elektrického pole opět na táhlu v úrovni patky izolátoru a u „čepičky“ izolátoru. Nejvyšší hodnota této intenzity měla hodnotu 1,540 $MV.m^{-1}$. Poslední simulace izolátoru typu M4597 byla zkouška č. 4, u které byla instalována pouze ochranná trubka.



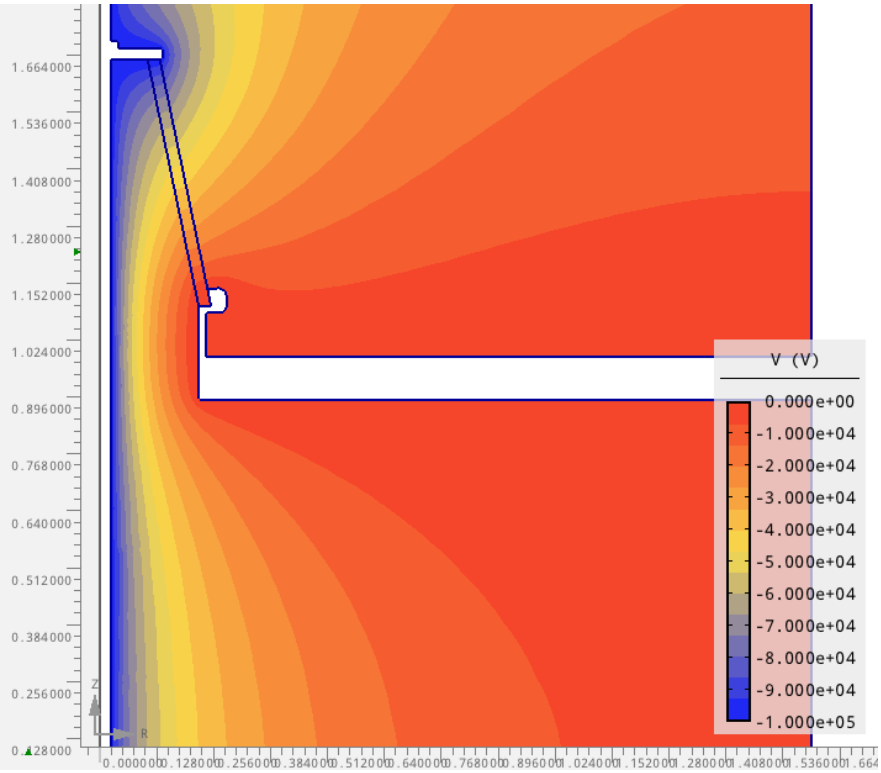
Obr. 6.11 Rozložení potenciálu zkoušky č. 4



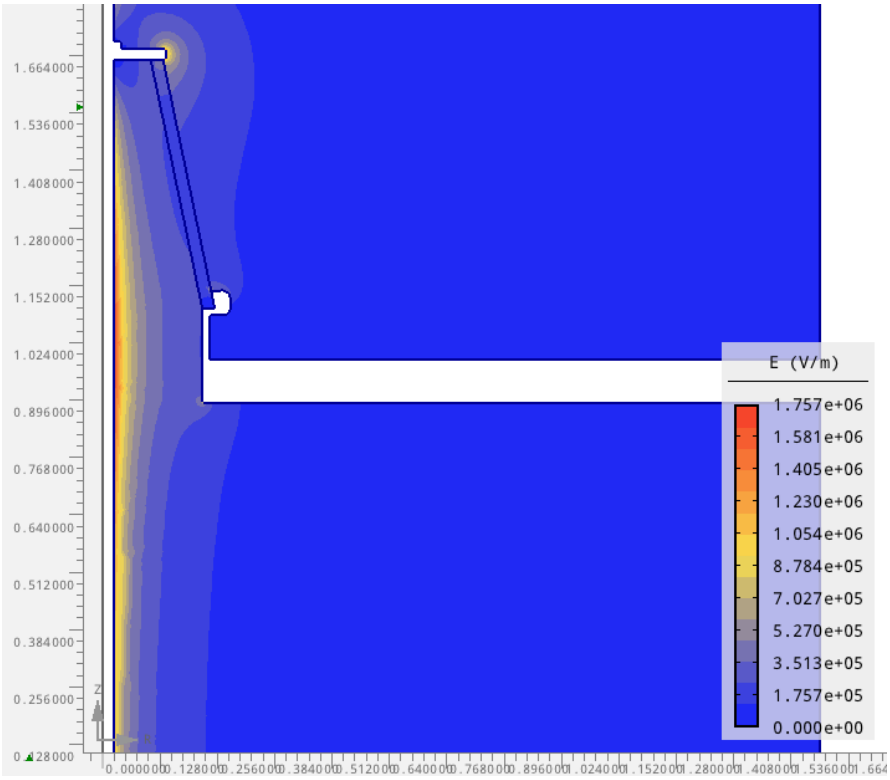
Obr. 6.12 Rozložení intenzity zkoušky č. 4

Zkouška č. 4 měla nejvyšší intenzitu u „čepičky“ a na táhle v úrovni patky izolátoru. Nejvyšší hodnota intenzity byla v tomto případě 1,746 $MV.m^{-1}$.

Další dvě simulace proběhly na izolátoru typu M470905. První zkouška na tomto typu izolátoru byla označena č. 5. V této zkoušce nebyla instalována ochranná či clonící.

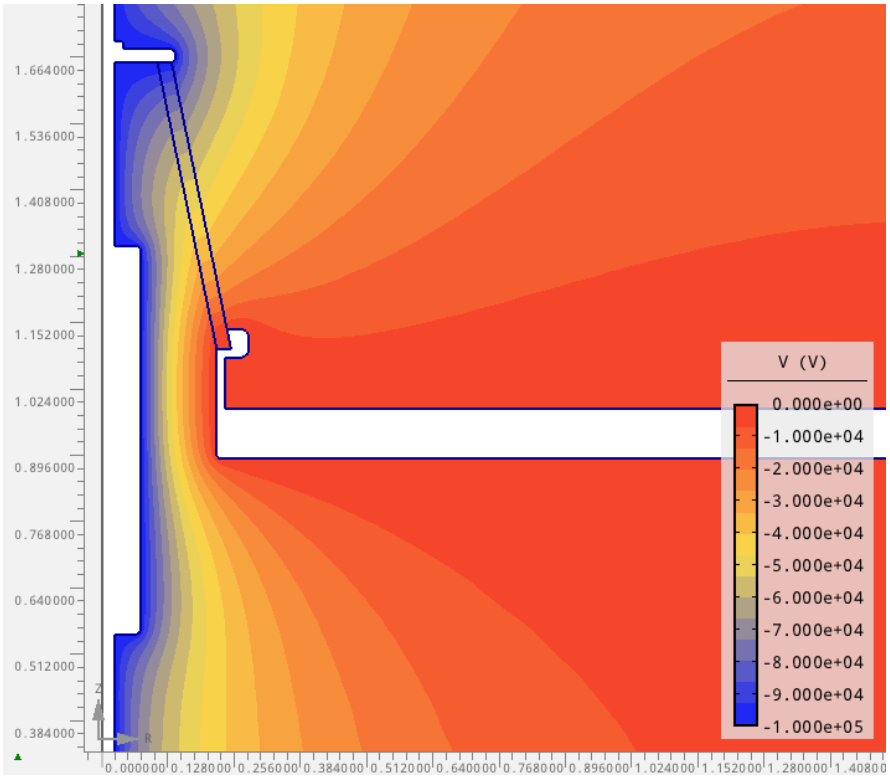


Obr. 6.13 Rozložení potenciálu zkoušky č. 5

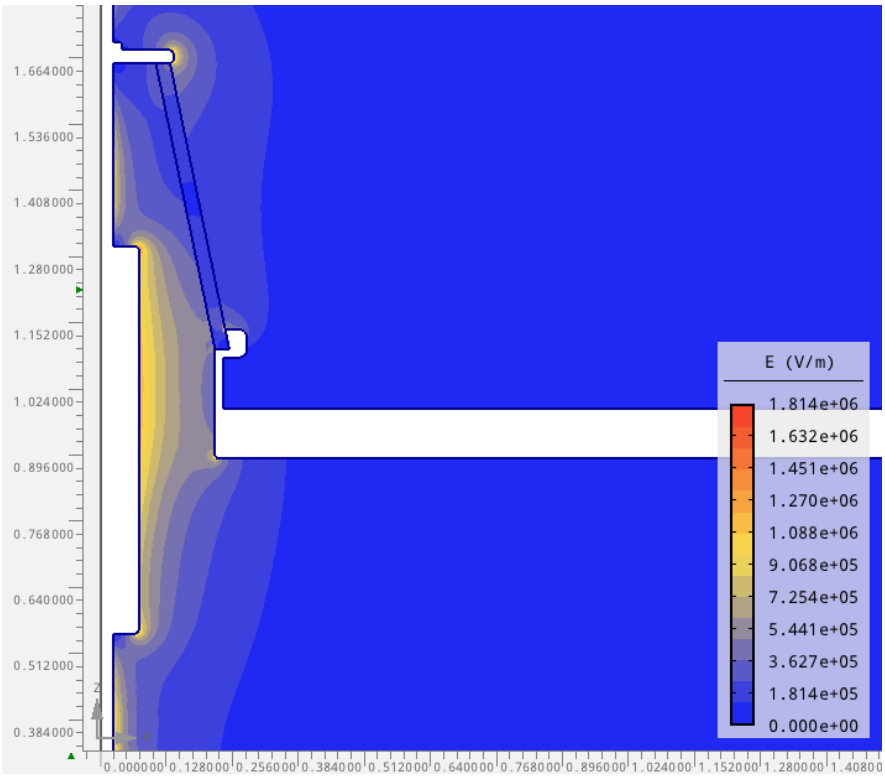


Obr. 6.14 Rozložení intenzity zkoušky č. 5

Jak je patrné z obrázku 6.14 i u této konfigurace je nejvyšší hodnota intenzity na táhle v úrovni patky izolátoru a u „čepičky“ izolátoru. Nejvyšší hodnota intenzity pak byla 1,757 $MV.m^{-1}$. Poslední simulací byla zkoušky č. 6 s izolátorem typu M470905. Zde byla instalována ochranná trubka na táhlu.



Obr. 6.15 Rozložení potenciálu zkoušky č. 6



Obr. 6.16 Rozložení intenzity zkoušky č. 6

V této poslední simulaci zkoušky č. 6 je zřejmé, že velikost elektrické intenzity je také nejvyšší u ochranné trubky v úrovni patky izolátoru, dále na hranch ochranné trubky a u „čepičky“ izolátoru. Její nejvyšší hodnota byla 1,814 $MV.m^{-1}$.
Všechny tyto simulace a jejich výsledky jsou shrnuty n následující tabulce. Pro porovnání je zde prezentováno průměrné přeskokové napětí u každé zkoušky.

	Zkouška č.					
	1.	2.	3.	4.	5.	6.
Průměrná hodnota přeskok. napětí [kV]	162	167	160	134	170	121
Max. el. intenzita [$MV.m^{-1}$]	1,571	1,756	1,540	1,746	1,757	1,814

Tabulka č. 3 Porovnání výsledků simulací s přeskokovým napětím

Jak je z tabulky patrné, při simulaci v případě izolátoru typu M4597 se prokazuje konfigurace u zkoušky č. 3 elektricky nejpevnější. U izolátoru typu M470905 se projevuje elektricky nejpevnější zkouška č. 5, naopak nejméně elektricky pevná ze všech provedených měření a simulací je u zkoušky č. 6.

6. Závěr

V první části byly popsány obecně důvody a základní principy odlučování. Podstatný důvod je samozřejmě ochrana životního prostředí a zmírnění dopadů na něj co možná největším odloučením příměsí, zejména popílku, které je produkováno při spalováním uhlí v elektrárenských provozech. Popsány byly jak suché a mokré mechanické, tak textilní a elektrické odlučovače.
V druhé kapitole byl podrobněji popsán zejména komorový horizontální elektrický odlučovač, který je v energetice používán nejčastěji. Popis se zaměřil na konstrukci nejdůležitějších částí elektrického odlučovače a jejich funkcemi. Také byl popsán vznik elektrického pole a koróny jakožto stěžejního principu elektrického odlučovače.
Ve třetí kapitole bylo popsáno experimentální měření, které proběhlo v laboratoři vysokého napětí katedry elektroenergetiky. Tímto měřením byla ověřena elektrická pevnost různých konfigurací zvonového izolátoru. Elektricky nejpevnější byla konfigurace s izolátorem typu M4597 při zkoušce č. 2 s ochrannou a clonící trubkou, kdy bylo dosaženo velikosti přeskokového napětí (167 ± 6) kV, s izolátorem typu M470905 pak bylo dosaženo velikosti přeskokového napětí (170 ± 5) kV v konfiguraci bez ochranné a clonící trubky u zkoušky č. 5. Naopak nejmenší velikost přeskokového napětí bylo naměřeno v konfiguraci ys ochrannou trubkou u zkoušky č. 6 s izolátorem typu M470905, a to (121 ± 6) kV.
V poslední části byl přiblížen dostupný software pro modelování a simulace elektrických polí. Samozřejmě tento zmiňovaný software je možné používat i k simulacím ostatních polí, jako je magnetické, tepelné a podobně, a kombinací těchto polí. Dále byla popsána tvorba modelu a simulace namáháním pevně daným napětím v programu Agros 2D, jehož velikost byla zvolena -100 kV. Nastíněna byla tvorba konkrétních modelů, definování materiálů a napětí. V závěru této části byly porovnány naměřené hodnoty přeskokových napětí naměřených u jednotlivých konfigurací a výsledné simulace napěťového namáhání. Bylo dosaženo shody u nejméně elektricky pevné konfigurace, a to u zkoušky č. 6, kdy bylo dosaženo intenzity 1,814 $MV.m^{-1}$. Naopak elektricky nejpevnější konfigurace nám vyšla z měření zkoušky č. 2 u typu M4597, kdežto simulací vyšla nejpevnější konfigurace u zkoušky č. 3, kdy bylo dosaženo maximální intenzity 1,540 $MV.m^{-1}$. Toto může způsobeno nepřesnostmi v měření napětí a také nepřesnostmi v měření rozměrů modelu. Zadání diplomové práce se mi podařilo naplnit.

Seznam použité literatury:

[1] BÖHM, Jaroslav. *Elektrické odlučovače*. Praha, SNTL, 1977

[2] DĚDKOVÁ, J.; KŘÍŽ, T.: *Modelování elektromagnetických polí.* Brno, Entity Production, s.r.o., 2012

[3] HEMERKA, Jiří: Odlučování *tuhých částic.* Praha, ČVUT 1994

[4] KUFFEL J., KUFFEL E., ZAENGL W. S., *High Voltage Engineering Fundamentals*. Elsevier Science, 2000

[5] VEVERKA, Antonín, *Technika vysokých napětí*. Praha, SNTL 1978

[6] Air pollution control network, APC Network, *http://www.apc-network.com/ESP_Photos/Gas%20Distribuion.htm* , dostupné online ze dne 20.4.2016

[7] Comsol Multiphysics, *http://www.comsol.com/comsol-multiphysics* , dostupné on-line ze dne 12.4.2016

[8] Electrostatic Precipitator Guidelines Vol. 1-3, Electric Power Research Institute, Inc.,1987, *www.epri.com* , dostupné on-line ze dne 3.4.2016

[9] FEMM, *http://www.femm.info/wiki/HomePage* , dostupné on-line ze dne 29.4.2016

[10] Hanford Vit Plant, *http://www.hanfordvitplant.com/articles/electrodes-installed-law-gas-treatment-system* dostupné on-line ze dne 15. 4. 2016

[11] Katalogový list izolátorů Elektroporcelán, a.s., *http://www.worldofinsulators.com* , dostupné on-line ze dne 3.12.2015

[12] Katalogový list High Volt měřících přístrojů, *http://www.highvolt.de* , dostupné on-line ze dne 22.4.2016

[13] Mokré elektrické odlučovače Clyde Bergemann Power Group, *http://www.cbpg.com/en/products-solutions-air-pollution-control/wet-esp*, dostupné online ze dne 20.4.2016

[14] Neundorfer knowledge base, *http://www.neundorfer.com//knowledge_base/electrostatic_precipitators.aspx* , dostupné on-line ze dne 13.3.2016

[15] NPTEL - *National Programme on Technology Enhanced Learning*, *http://nptel.ac.in/courses* dostupné on-line ze dne 21. 12. 2015

[16] Quickfield, *http://www.quickfield.cz* dostupné on-line ze dne 12.4.2016

[17] Vyhláška Ministerstva životního prostředí č 415/2012 ze dne 21. listopadu 2012 o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší – Příloha č. 2 – dostupná on-line *http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf* ze dne 1. 3. 2016

[18] ZVVZ Enven Engineering, a.s., *http://www.zvvz.cz/zvvz-enven/produkty/elektricke-odlucovace.html* dostupné on-line ze dne 21. 12. 2015

Seznam příloh

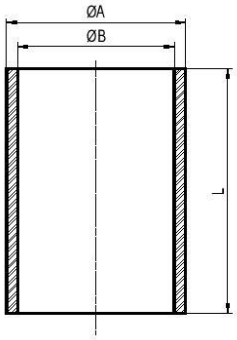
Příloha A: Katalogový list izolátorů

Příloha B: Katalogový list voltmetru HIGH VOLT MU 17

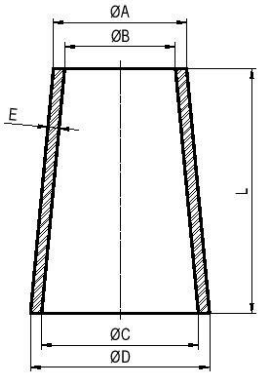
Příloha C: Katalogový list odporového děliče HIGH VOLT GMR 500/270

Izolátory pro elektrostatické filtry
Cylindrical/conical support ESP insulators

Obrázek č.1
Picture No 1



Obrázek č.2
Picture No 2



	rozměry dimensions						Maximální stejnosměrné napětí	Glazura Glaze	Poznámka Comment	Obrázek č. Picture No
	ØA	ØB	ØC	D	E	L				
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	kV			
M2013	201,5 ±10	174 ±10	470 ±10	497.5 ±10	27.5	610 ±5	140	šedá gray		2
M2020	274 ±10	230 ±9	324 ±11	368 ±12	---	500 ±1	95	šedá gray		2
M4597	270 +2 -8	---	---	540 ±7	27.5 ±2.5	650 ±10	150	hnědá brown		2
M4598	270 0 -10	---	---	375 ±7	27.5 ±2	500 ±10	95	hnědá brown		2
M4607	(360)	310 +15 0	---	480 0 -15	25-30	740 ±5	170	hnědá brown		2
M4608	350	305	---	---	---	520	100	hnědá brown		1
M4629	---	300 +10 -2	---	---	25 +5 -2	520 ±2	100	bílá white		1
M4639	---	310 ±10	460 ±10	---	17-25	520 ±5	100	hnědá brown		2
M4643	270 0 -10	---	---	375 ±7	27.5 ±2.5	500 ±10	95	hnědá brown		2
M4643	270 0 -10	---	---	375 ±7	27.5 ±2.5	500 ±10	95	šedá gray		2
M4683	356 ±8	305 ±7	---	---	---	610 ±12	140	šedá gray		1
M4692	264 ±6	211 ±6	437 ±7.5	487 ±7.5	25 ±2.5	700 ±10	160	bílá white		2
M4709	270 +7 -8	---	---	500 ±7	27.5 ±2.5	555 ±10	110	šedá gray		2
M4723	360	320 ±10	480 ±10	520	---	520 ±5	100	hnědá brown		2
M4737	270 0 -10	---	---	365 ±7	27.5 ±2.5	500 ±10	95	hnědá brown		2
M4741	264 ±6	211 ±6	324 ±9	376 ±9	20	700 ±10	160	bílá white		2
M4762	350 0 -10	---	400 ±7	455	27.5 ±2.5	500 ±10	95	hnědá brown		2
M4763	356 ±8	305 ±7	---	---	---	610 ±12	140	hnědá brown		1
M4782	240 ±9	---	---	455 ±13	40 ±3	480 ±14	90	hnědá brown		2
M4799	280 ±10	---	---	370 ±12	15	510 ±15	95	bílá white	rýhování knurling	2

Data Sheet no. 5.56/6

AC/DC Peak Voltmeter MU17 and 18

Survey of measurements and features	
Peak + ; **Peak -**	min. and max. peak
Peak average	average of both peak values
Peak / $\sqrt{2}$+ ; **Peak / $\sqrt{2}$-**	min. and max. peak / $\sqrt{2}$
Average	arithmetic mean
RMS	real r.m.s.
Peak factor / $\sqrt{2}$	peak related to r.m.s. / $\sqrt{2}$
Ripple	ripple amplitude
Frequency	Frequency
graphic representation of the waveform	
measurement storage before disruptive discharge	
Interfaces	V.24 (RS232)
	PROFIBUS-DP (RS485)

Application

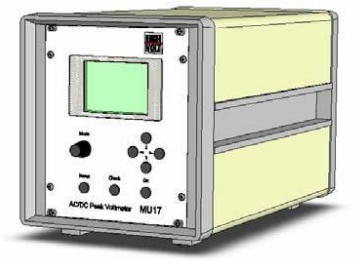
The AC/DC Peak Voltmeters MU17 and MU18 are used for all measurements of AC and DC voltages especially in HVAC and HVDC test systems in connection with HV dividers. The measurements meet all requirements of the related international standard IEC 60060-2. Measurements are displayed or instantaneously processed.
The voltmeter MU17 directly displays the measured value under consideration of the scale factor of the external voltage divider. AC and DC voltages with peak values up to 1000 V can be measured without any voltage divider. Furthermore the voltage waveform can be represented graphically. A special advantage for practical measurements is the storage of values occurring during a disruptive discharge at the test object. An internal testing procedure enables a rapid check of the device. Two serial interfaces provide the possibility of connection to automatic control and evaluation systems: A PROFIBUS-DP interface for time-critical communication (especially with HIGHVOLT control systems) and a V.24 interface for conventional connections are available.

© HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH - 0702 - 5-56-6.doc - Subject to change without prior notice

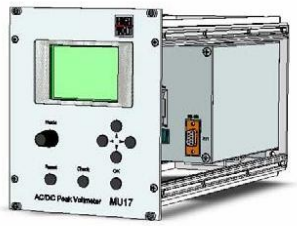
Design

Type MU17
is designed as $^1/_3$ plug-in unit in the 19" system, it can be supplied either as stand-alone (MU17G) or plug-in device (MU17E). Communication via the two serial interfaces is also possible.

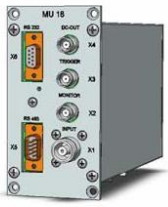
Type MU18
is the metal-encapsulated measuring device for rail mounting, without display and operating panel, but connection by one of the two interfaces to the operator device or a controlling industrial PC for measuring and handling data and display.



MU17G



MU17E



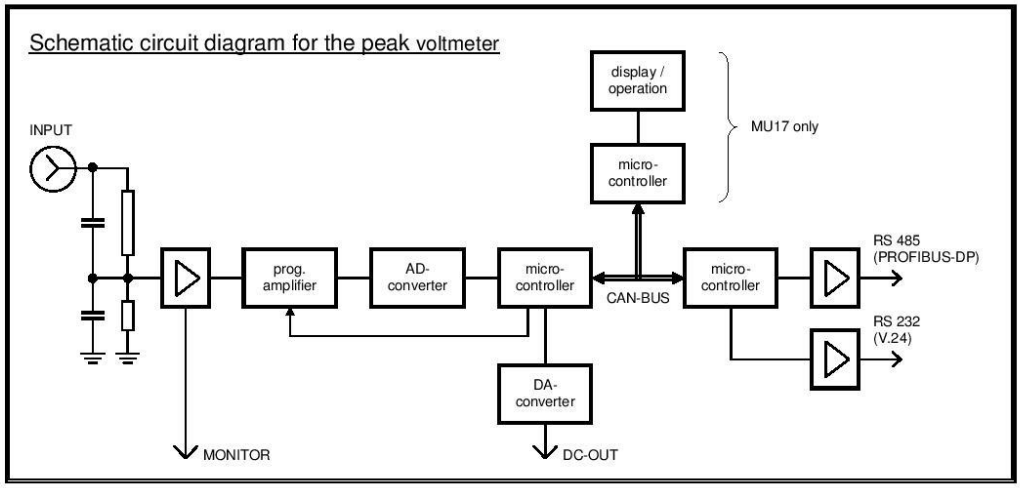
MU18

Operation

The operation is explained by the circuit diagram below. The voltage to be measured is transferred from the INPUT via the internal divider, input amplifier and the programmable amplifier to the analog-digital converter (ADC).
The converter scans the input signal with a high frequency. The digital values gained by the ADC are immediately evaluated by a microcontroller related to the measurement.
All measured values are internally stored temporarily and therefore available after a disruptive discharge.

For special controlling modes, a DC voltage that is proportional to the peak value is available at DC-OUT and a voltage proportional to the INPUT is provided at MONITOR.
Another microcontroller controls the entire data exchange across the PROFIBUS-DP or V.24 interfaces. With the device MU18, operation and data output is only possible across these interfaces.
The communication between the microcontrollers is realized by CAN–Bus.

Schematic circuit diagram for the peak voltmeter



© HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH - 0702 - 5-56-6.doc Subject to change without prior notice

Technical data

Values of connection

Input voltage (peak value)	0…±1000 V
Frequency range	DC and 10 ... 500 Hz
Input impedance	R ≥ 10 MΩ, C ≤ 50 pF
Input Connector	coaxial, Type N

Measurement quantities

- Peak value, peak value /$\sqrt{2}$; each in both polarities
- Peak average: $\frac{|\text{max. value}| + |\text{min. value}|}{2}$; at DC with the correct algebraic sign
- Arithmetic mean value
- RMS (root mean square)
- Peak factor /$\sqrt{2}$: $\frac{\text{peak average}}{\text{RMS} \cdot \sqrt{2}}$
- Ripple amplitude: $\frac{\text{max. value - min. value}}{2}$
- Frequency

With voltage measurement at the measuring input, the divider (or transformation) ratio of the externally connected divider is considered with the displayed output value:

Divider ratio	typical 1 ... 20 000; possible 1 ... $9.999 \cdot 10^9$

The display shows the voltage value with the appropriate unit V, kV or MV automatically.

In the case of a disruptive discharge, the measured values are stored until they are erased either manually or by an external control command or until a new voltage is applied to the measuring input. The storage can also be started by an external impulse (TTL; connector type BNC).

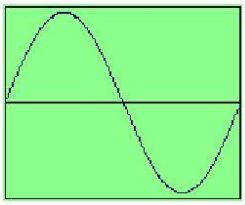
Measurement uncertainty

The measurement uncertainty is related to the measured value in the range of ±(10 ... 1000) V, under reference conditions and at DC as well as in the frequency range (10 ... 500) Hz.

Peak values, mean values, true RMS value	max. ±0.5%

Visualisation

The waveform is shown on the graphic display for one period and normalised on the maximum peak value.



Data input and output

Input of divider ratio	4 digits with exponent
Output of measured values	4 digits with unit of measurement
Interfaces	V.24 and PROFIBUS-DP
Analog output voltages	0 ... +10 V (DC-OUT) and 0 … ±12 V (MONITOR) ; connectors type BNC

© HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH - 0702 - 5-56-6.doc Subject to change without prior notice

Testing mode

Internal test voltage	+5.000 V (DC)

The evaluation is effected according to the principal mode of operation. The divider ratio is set to 1.

Mains supply

MU17	230 V (±10%) 50/60 Hz approx. 20 VA
MU18	24 V (12 V ... 32 V) DC approx. 300 mA

Dimensions and weight

MU17G stand-alone device (w × h × d)	186 × 205 × 330 mm / approx. 5.5 kg
MU17E plug-in device (w × h × d)	142(=28TE) × 173(=4HE) × 300 mm / approx. 3 kg
MU18 (w × h × d)	65 × 126 × 160 mm / approx. 1 kg

Conditions for application

Reference operating conditions	ambient temperature 23°C ±5 K relative humidity 10 ... 65%
Normal conditions	ambient temp. +5 ... +40°C relative humidity 10 ... 80%
Application	indoor
Conditions for storage/transportation	ambient temp. -40 ... +70°C relative humidity ≤ 95% (with max. 30°C)

Scope of delivery

MU17G stand-alone device	19" casing plug-in unit MU17 power supply cable, 1.5 m adapter N ↔ BNC set of fuses set of plugs
MU17E plug-in device	plug-in unit MU17 power supply cable, 1.5 m adapter N ↔ BNC set of fuses set of plugs
MU18 measuring module	metal-encapsulated measuring device without display

MU17/18 fulfils all requirements of IEC 60060-2.

For further information please contact: or our local representative:

HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH
Marie-Curie-Strasse 10

D-01139 Dresden / Germany
Tel. +49 351 8425 648
Fax +49 351 8425 679
e-mail dresden@highvolt.de
website http://www.highvolt.de

© HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH - 0703 - 5-56-6.doc Subject to change without prior notice

Data Sheet no. 4.8 / 8

HV Resistors and Resistive Dividers

Description HV resistors, Blocking Impedance:

High-voltage (HV) resistors are necessary components in the Module Systems. A wide range (from 0.25 kΩ to 5000 kΩ) of resistors in the grid 850 mm is available. They can be used for impulse voltage module systems as charging resistors, damping resistors or current limitation and partial discharge measurement. For partial discharge (PD) measurements, in AC voltage module systems a blocking impedance LS 150-1/40 (Data Sheet 1.35) and for PD measurements in DC voltage module systems a series resistor of 106 kΩ has been designed.

Technical Data:

Environmental conditions:
temperature 0 to 40° C
relative humidity ≤ 90 %
altitude ≤ 1000 m
indoor operation
(outdoor application and different parameters on request)

Type code:
R x resistor of x kΩ

type code		R 025	R 03	R 08 (R 08k)	R 6	R 45	R 106	R 280	R 460	R 5000
rated voltage	kV	140	140	140	140	140	140	140	140	140
resistance	kΩ	0.25	0.3	0.8	6.2	45	106	280	460	5000
PD - Intensity	pC	≤ 2								
dimensions l	mm	650	650	650 (482)	650	650	650	650	650	650
∅d	mm	40	40	100	40	100	100	105	105	170
weight	kg	5	5	5 (4)	5	5	5	5	5	10

Dimensional drawing:

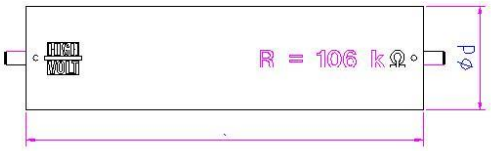


Fig. 1: R x

© HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH - 0605 - 4-8-8.doc Subject to change without prior notice

Description measuring resistor, resistive dividers:

For DC voltage measurement, a measuring resistor MR 250 and a measuring divider MRT 250 has been designed. Both types are PD-free measuring devices.
Housed in an insulating tube two resistors are switched in series to form the HV resistor itself. This mechanical design provides a linear voltage distribution along the HV resistor.
The measuring divider MRT 250 consists of the HV resistor itself and the low-voltage (LV) measuring branch witch is also housed in the insulating tube. A 10 m measuring cable with type N plug connector is included to the delivery scope of the measuring divider MRT 250.
In the Module System Resistive dividers are used to convert, the high DC voltages (up to 350 kV) to a level of typically below 1000 V. This output voltage can be measured by peak voltmeters type MU 17/ 18 (Data Sheet 5.56).

The Resistive Divider GMR 250/135 consists of the measuring divider MRT 250, the HV top electrode KE 1 and a base element FE 1 (Data Sheet 4.10).
With the components of the module System it is possible to built resistive dividers for higher voltages. For voltages up to 350 kV it is possible to switch one or two measuring resistors MR 250 and the measuring divider MRT 250 in series. With one MR 250 above the MRT 250 connected by an junction element KE 1 the divider GMR 500/270 will be formed.
With two measuring resistors MR 250 above the MRT 250 each one connected by an junction element KE 1 the divider GMR 750/350 is formed. As HV top electrode a junction element KE 2 is used. The base element FE 1 completed the dividers.

Technical Data:

Environmental conditions:
temperature 0 to 40° C
relative humidity ≤ 90 %
altitude ≤ 1000 m
indoor operation
(outdoor application and different parameters on request)

type code:

MR z	measuring resistor of z MΩ
MRT z	measuring divider resistor of z MΩ
GMR a/b	complete divider of a MΩ for b kV DC voltage

type code		MR 250	MRT 250	GMR 250/135	GMR 500/270	GMR 750/350
rated voltage	kV	135	135	135	270	350
divider ratio	ü		167.67	167.67	334.33	501
resistance	MΩ	250	251.5	251.5	501.5	751.5
components		MR 250	MRT 250	1 x FE 1, 1 x MRT 250, 1 x KE 1,	1 x FE 1, 1 x MR 250, 1 x MRT 250, 1 x KE 1, 1 x KE 2	1 x FE 1, 2 x MR 250, 1 x MRT 250, 2 x KE 1, 1 x KE 2
measuring uncertainty		< 2 %	< 2 %	< 2 %	< 2 %	< 2 %
weight	kg	10	10	17.6	31.1	42.4
dimensions (ød x l) (a x h)	mm	170 x 650	170 x 650	436 x 972	436 x 1990	436 x 2840

Dimensional drawing:

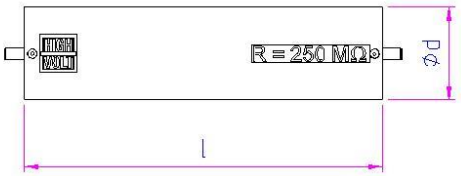


Fig. 2: MR 250

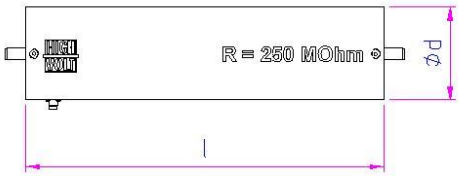


Fig. 3: MRT 250

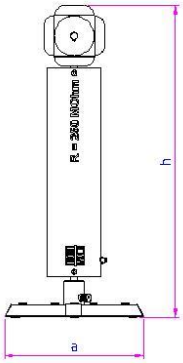


Fig. 4: GMR 250/135

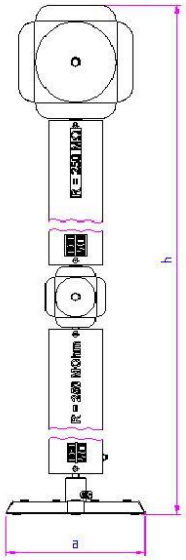


Fig. 5: GMR 500/270

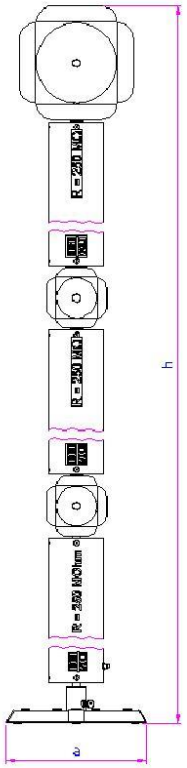


Fig. 6: GMR 750/350

For further information please contact:

HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH
Marie-Curie-Strasse 10

D-01139 Dresden / Germany

Tel. +49 351 8425 648
Fax +49 351 8425 679
e-mail dresden@highvolt.de
webseite http:\\www.highvolt.de

or our local representative: