

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Protikorózní ochrana napájecího vodiče v laboratoři VN

autor: Bc. Petr Procházka
vedoucí práce: Ing. Adam Kysela

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Petr PROCHÁZKA**
Osobní číslo: **E10N0109P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Protikorónová ochrana napájecího vodiče v laboratoři VN**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište současný stav laboratoře VN.
2. Navrhněte a vyrobte ochrany proti korónovému výboji.
3. Provedte simulace a měření funkce ochrany.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:

1. Veverka, A. : Technika vysokých napětí

Vedoucí diplomové práce: Ing. Adam Kysela
Katedra elektroenergetiky a ekologie
Datum zadání diplomové práce: 17. října 2011
Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2012

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Cílem této diplomové práce je popsat současné nejdůležitější vybavení laboratoře vysokého napětí Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni, popsat princip vzniku a využití koróny, vytvořit kompletní návrh protikorónové ochrany napájecího vodiče a ověřit její funkčnost pomocí počítačové simulace a praktického měření. Práce obsahuje celý popis postupu při návrhu ochrany a postup při tvorbě simulace, měření a shrnutí výsledků.

Klíčová slova

vysoké napětí, koróna, protikorónová ochrana, Agros2D simulace, měření částečných výbojů

Abstract

Anti-corona protection power cable in HV laboratory

The aim of this thesis is to describe the most current high-voltage laboratory facilities of the Faculty of Electrical Engineering University of West Bohemia in Pilsen, describe the principle and the use of corona, a complete design of anti-corona protection power cable and verify its functionality by means of computer simulation and practical measurements. The work includes the description of the procedure of designing the protection and creation of simulation, measurement and summary results.

Key words

high voltage, corona, anti-corona protection, Agros2D simulation, measurement of partial discharges

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 26.4.2012

Bc. Petr Procházka

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Adamovi Kyselovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Dále bych rád poděkoval všem přátelům, kteří mě ve studiu podporují, největší dík si však zaslouží rodiče, bez jejichž podpory bych nikdy neměl možnost tuto práci sepsat.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	9
1 LABORATOŘ VYSOKÉHO NAPĚTÍ	10
1.1 PŘÍSTROJE V LABORATOŘI VN.....	10
1.2 TRANSFORMÁTOROVÁ KASKÁDA.....	11
1.3 RÁZOVÝ GENERÁTOR HAEFELY.....	12
1.4 ZDROJ PRO MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	15
1.5 VAZEBNÍ KAPACITA	15
2 PROTIKORÓNOVÁ OCHRANA	17
2.1 KORÓNA	17
2.2 VYUŽITÍ KORÓNY VE VYSOKÉM NAPĚTÍ.....	18
2.3 ZTRÁTY KORÓNOU NA VEDENÍ.....	19
2.4 PROTIKORÓNOVÁ OCHRANA	21
2.5 ROZLOŽENÍ NAPĚTÍ NA IZOLÁTORECH	22
2.6 NÁVRH PROTIKORÓNOVÉ OCHRANY	24
2.7 VÝROBA	26
2.8 PŘÍPRAVA MODELU	27
2.9 MĚŘENÍ PŘESKOKOVÉHO NAPĚTÍ	29
3 SIMULACE A MĚŘENÍ FUNKCE OCHRANY	32
3.1 AGROS 2D	32
3.2 NÁVRH GEOMETRIE	33
3.3 SIMULACE.....	35
3.4 MĚŘENÍ FUNKCE OCHRANY – ČÁSTEČNÉ VÝBOJE	41
3.4.1 <i>Teorie</i>	41
3.4.2 <i>Měření</i>	42
3.4.3 <i>Shrnutí výsledků</i>	48
3.5 SVODOVÝ PROUD.....	48
3.6 VIZUÁLNÍ OVĚŘENÍ FUNKCE OCHRANY	49
3.7 PRAKTICKÉ POUŽITÍ OCHRANY	50
4 ZÁVĚR	51
5 POUŽITÁ LITERATURA	52
6 SEZNAM PŘÍLOH	53
6.1 FOTODOKUMENTACE VYBRANÝCH ZAŘÍZENÍ.....	54
6.1.1 <i>Rázový generátor</i>	54
6.1.2 <i>Transformátorová kaskáda</i>	55
6.1.3 <i>Vazební kapacita</i>	56
6.1.4 <i>Zdroj částečných výbojů</i>	57
6.2 VNITŘNÍ SCHÉMA ZDROJE ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ.....	58
6.3 VÝKRESY PROTIKORÓNOVÉ OCHRANY	59

Seznam použitých zkratk a symbolů

označení	jednotky	význam
P	kW/km	ztráty na vodiči
U	kV	efektivní fázové napětí u 3F vedení
E	V/m	intenzita elektrického pole
U_v	kV	napětí na vodiči
$d_{\text{izolátor}}$	cm	vzdálenost izolátorového plechu od spodní podstavy izolátoru
d_{deska}	cm	vzdálenost ochrany od zadní uzemněné desky
$U_{\text{výdrž}}$	kV	výdržné napětí sestavy
U_p	kV	přeskokové napětí
f	Hz	frekvence
C	F	kapacita
C_1	F	kapacita ke stožáru
C_2	F	kapacita k vodiči
ϵ_r	-	relativní permitivita
σ	C/m ²	povrchová hustota náboje
ρ	C/m ³	objemová hustota náboje
Z_m	Ω	měřicí impedance
δ	-	poměrná hustota vzduchu
m_1, m_2	-	činitele prostředí
r	cm	poloměr vodiče
d	cm	průměr vodiče
a	cm	vzdálenost mezi osami vodičů
n	-	počet drátů ve vrchní poloze lana
VN		vysoké napětí
VVN		velmi vysoké napětí
ZVN		zvláště vysoké napětí
CSV		Comma Separated Values – čárkou oddělené hodnoty

1 Laboratoř vysokého napětí

1.1 Přístroje v laboratoři VN

Vybavení laboratoře VN FEL, ZČU bylo vybíráno tak, aby byla dodržena tři základní poslání:

- výuka
 - praktická výuka předmětu Technika vysokého napětí, který se zabývá kompletní problematikou vysokého napětí v elektroenergetice
 - účelová měření prováděná při práci na bakalářských, diplomových a rigózních pracích
- výzkum a vývoj
 - výzkumná a vývojová činnost, která je zaměřena na zvýšení spolehlivosti a odolnosti všech izolačních systémů, které se prakticky využívají v elektroenergetických soustavách
- zkušební činnost
 - zkoušení vysokonapěťových izolačních systémů stejnosměrným, střídavým a impulzním napětím

Přístrojově je laboratoř vybavena dvoustupňovou transformátorovou kaskádou, osmistupňovým rázovým generátorem HAEFELY, menším zdrojem pro měření částečných výbojů, měřicí aparaturou Biddle pro měření částečných výbojů a některými dalšími zdroji napětí.

Pro záznam a následnou analýzu výbojů je v laboratoři měřicí systém od firmy Power Diagnostix Systems a vysokonapěťový osciloskop LeCroy.

Laboratoř VN udržuje dlouhodobou spolupráci s laboratoří VN firmy ETD Transformátory se zaměřením na diagnostiku výkonových transformátorů. Předmětem této spolupráce jsou hlavně modelová měření a výzkum částečných výbojů v dutinách vinutí transformátorů. Dalším oborem spolupráce je společný výzkum na možnosti využití akustických metod pro diagnostiku izolačních systémů transformátorů při impulzním a střídavém namáhání.

Další společné projekty jsou zaměřeny na problematiku provozu různých energetických zařízení, jako je např. experimentální ověřování parametrů izolace, simulace chování vodiče

za situace blízké poruchovým podmínkám, analýza příčin poruch přístrojových transformátorů apod.

Hlavními přístroji tedy jsou:

- transformátorová kaskáda
- rázový generátor
- zdroj pro měření částečných výbojů
- vazební kapacita

1.2 Transformátorová kaskáda

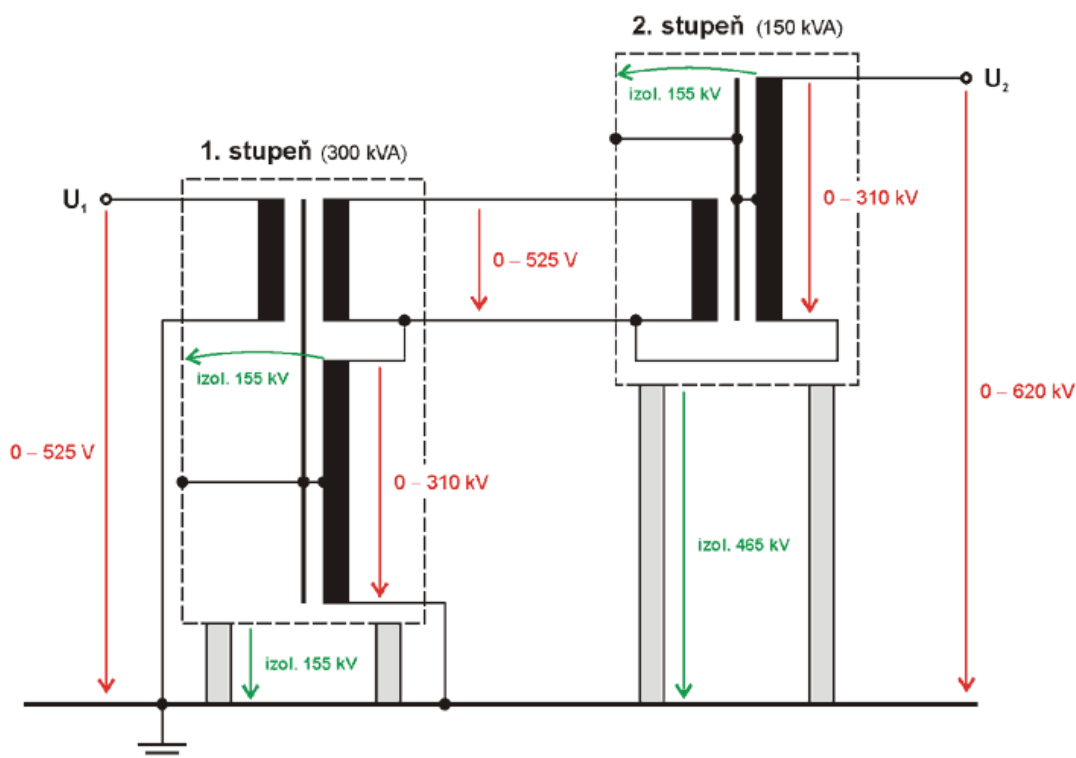
Toto zařízení je speciálním zdrojem střídavého napětí. Kaskádové zapojení je to z toho důvodu, že pro jednotlivé transformátory pro napětí vyšší než 500 kV neúměrně stoupají pořizovací náklady (náročnost na provedení izolace a průchodek proti uzemněné nádobě).

Transformátorová kaskáda je tvořena sériovým zapojením více transformátorů. V laboratoři je transformátor tvořen dvěma stupni, přičemž každý z nich je schopen generovat napětí až 310 kV, což v součtu dává maximální výstupní napětí až 620 kV.

Primární vinutí prvního stupně kaskády se napájí regulovaným zdrojem, který tvoří transformátor s posuvným jádrem 0-525 V / 300 kVA. Ze středu sekundárního vinutí je vyvedeno propojení mezi magnetickým obvodem a uzemněnou nádobou transformátoru, která je na potenciálu max. 155 kV. Na toto napětí musí být také dimenzována izolace sekundárního vinutí. Druhá část sekundárního vinutí se pak používá jako budící vinutí pro napájení druhého stupně transformátoru. Tato část vinutí má převod 1, takže napětí na primárním a sekundárním vinutí je shodné.

Primární vinutí druhého stupně se napájí budícím vinutím (druhé části) sekundárního vinutí z prvního stupně. Konstrukce stupně je podobná prvnímu. Ze středu sekundárního vinutí je vyvedeno propojení mezi magnetickým obvodem a nádobou transformátoru, takže má potenciál 155 kV vůči prvnímu stupni a 465 kV proti zemi. Na tak vysoké napětí musí být dimenzována izolace nádoby. To se projevuje výškou konstrukce druhého stupně. Izolace sekundárního vinutí proti uzemněné nádobě je dimenzována na 155 kV jako u prvního stupně.

Vícenásobným zapojením dalších stupňů by bylo možno zkonstruovat zdroj s ještě vyšším výstupním napětím, ovšem za cenu vysokých nákladů a prostorových nároků [1].



Obr. 1: Schéma transformátorové kaskády, převzato z [1]

1.3 Rázový generátor HAEFELY

V laboratoři se také nachází osmistupňový generátor HAEFELY. Tento generátor je zdrojem atmosférických impulzů tvaru 1,2/50 μ s s maximální amplitudou až 600 kV a maximální energií 4 kJ. Změnou konfigurace generátoru můžeme také získat vypínací impulzy tvaru 250/2500 μ s s amplitudou až 480 kV a celkovou maximální energií 4 kJ.

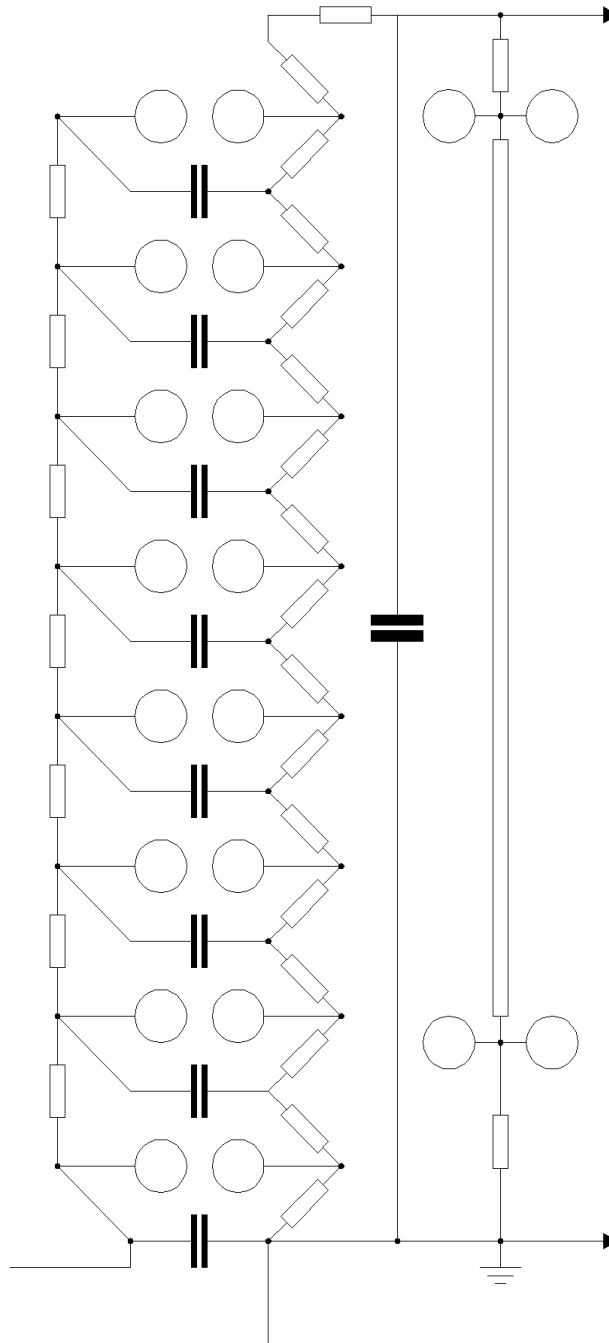
Konstrukce generátoru je jednoduchá – všechny komponenty jsou přehledně uspořádány a velmi snadno dostupné. Jednotlivé části jsou postaveny nad sebou v modulárním systému. Celý generátor může být posunut do optimální pracovní pozice bez pomoci vnějších pomocných zařízení [2].

- nosný rám
 - nosný rám se skládá z porcelánových izolátorů s oddělovacími pláty, které jsou vyrobeny z pozinkovaného ocelového plechu
 - laminátové prvky zvyšují stabilitu, pokud je na generátoru více než 6 stupňů

- spínací jiskřiště
 - měděné koule o průměru 120 mm jsou připevněny tak, že jedna koule je fixována do dané pozice, zatímco poloha druhé se dá nastavit
- paralelní jiskřiště
 - paralelní jiskřiště je umístěno ve speciální tubě
 - mezera mezi elektrodami je pevná a nevyžaduje žádné úpravy v celém pracovním rozsahu
- impulzní kondenzátory
 - kondenzátory jsou impregnovány vysoce kvalitním olejem
 - olejetěsná ocelová nádoba je vybavena porcelánovým těsněním
 - olejovou expanzi eliminují elastické stěny nádoby
 - v každém nabíjecím stupni jsou dva 50 kV kondenzátory
 - všechny kondenzátory jsou konstruovány tak, aby měly minimální indukčnost
- vnitřní rezistory
 - používají se vysoce lineární drátové rezistory se stabilní hodnotou odporu
 - umělohmotná chránička chrání tyto rezistory před vnějším mechanickým poškozením
- vnější sériové rezistory
 - vnější rezistory jsou tvořeny nataženými pásky vyrobené z vysoce odolného materiálu
- základna
 - je vyrobena ze svařovaných ocelových sekcí a natřena ochranným nátěrem
 - může být rozšiřována při přidávání dalších rozšiřujících modulů
- uzemňovače
 - dva magneticky ovládané uzemňovače se používají pro eliminaci zbytkového náboje v impulzních kondenzátorech a jejich nádob
 - kvůli bezpečnosti obsluhy jsou uzemňovače vybaveny pružinami, které automaticky vybíjejí kondenzátory v případě selhání ovládaní

Impulzní kondenzátory všech osmi stupňů jsou umístěny uvnitř centrálního tělesa generátoru. Z vnější strany jsou pak spínací jiskřiště, nabíjecí rezistory a vnitřní rezistory.

Podle zapojení propojovacích spojek můžeme z jednotlivých stupňů tvořit sério-paralelní kombinace. Můžeme mít 4 dvojice nebo 2 čtveřice v sérii, čímž se zvýší energie, ale za cenu nižšího výstupního napětí, které by se tak pohybovalo na hodnotě 300 nebo 150 kV. Po odstranění nabíjecích odporů se může vyřadit libovolný počet nabíjecích stupňů, čímž se dosáhne vyšší přesnosti pro oblast nižších napětí.



Obr. 2: Principiální schéma rázového generátoru [2]

1.4 Zdroj pro měření částečných výbojů

Vysokonapěťové testování se používá pro měření zkušebních objektů s průmyslovou frekvencí 50 Hz. Celé zařízení se skládá z mobilního ovládacího pultu, monitorovacího systému a vysokonapěťového transformátoru. Celý systém je propojen 9 metrů dlouhým kabelem.

Ovládací pult obsahuje zejména tyto prvky:

- hlavní vypínač
- hlavní ochrana
- variabilní transformátor s ručním otočným pohonem hlavního transformátoru
- sériovo-paralelní spínač pro spínání primárního vinutí transformátoru
- mžiková ochrana proti zkratu
- tlačítka a signální kontrolky
- kV-metr
- ampérmetr
- voltmetr

Vysokonapěťový transformátor je navržen jako olejový transformátor s uzavřeným jádrem. Napouštění oleje při výrobě transformátoru se provádělo při vysokém vakuu, čímž je zaručena nepřítomnost vzduchu uvnitř transformátoru. Jeden pól je plně izolovaný, zatímco druhý je uzemněn přes uzemňovací pásek. Transformátor je díky čtveřici koleček na podstavci plně mobilní [3].

Technické údaje jsou uvedeny v tabulce 1.

jmenovitý výkon	10 kVA
napětí primárního vinutí	380 V
napětí sekundárního vinutí	až 150 kV
hmotnost pultu	260 kg
hmotnost transformátoru	590 kg

Tabulka 1: Technické parametry zdroje částečných výbojů

1.5 Vazební kapacita

Další důležitou laboratorní komponentou je vazební kapacita od firmy Biddle, sloužící jako zdroj okamžité energie při měření částečných výbojů. Kapacita má kapacitu 1500 pF při maximálním provozním napětí 150 kV.

Kapacita je tvořena sériovým zapojením dvou vysokonapěťových kondenzátorů, přičemž každý má kapacitu 3000 pF. Vazební kapacita umožňuje odebrání horního kondenzátoru, takže bychom mohli využívat dvojnásobnou kapacitu, ale za cenu snížení maximálního provozního napětí na polovinu, tj. 75 kV.

Za tímto sériovým spojením je měřicí impedance, která je umístěna na spodku celého zařízení. Měřicí impedance se podílí na detekci a měření proudových impulzů při měření částečných výbojů. Impedance je připojena na nízkonapěťový výstup.

Kombinace vazební kapacity a měřicí impedance tvoří jeden celek s dělicím poměrem zkušební napětí 1:1000.

2 Protikorónová ochrana

2.1 Koróna

Pod pojmem koróna rozumíme samostatný neúplný výboj, který vzniká mezi značně zakřivenými elektrodami nebo obecně v místech s vysoce nehomogenním elektrickým polem. Vzniká při dosažení dostatečně vysoké intenzity elektrického pole v blízkosti elektrod a to jak ve vzduchu za běžných atmosférických podmínek, tak i v plynech o vyšším tlaku.

Elektrody, na kterých se vyskytuje koróna, jsou snadno rozpoznatelné, protože koróna se projevuje světélkováním. Podle britského vědce Stanleyho Whiteheada má koróna 1,9krát větší průměr než je průměr běžně viditelný lidským okem [4]. Celá koróna však nemusí být viditelná. Je to dáno tím, že neviditelné části koróny produkují jen ultrafialové záření (vlnová délka ≤ 380 nm), které lidské oko nezachytí.

Přesně určit, při jaké intenzitě elektrického pole vzniká koróna, je obtížné. Rozložení pole je totiž závislé na povrchu elektrod a jejich tvaru a znečištění. Tyto malé nehomogenity mají za následek vznik ohnisek malých nestabilních výbojů, které jsou předzvěstí koróny.

Lepší podmínky nastávají v laboratořích, kde mají elektrody přesně definovaný tvar a jsou zcela čisté. Relativně snadno se tu dá odhadnout tvar elektrického pole, přesně určit současné atmosférické podmínky a vše vzít v úvahu při stanovování počátečního napětí koróny. Pokud budu v dané úloze postupně zvyšovat napětí, postupem času se změní elektrodový proud na takovou velikost, kterou už zachytí laboratorní přístroje. V ten samý okamžik vznikne koróna, elektrody se obklopí světélkující vrstvou a současně s tím začne výboj praskat a šumět, což je pro korónu charakteristický znak. Pokud bych i nadále zvyšoval napětí, výboj by přešel z neúplného v trsový až jiskrový.

Koróna se projevuje u obou polarit napětí. U každé polarity je však mechanismus vzniku jiný:

- kladná polarita
 - kladné ionty se pohybují od elektrody, elektrony k elektrodě;
- záporná polarita
 - elektrony se posouvají do vnější oblasti elektrického pole a tam tvoří záporné ionty;
 - kladné ionty se pohybují k elektrodě, kde se neutralizují;

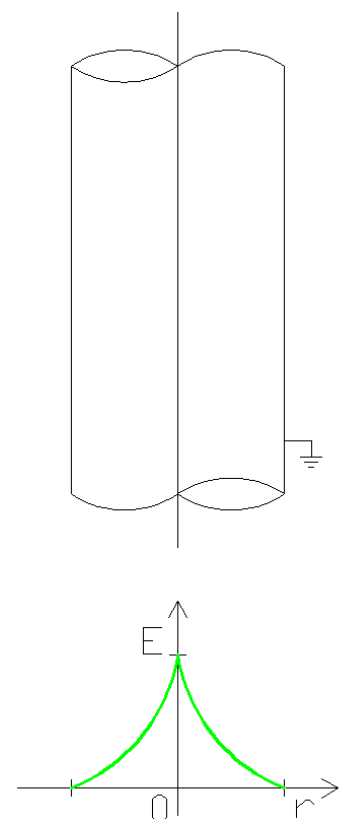
Na povrchu elektrod po vzniku koróny je pak téměř neměnná intenzita elektrického pole, která je nutná pro neustálou ionizaci, přičemž ve větší vzdálenosti od elektrody se zvyšuje hustota náboje stejné polarity, jako je příslušná elektroda.

2.2 Využití koróny ve vysokém napětí

Koróna jako taková je ve většině případů jevem nežádoucím a snažíme se jí potlačit. Jinak tomu je při jejím využití v elektrických odlučovačích. Odlučovače mají za úkol ze vzduchu a kouřových plynů odstraňovat tuhé a kapalné částice, které by jinak byly vypuštěny do atmosféry. Každý větší průmyslový podnik je v dnešní době vybaven některým druhem odlučovače. Odlučování můžeme rozdělit na primární a sekundární. Primární odlučování spočívá v odlučování nečistot těsně za jejich zdrojem, sekundární odlučování se začleňuje na konec celého zařízení, tzn. těsně před spotřebič plynů (většinou před komín, odkud se kouř vypouští do ovzduší). Efektivnost celého zařízení je závislá na investičních, potažmo provozních nákladech.

Odlučovač je tvořen dvěma elektrodami. Jedná se o elektrodu vysokého napětí a o elektrodu sběrací. Elektrody vysokého napětí jsou zpravidla tvořeny drátem o napětí několika desítek kilovoltů, takže na nich vzniká výboj. Pro vysvětlení funkčního principu zde popíšeme odlučovač trubový.

Základním prvkem je vertikální trubová sběrací elektroda, která je obvykle připojena ke kladné polaritě usměrněného vysokého napětí a uzemněna. V její ose je napnutý drát o záporné polaritě a napětí řádově desítek kilovoltů. Tato osová elektroda je od země izolována. Při určitém napětí (počáteční kritické) dochází na drátové elektrodě ke vzniku koróny. To má za následek silné elektrické pole v okolí záporné elektrody, čímž dochází k nárazové ionizaci kladných iontů a elektronů. Této oblasti se říká první zóna. V trochu větší vzdálenosti od elektrody ionizují už jen elektrony (druhá zóna). Třetí zóna již má elektrické pole tak slabé, že v ní vůbec k nárazové ionizaci nedochází. Do této zóny jsou tlačeny elektrony z předchozích dvou zón. Tady vytvářejí prostorový náboj, ze kterého odlučované částice získávají svůj vlastní náboj. Na již nabitě tuhé částice pak působí elektrické pole odpudivou silou, která je odpuzuje směrem od osy trubky k její stěně. Síla je přímo úměrná velikosti elektrického pole v okolí drátové elektrody. Tím se tuhé částice dostanou do přímého kontaktu se sběrací elektrodou, na které ulpívají. Zde pak po určité tloušťce nečistot samovolně opadávají do sběračů nebo jsou mechanicky oklepávány. Celé funkční schéma je na obrázku 3. Sběrací elektroda nemusí mít



Obr. 3: Trubový odlučovač, rozložení $E = f(r)$

nutně jen kruhový průřez, dělají se i šestihřanné průřezy. Těch se pak skládá více vedle sebe a celému uspořádání se říká voštinové.

Trubové odlučovače mohou být suché nebo mokré. Další druhy odlučovačů jsou komorové (vertikální nebo horizontální) a speciální. Všechny druhy jsou založeny na podobném principu [5].

2.3 Ztráty korónou na vedení

Koróna je jeden druh ztrát při přenosu elektrické energie. Tyto ztráty mají dvě složky:

- ionizační ztráty (tzv. trsové ztráty)
- ztráty spojené se ztrátou iontů z ionizační oblasti do okolí

Složka ztrát kvůli odchodu iontů z ionizační oblasti vodiče do okolního prostoru lze vysvětlit následovně: v jedné půlperiodě ionty projdou dráhu dlouhou od několika centimetrů po několik decimetrů, v druhé půlperiodě částečně rekombinují ve vzduchu a částečně se neutralizují při návratu do původního místa. Tento princip platí jen pro střídavé napětí, pro stejnosměrné napětí je mechanismus ztrát jiný. Pokud totiž napájíme vodič stejnosměrným napětím, tak se ionty zpátky nevracejí (stále stejná polarita napětí). Ztráty způsobené pohybem iontů jsou proti ionizačním ztrátám téměř zanedbatelné.

Ztráty ovlivňuje několik faktorů:

- atmosférické podmínky
 - teplota
 - tlak
 - vlhkost (déšť, mlha, jinovatka)
- povrch vodičů
 - hrubost
 - mastnota

Zvláště povrch vodičů má rozhodující vliv na velikost ztrát. Pokud je povrch hodně hrubý a mastný, můžou ztráty narůst oproti hladkému nemastnému povrchu až několikanásobně. Povrch vodičů venkovních vedení se vlivem stárnutí postupně zlepšuje, což má za následek snížení ztrát.

Vše přitom stále souvisí s intenzitou elektrického pole na povrchu vodiče. K udržení intenzity pod kritickou mezí pro vznik je nutno zvyšovat průměr vodiče úměrně se jmenovitým provozním napětím. Toho se dosahuje použitím ocelohliníkových lan (tzv. AlFe lana) nebo měděných dutých lan. V přenosové soustavě 220 kV se již většinou používají svazkové vodiče, při napětí 400 kV jsou již prakticky naprosto nezbytné.

Pro výpočet ztrát na vedení se nejdříve používal experimentálně odvozený Peekův vzorec. Ztráty na vodiči vypočítává následovně:

$$P = \frac{241}{\delta} * (f + 25) * \sqrt{\frac{r}{a}} * (U - U_0)^2 * 10^{-5} \text{ [kW/km]} \quad (2.3.1)$$

kde

Uefektivní, fázové napětí u 3F vedení [kV]

U₀.....napětí, při kterém vzniká na povrchu vodiče intenzita pole

$$E_0 = 21,1 * m_1 * m_2 \quad (2.3.2)$$

Z toho vyplývá:

$$U_0 = 21,1 * m_1 * m_2 * r * \ln \frac{a}{r} \text{ [kV]} \quad (2.3.3)$$

kde

rpoloměr vodiče [cm]

avzdálenost mezi osami vodičů [cm]

δpoměrná hustota vzduchu

ffrekvence [Hz]

m₁činitel respektující vliv povrchu vodiče (0,98 ÷ 0,81)

m₂činitel respektující vliv počasí (1 pro sucho, 0,8 pro déšť)

Peekův vzorec však není pro výpočet ztrát dostatečně vhodný. Prvním důvodem je skutečnost, že podle Peeka ztráty korónou vznikají i při napětí nižším než je udávané U₀. Dalším předpokladem pro výpočet hodnoty U₀ je nezávislost E₀ na poloměru vodiče. To ale neodpovídá realitě, takže U₀ nemůžeme pokládat za počáteční napětí koróny.

To vedlo k odvození Petersonova vzorce. Tento novější vzorec umožňuje vypočítat ztráty korónou pod počátečním napětím U₀:

$$P = \frac{112 * f}{\left(\ln \frac{a}{r}\right)^2} * U^2 * \Phi_C * 10^{-6} \text{ [kW/km]} \quad (2.3.4)$$

kde

$$\Phi_C = \left(\frac{U}{U_0}\right)^2 + 2 * \ln \frac{U}{U_0} - 1 \quad (2.3.5)$$

U₀ zde má jen početní význam, pro hladké vodiče:

$$U_0 = 21,1 * \delta^{2/3} * m_1 * r * \ln \frac{a}{r} \text{ [kV]} \quad (2.3.6)$$

a pro lana:

$$U_0 = \frac{21,1 * \delta^{2/3} * \left[\ln \frac{a}{c * r} + (n - 1) * \ln \frac{2 * a}{d - c * r} \right]}{\frac{1}{c * r} + \frac{n - 1}{d - c * r}} \text{ [kV]} \quad (2.3.7)$$

kde

$$c = 1 - \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n}\right)}{\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{n}} \quad (2.3.8)$$

- m_1 koeficient povrchu drátů, 1 pro lesklé a hladké dráty,
0,98 ÷ 0,88 pro drsný povrch
- r poloměr drátu, u lan jako poloměr opsané kružnice [cm]
- d průměr drátu lana [cm]
- n počet drátů ve vrchní poloze lana

Experimentálně získaná křivka, zobrazující závislost ztrát korónou na napětí je zpočátku pomalu stoupající a následně přechází do strmě stoupající. V první části křivky se jedná o ztráty trsovými výboji, v druhé pak o ztráty ve svítícím obalu. Přechod mezi oběma fázemi je zhruba při napětí U_0 .

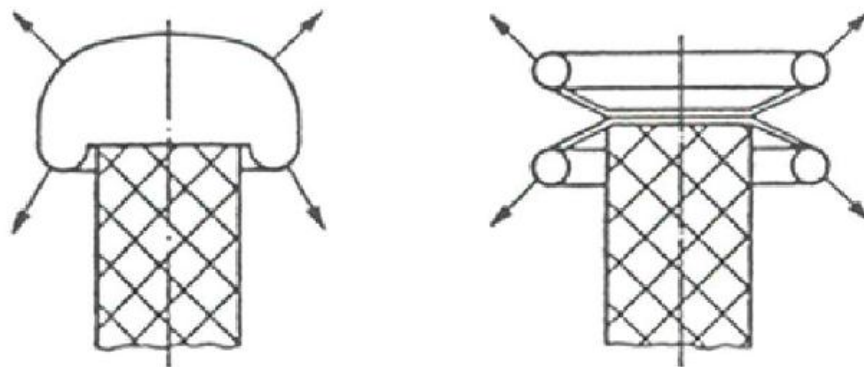
Tyto uvedené vzorce teoreticky stanovují nějaké ztráty a počáteční napětí koróny, v praxi se však ztráty měří na modelech a pokusných vedeních. Z těch se zjištěné hodnoty dále použijí pro výpočet ztrát v konkrétních případech [5].

2.4 Protikorónová ochrana

Protikorónové ochrany jsou zpravidla navrhovány tak, aby se vhodnějším rozložením napětí (linearizací) snižovala velikost intenzity elektrického pole. Čím je maximální hodnota velikosti intenzity elektrického pole nižší, tím je menší pravděpodobnost vzniku koróny.

Obvykle jsou protikorónová stínění nebo externí stínící elektrody používány k eliminaci celého jevu. Koróna může nastat prakticky téměř na všech zařízeních - transformátor vysokého napětí, vysokonapěťový kapacitor, vysokonapěťový dělič a podobně. Stínící zařízení jsou navrženy tak, aby snižovaly intenzitu elektrického pole. Bez tohoto efektu by nastaly podmínky umožňující vznik koróny a částečných výbojů. Protikorónová stínění různých tvarů, velikostí a forem jsou dnes ve vysokonapěťové technice běžně k sehnání, avšak jejich korónové charakteristiky jsou vzácné.

Jednoduché protikorónové ochrany jsou znázorněny na obrázku 1, šipky znázorňují místa s nejvyšší intenzitou elektrického pole [6].



Obr. 4: Jednoduché protikorónové ochrany, převzato z [6]

Nákres vlevo znázorňuje stínění vyčnívající elektrodou, nákres vpravo poté dvojitou toroidní elektrodou.

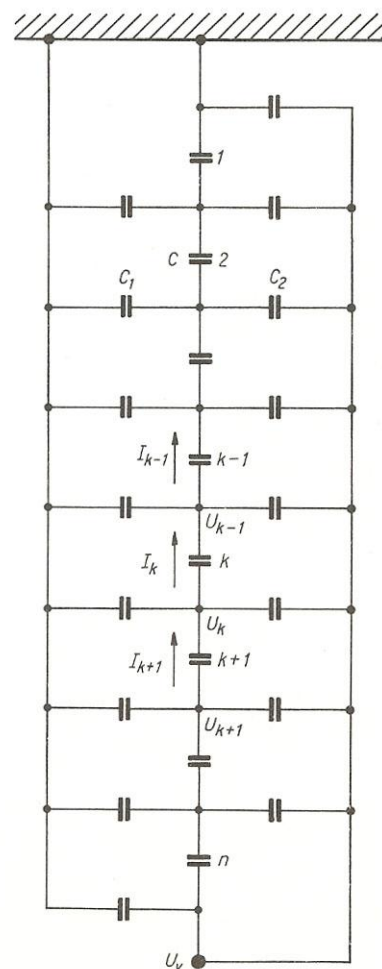
2.5 Rozložení napětí na izolátorech

Kapacitní kruh je prvek, který napomáhá rovnoměrnému rozložení elektrického namáhání po celé délce izolátoru. Následující obrázek je modelem náhradního schématu běžného závěsného izolátoru [5].

Jak je ze schématu vidět, v izolátoru vystupuje několik veličin:

- C - vnitřní kapacita izolátoru
- C_1 - kapacita ke stožáru
- C_2 - kapacita k vodiči
- U_v - napětí na vodiči
- k - číslo izolátorového talíře

Kapacity označené jako C jsou v celém řetězci stejné, C_1 a C_2 jsou v celém rozložení rozdílné. Teoretickým rozborem dostáváme čtyři možnosti rozložení napětí na izolátorovém řetězci, které jsou graficky znázorněny na obrázku 6.



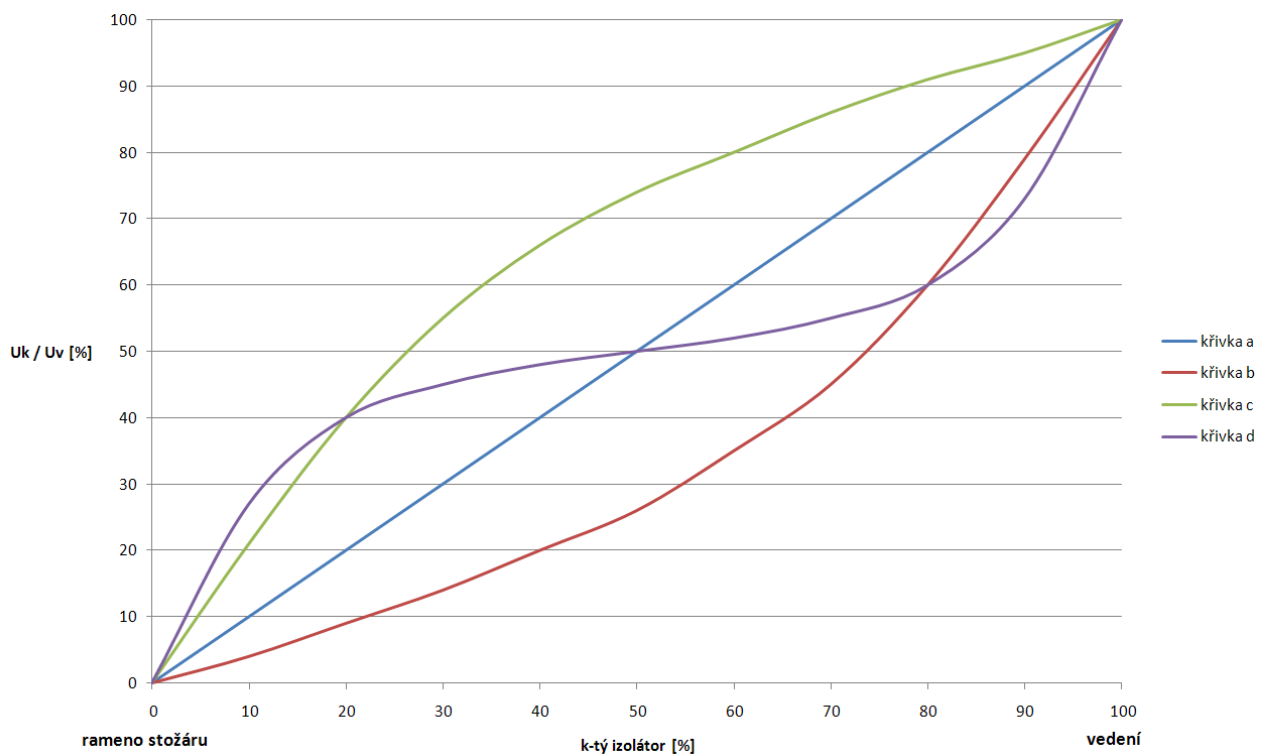
Obr. 5: Náhradní schéma závěsného izolátoru, převzato z [5]

První výsledek, označený jako křivka a, je pro ideální izolátor. Ideální znamená, že $C_1 = C_2 = 0$, tudíž z celého schématu zůstává jen prostřední řada kondenzátorů, což má za následek dokonale lineární rozložení napětí po celé délce izolátoru. S tímto příkladem se však v praxi nesetkáme.

Druhý výsledek (křivka b) je, když $C_1 > C_2$. Tato podmínka platí v případě venkovních vedení, protože povrch lana je několikanásobně menší, než je povrch ramen nosného stožáru.

Třetí výsledek odpovídá podmínce $C_1 < C_2$, křivka c.

Poslední výsledek odpovídá stavu $C_1 = C_2 > 0$, křivka d.



Obr. 6: Rozložení napětí na řetězci izolátoru

Při nerovnoměrně rozloženém napětí na řetězci často dochází ke vzniku koróny. Tomuto nepříznivému jevu se snažíme zabránit, protože koróna má rušivé účinky ve vysokofrekvenční oblasti. Tomuto jevu se zamezí zvětšením kapacity C_2 . V podstatě máme dvě v praxi používané metody:

- pro vedení proudu používat svazkové vodiče
 - zvětší se tím spodní elektroda a následkem toho se i zvětší kapacita C_2
 - dojde k rovnoměrnějšímu rozložení napětí
- používat na izolátorech na straně vedení kapacitní kruhy

Z různých experimentálních měření apod. se zjistilo, že nejvíce linearizují rozložení napětí právě kapacitní kruhy.

2.6 Návrh protikorónové ochrany

Jako protikorónovou ochranu jsem se rozhodl (hlavně vzhledem k omezeným možnostem výroby) udělat jednoduchý kapacitní kruh. Kapacitní kruh je součást vedení, která ovlivňuje rozložení elektrostatického pole. Používá se na izolátorech VVN a ZVN pro linearizaci napětí, čímž se zrovnoměří elektrické namáhání jednotlivých částí izolátoru. Stejně tak se dá modifikovat a používat jako protikorónová ochrana.

Abych udělal kompletní návrh kruhu, musel jsem postupně navrhnout několik částí:

- tloušťka kruhu

Při rozhodování o tloušťce kruhu jsem musel udělat kompromis mezi příliš tlustým a příliš tenkým kruhem. Kdyby byl kruh příliš tenký, efekt ovlivnění elektrostatického pole by byl malý, tudíž by ochrana neměla význam. Na druhou stranu jsem nemohl kruh udělat příliš tlustý, neboť to by znamenalo značné nároky při vyrábění ochrany. Vzhledem k výše uvedeným skutečnostem jsem průměr kruhu stanovil na $d = 1$ cm.

- horní deska

Horní deska je u ochrany důležitá z hlediska uchycení celého zařízení k izolátoru. Zde nebyl žádný problém jako u návrhu tloušťky kruhu – navrhl jsem ji tak, že kopíruje okraje izolátoru. Do návrhu jsem také zahrnul díry na dva přidavné šrouby, které by mohly mít v jiných případech nějaké využití, např. zvýšení pevnosti uchycení.

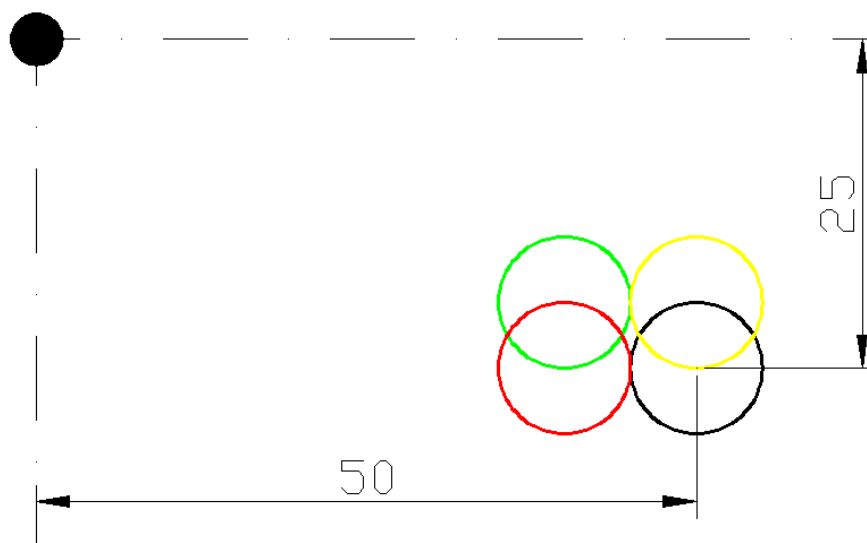
- uchycení

Uchycením je myšleno propojení kruhu s horní deskou. Navrhl jsem pouze jednostranné uchycení, opět s ohledem na náročnost výroby.

- poloha kruhu

Polohu kruhu jsem určil experimentálně.

Největším problémem bylo vhodně navrhnout polohu osy kruhu vzhledem ke středu uchycení k izolátoru. Správné rozměry jsem získal experimentálně simulací, kdy jsem zkoušel několik variant a určoval k nim velikost intenzity elektrického pole ve třech bodech – na horním okraji hlavy šroubu, na dolním okraji hlavy šroubu a na vnějším okraji kruhu.



Obr. 7: Zkušební pozice polohy kruhu

Černý bod vlevo nahoře určuje střed dolní podstavy izolátoru, vzhledem ke kterému jsem navrhoval polohu kruhu. Prvotní návrh je vyznačen zelenou barvou. Pro tuto geometrii jsem provedl simulaci a odečetl v určených bodech velikost intenzity pole. Pak jsem geometrii předělal na červený návrh a spustil výpočet znovu. Zjištěné hodnoty byly ve dvou případech vyšší než u zeleného sestavení, proto jsem se vrátil zpět na původní výškový rozměr a kruh jsem posunul o jednu tloušťku dále od středu systému. Zde byly nasimulované hodnoty lepší než v obou předchozích případech. I tak jsem ale zkusil posunout kruh o kousek níže, na úroveň červeného pokusu. Tím jsem získal polohu, vyznačenou černě, kde byly zmíněné hodnoty intenzit ve dvou bodech celkově nejnižší. Ve třetím bodě sice byla hodnota intenzity vyšší než předchozí varianty, ale jen nepatrně. Proto jsem černou verzi určil za nejvhodnější, čímž jsem získal polohu osy kruhu vzhledem ke středu izolátoru.

Změřené hodnoty intenzit určuje tabulka 2, intenzity jsem odečítal na obou rozích hlavního šroubu a vnějším okraji kruhu, vše v jednotkách V/m.

barva	hlava 1	hlava 2	vnější okraj kruhu
zelená	4,87e6	2,26e6	1,80e6
červená	5,08e6	2,57e6	1,73e6
žlutá	4,91e6	2,35e6	1,72e6
černá	4,85e6	2,40e6	1,60e6

Tabulka 2: Velikosti intenzit jednotlivých zkušebních uspořádání



Obr. 8: 3D vizualizace protikorózní ochrany

Mnou určená varianta má nejnižší hodnotu intenzity na hlavě šroubu, výrazně nižší než ostatní varianty na vnějším okraji kruhu a jen nepatrně vyšší na druhém bodě měření šroubu.

V tomto okamžiku jsem měl kompletně hotový návrh celé ochrany. Na obrázku 8 je celková 3D vizualizace, výkres včetně rozměrů je v příloze.

2.7 Výroba

Technologicky byla výroba kruhu jednoduchá. Pro vlastní těleso kruhu stačilo do kružnice ohnout kulatinu o průměru 10 mm a délce zhruba 300 mm. Plech pro uchycení měl jednoduchý tvar, stačilo ho ve správném místě ohnout do požadovaného úhlu a přivařit tak, aby bočnice zakrývala oba dva konce kulatiny. Tím byla výroba kruhu zčásti hotová.

Dalším krokem bylo pilníkem obrousit nerovnosti, vzniklé při výrobě. Bylo třeba zabrousit hrany uchycovacího plechu a částky železa, které se při svařování uchytily na vnitřní straně kruhu.

Posledním krokem bylo galvanické pozinkování celé ochrany. Při galvanickém zinkování musí být celá technologie procesu volena tak, aby nepříznivě neovlivnila pokovení oceli. Toto by se projevilo pronikavým snížením houževnatosti a pokovená ocel by se jevila jako silně zkřehnutá a při poměrně malém mechanickém namáhání pokovených součástí by docházelo k lomu. Technologický postup sestává z několika kroků:

- hrubé odmaštění
- oplach ve vodě

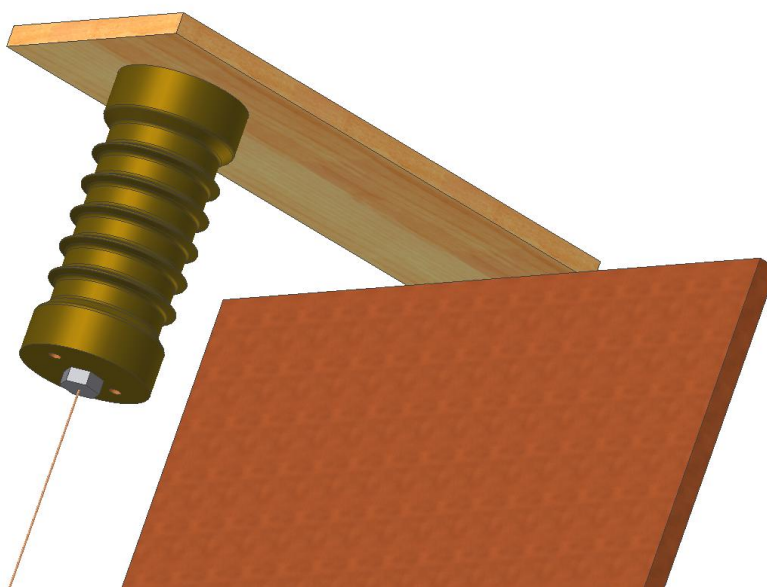
- elektrolytické čištění
- oplach vodou
- moření, dekapování
- oplach vodou
- pokovování
- oplach vodou
- teplý oplach
- sušení

Výsledkem je kompletně pokovená ochrana bílým zinkem, odolná proti korozi a s dostatečnou mechanickou pevností.

2.8 Příprava modelu

Abych mohl věrohodně simulovat funkci protikorózní ochrany, musel jsem přepracovat uchycení vodiče na izolátoru. Původní stav napínání vodiče pružinou nebyl pro simulaci zrovna nejvhodnější. Abych mohl snadno provést simulaci, musel jsem dostat vodič do podélné osy celého modelu. To jsem zrealizoval v několika krocích:

- zkrátil jsem kotvící šroub na délku cca 16 mm a zahladil otřepy, vzniklé při řezání přes závit
- provrtal jsem šroub v jeho podélné ose vrtákem velikosti 2 mm
- do vzniklé díry jsem prostrčil lankový měděný vodič o průřezu 1,5 mm²
- konec vodiče jsem napájel přímo k šroubu tak, aby spoj vydržel namáhání vzniklé při šroubování, kdy se vodič bude napínat

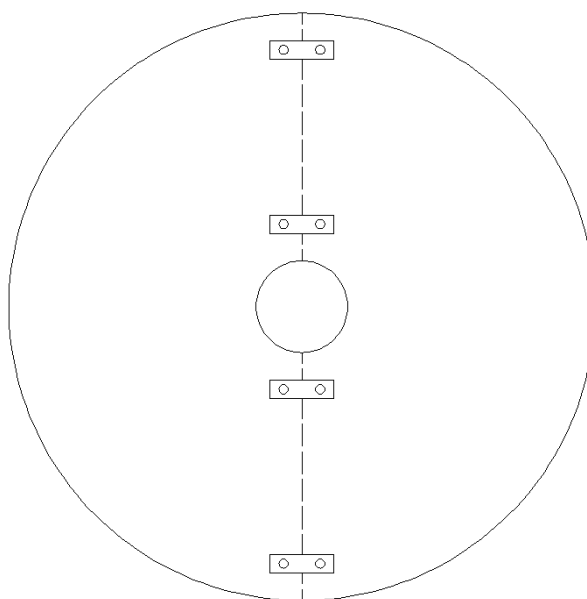


Obr. 9: Úprava modelu

Tím jsem snadno a efektivně zajistil polohu vodiče přímo v ose izolátoru, viz obrázek 9 z modelu.

Dalším problémem byla blízkost zemnicí desky. Koróna vzniká v místech s vysokou intenzitou elektrostatického pole. Připevněním protikorónové ochrany by se vzdálenost mezi potenciálem a zemí zmenšila, čímž by se na povrchu protikorónové ochrany směrem k uzemněné desce zvýšila intenzita pole. Proto jsem musel provést další úpravu – na těleso izolátoru přidat uzemněnou kruhovou desku, která bude rovnoměrně ovlivňovat rozložení elektrického pole v axiálním směru.

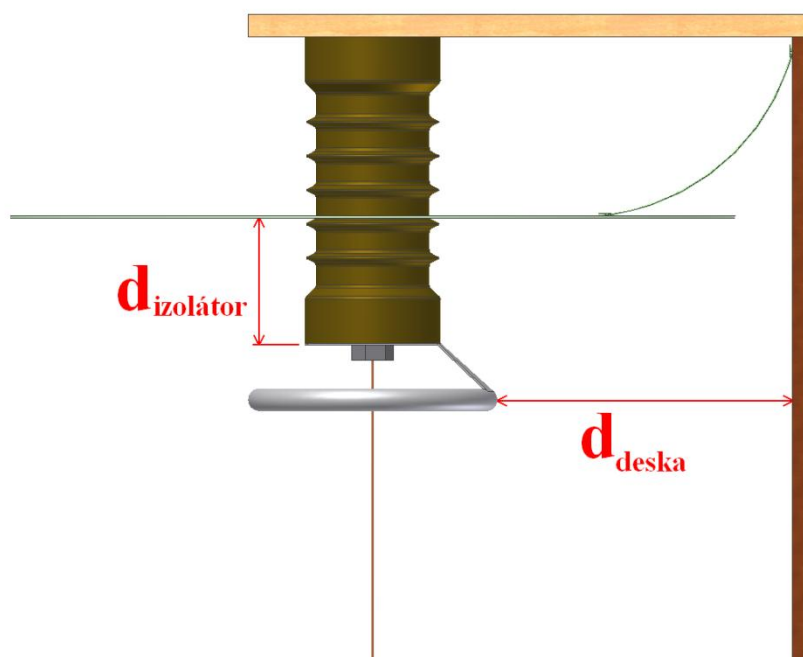
Polohu izolátorové desky jsem musel volit tak, aby vzdálenost mezi potenciálem a deskou byla menší než vzdálenost mezi vnějším okrajem kruhu a zadní zemnicí deskou. Izolátorovou desku jsem vodičově propojil se zadní zemnicí deskou. Izolátorová deska je rozříznuta po celé své délce na dva stejné díly a spojena čtyřmi dvojicemi šroubů, jak je znázorněno na obrázku 10. Tím jsem pro potřeby simulací dostatečně eliminoval vliv zadní zemnicí desky. Vše je znázorněno na obrázku 11 včetně odpovídajícího popisu obou vzdáleností.



Obr. 10: Izolátorová zemnicí deska

Podmínka popsaná ve výše uvedeném odstavci se dá zapsat jednoduše jako $d_{\text{izolátor}} < d_{\text{deska}}$. Ačkoliv by zemnicí deska izolátoru mohla být i výše, rozhodl jsem se ji umístit na druhou stříšku izolátoru. Je to z toho důvodu, že čím je blíže k elektrickému potenciálu, tím má větší vliv na rozložení elektrického pole. V tomto případě je minimální velikost vzdálenosti $d_{\text{izolátor}}$ omezena pouze přeskokovým napětím.

Aby došlo na této vzdálenosti k přeskoku, musela by velikost napětí překročit hodnotu U_p , kterou jsem stanovil měřením.



Obr. 11: Popis vzdáleností v modelu

2.9 Měření přeskokového napětí

Protože se nejedná o žádný modelový příklad, pro který by se přeskokové napětí dalo stanovit výpočtem, musel jsem ho určit měřením.

Celkem jsem měřil tři případy:

- se všemi šrouby na izolátorové desce
- pouze s vnějšími šrouby na izolátorové desce
- bez izolátorové desky

Měření jsem pro každý případ prováděl pětkrát – čím vyšší četnost měření, tím vyšší přesnost ke skutečné hodnotě.

Po přípravě modelu jsem pomalu zvyšoval napětí, dokud nedošlo k přeskoku. Po každém přeskoku bylo nutno chvíli počkat, aby v okolí modelu nezůstaly žádné zbytkové ionty, které by ovlivnily další měření.

V prvním případě docházelo k přeskoku mezi kruhem a vnitřními šrouby izolátorového plechu. Protože vnitřní šrouby evidentně velkou měrou ovlivňovaly rozložení pole, po naměření pěti hodnot jsem upravil model – vyndal jsem vnitřní šrouby. Při měření bez vnitřních šroubů docházelo ke vzniku výbojů a přeskoku po povrchu tělesa izolátoru. Tím se zpětně dokázala předchozí úvaha o ovlivňování pole šrouby. V posledním případě jsem měřil přeskovou napětí bez izolátorové desky, zde docházelo k přeskoku mezi kruhem a zadní zemnicí deskou.

Všechna naměřená přesková napětí jsou v tabulce 3.

měření	U_p [kV]		
	se šrouby	bez šroubů	bez izolátorové desky
1	31	28	60
2	27,1	28,8	61,2
3	28	28,6	62
4	27,5	28,5	60,9
5	27,9	28,6	60,4
průměr	28,3	28,5	60,9

Tabulka 3: Naměřená přesková napětí

Pro všechny tři případy jsem určoval i výdržné napětí $U_{výdrž}$, tj. napětí, při kterém bezpečně nedojde k přeskoku.

$U_{výdrž}$ [kV] \approx 2 minuty		
se šrouby	bez šroubů	bez izolátorové desky
25	23	54

Tabulka 4: Výdržná napětí

Jako první jsem zkoušel výdržné napětí pro sestavu se šrouby. Nastavil jsem napětí na 25 kV a po dobu dvou minut jsem sledoval, jestli nedojde k přeskoku. K přeskoku sice nedošlo, ale docházelo k silnému sršení, takže jsem pro zkoušení bez šroubů toto napětí snížil na 23 kV. Sršení ve velké míře zmizelo a projevovala se pouze koróna, která se začíná objevovat zhruba okolo 17 kV. Pro třetí měření jsem zkoušel výdržné napětí 54 kV, zde to již bylo naprosto bez rizika přeskoku.

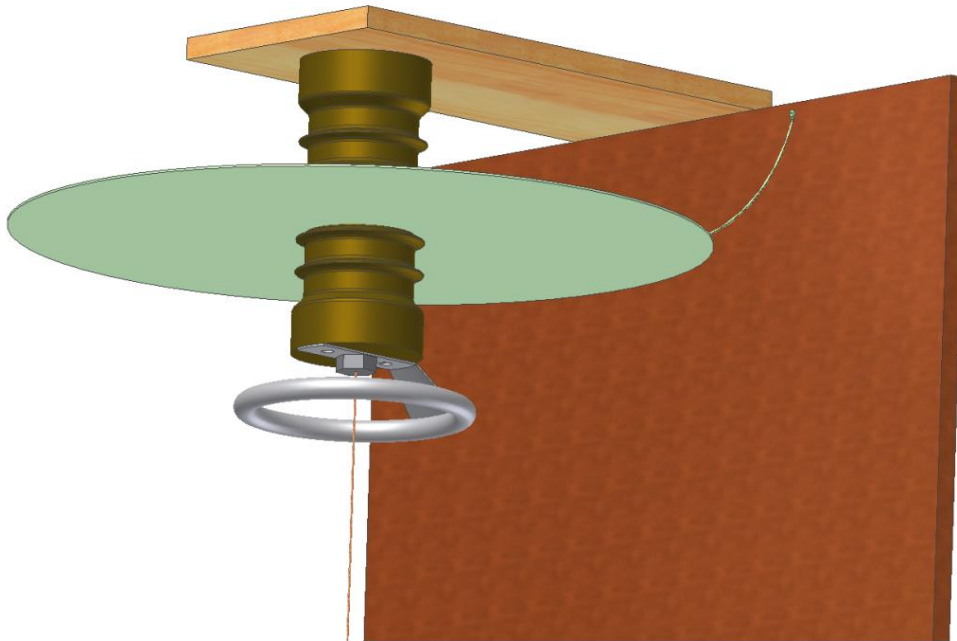
Určení maximálního výdržného napětí je důležité pro pozdější měření na modelu. Hodnoty uvedené v tabulce jsou maximální hodnoty, které by neměly být při žádném měření překročeny. Pokud by byly překročeny a v průběhu měření by došlo k přeskoku, hrozilo by poškození nebo destrukce měřících zařízení.

Všechny výše uvedené hodnoty byly naměřeny při podmínkách, uvedených v tabulce 5.

	při měření	normální
tlak	97,84 kPa	101,325 kPa
teplota	24,6 °C	20 °C
vlhkost	16,3 %	11 %

Tabulka 5: Podmínky při měření

Po proměření všech nutných parametrů je model připraven pro měření ztrát, celková vizualizace je na obrázku 12.



Obr. 12: Finální podoba sestavy

3 Simulace a měření funkce ochrany

3.1 Agros 2D

Agros2D je simulační program, určený pro řešení několik druhů fyzikálních polí. Je napsán v programovacím jazyce C++, pro řešení parciálních diferenciálních rovnic během výpočtu využívá knihovnu Hermes2D [7]. Tato knihovna je založena na hp-FEM, což je adaptivní metoda konečných prvků s vyšší přesností. Tento software vyvíjí Katedra teoretické elektrotechniky FEL ZČU pod vedením doc. Ing. Pavla Karbana, Ph.D..

Dnes se již běžně před výrobou nového zařízení provádí simulace jeho fyzikálních polí a s nimi spojené jevy. To nám umožňuje celý vývoj optimalizovat, zlevnit a zkvalitnit. Provede se totiž simulace několika možných variant výrobku a postupně se vybere ta neoptimalnější varianta bez potřeby fyzicky vyrábět jednotlivé prototypy různých vývojových stadií.

Agros2D umí řešit několik typů fyzikálních polí:

- elektrostatické pole
- proudové elektrické pole
- magnetické pole (ustálený stav, harmonická analýza, přechodový děj)
- teplotní pole (přechodný děj)
- strukturální mechanika
- nestlačitelné proudění (ustálený stav a přechodový děj) – ve vývoji
- vysokofrekvenční pole – ve vývoji

Aplikace umožňuje řešit zadané problémy ve 2D kartézské nebo osově symetrické rovině a celá je tvořena několika samostatnými moduly:

- preprocesor
 - slouží k nadefinování geometrie problému, definici materiálů a jejich vlastností
- procesor
 - diskretizuje geometrii pomocí programu Triangle, tzn. že vytváří trojúhelníkovou síť po celé geometrii
 - lze zapnout hp-adaptivitu, tzn. že automaticky zjemní síť a řád polynomu na daném elementu podle potřeby
 - získané soustavy rovnic řeší algoritmem zapsaným v knihovně UMFPACK z balíku SuiteSparse [8]

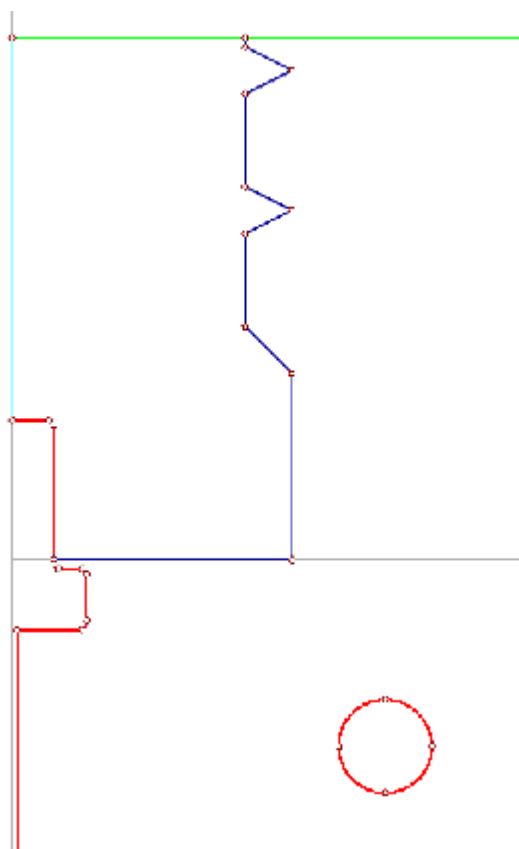
- postprocessor
 - analyzuje vypočtená data a zobrazuje je pomocí vektorů či barevných map v podobě 2D nebo 3D grafů
 - umožňuje další zpracování dat jako povrchové nebo objemové integrální veličiny
 - exportuje data ve formě CSV, Huml nebo v případě časově proměnných veličin jako sérii obrázků do animace

Agros2D využívá velké množství open-source knihoven, jako například již zmíněná Hermes2D, Triangle, SuiteSparse a další [9].

3.2 Návrh geometrie

Abych mohl vytvořit simulaci, musel jsem nejprve navrhnout geometrii celého problému. Díky tomu, že vodič je napnutý přímo v ose symetrie celé soustavy, mohl jsem celý problém řešit jako osově symetrický. Tím se celá simulace zjednodušila, stejně tak jako pak následné zpracování výsledku. Simulace jsem vytvářel dvě pro dvě různé sestavy modelu:

- izolátor pouze s izolátorovým zemnicím plechem
- izolátor se zemnicím plechem a přimontovaným kapacitním kruhem



Obr. 13: Geometrie v Agrosu

Geometrie jsou téměř stejné, pouze u druhého problému je navíc kapacitní kruh. Nákres druhé geometrie je na obrázku 13.

S návrhem geometrie samozřejmě souvisí i definice okrajových podmínek. První podmínkou je bezesporu elektrický potenciál. Ten je v programu nastaven na 23 kV a v geometrii je respektován nastavením této podmínky na hranice, které jsou v obrázku vyznačeny červenou barvou. Opačná podmínka je uzemnění, kde je potenciál roven nule – v obrázku zelená barva. Třetí podmínkou je Neumannova. Pro tu platí, že povrchová hustota náboje je rovna nule. Podmínka lze zapsat rovnicí 3.2.1.

$$\sigma = \mathbf{D}_n = \epsilon \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}_0} = \sigma_0 \quad (3.2.1)$$

takže $\sigma_0 = 0 \text{ C/m}^2$. Tato podmínka je v obrázku vyznačena světle modrou barvou. Stejně tak je tato podmínka definována na vnějším okraji geometrie.

Dále jsem musel nadefinovat materiály jednotlivých prvků. Program Agros umožňuje přímo definovat dva parametry materiálu. Je to relativní permitivita ϵ_r a objemová hustota náboje ρ . Vytvořil jsem si celkem 3 materiály:

- vzduch - $\epsilon_r = 1,00054$ a $\rho = 0 \text{ C/m}^3$
- izolátor - $\epsilon_r = 6,5$ a $\rho = 0 \text{ C/m}^3$
- vodič $\epsilon_r = 10e6$ a $\rho = 0 \text{ C/m}^3$

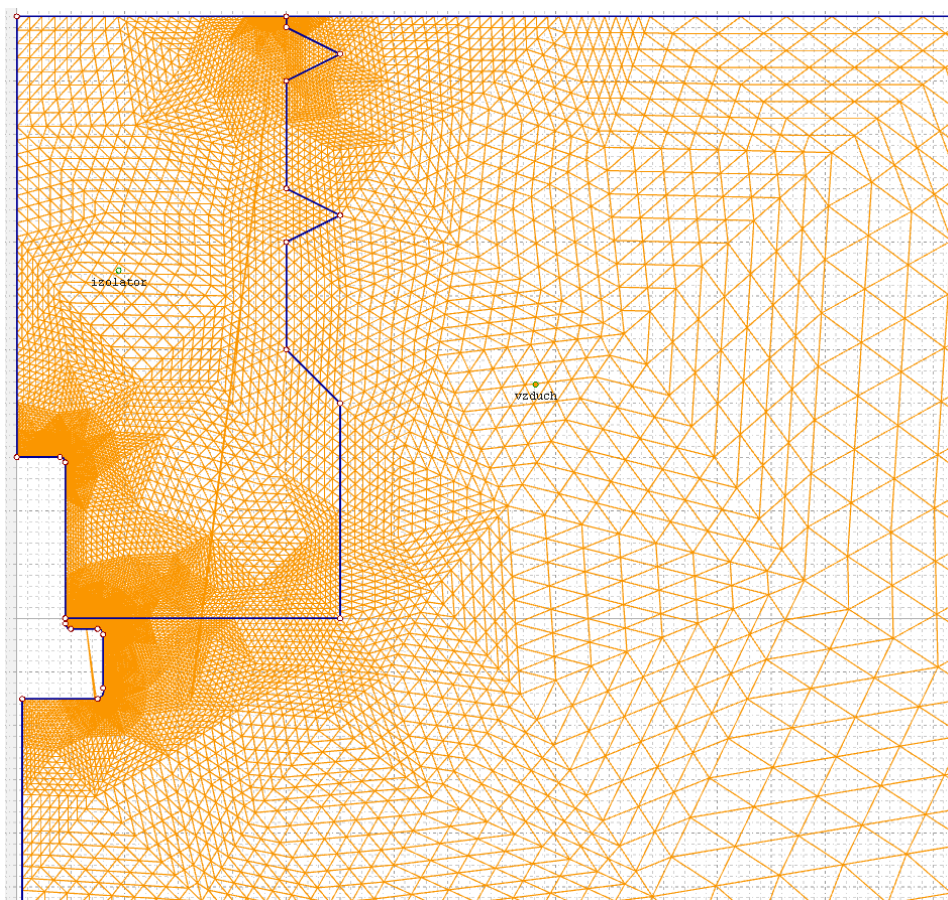
Každý materiál jsem dal do jiné části geometrie. Materiál vodiče na kruh a šroub s vodičem, materiál izolátor na těleso izolátoru a materiál vzduch do vnějšího prostředí. Tím je definice všech podmínek a materiálů hotová a mohl jsem pokračovat k výpočtu simulace.

3.3 Simulace

Simuloval jsem dva případy:

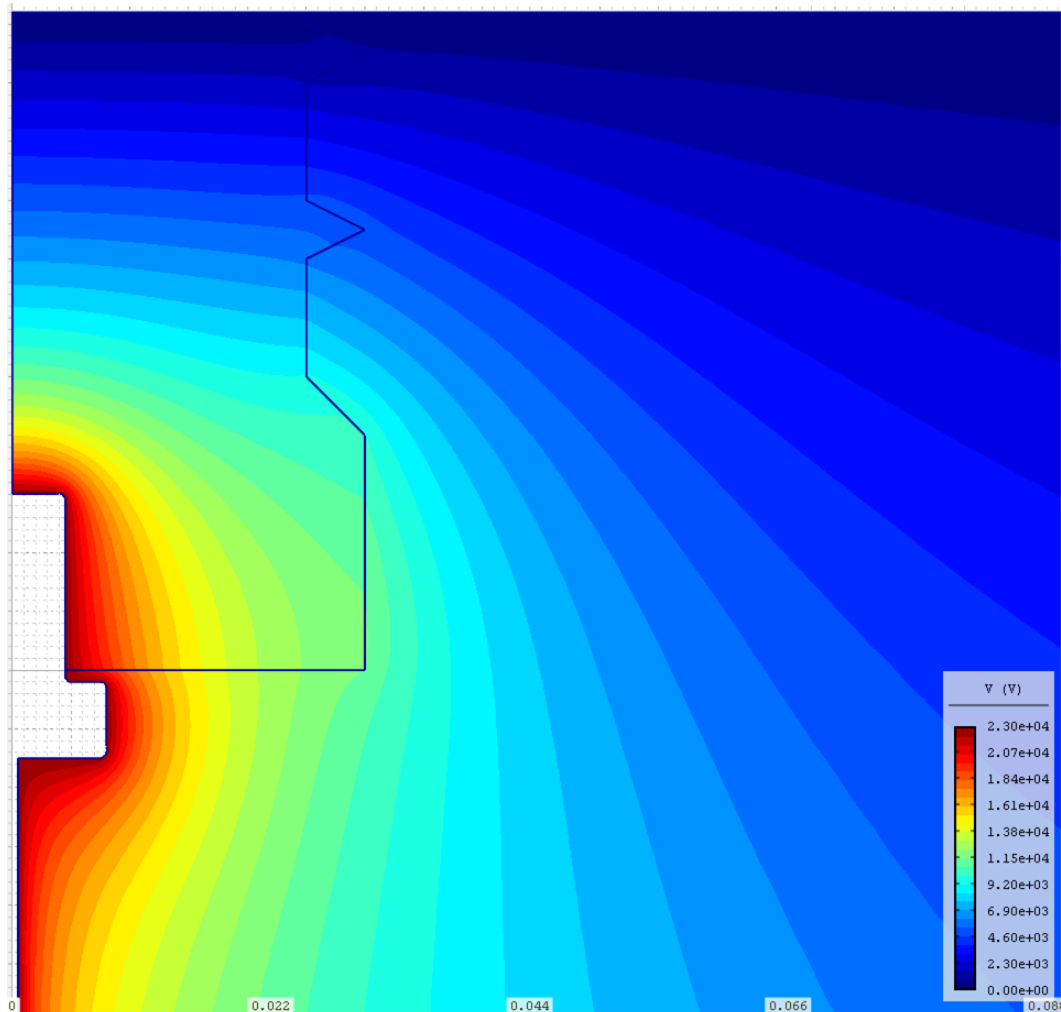
- model s izolátorovým plechem
- model s izolátorovým plechem a kapacitním kruhem

Po složení geometrie je nutno zkoumanou oblast zdiskretizovat meshovací mřížkou. Zvolil jsem trojúhelníkovou síť s počtem zjemnění 3 a polynomy řádu 2, bez použití adaptivity. Geometrie po diskretizaci je na obrázku 14. Je vidět, že místa, kde se předpokládá složité rozložení pole, jsou zdiskretizována velice jemně.



Obr. 14: Zdiskretizovaná geometrie, první případ

Po vytvoření trojúhelníkové sítě jsem přistoupil k výpočtu simulace. První zobrazovaným výsledkem je rozložení skalárního elektrického potenciálu – obrázek 15.

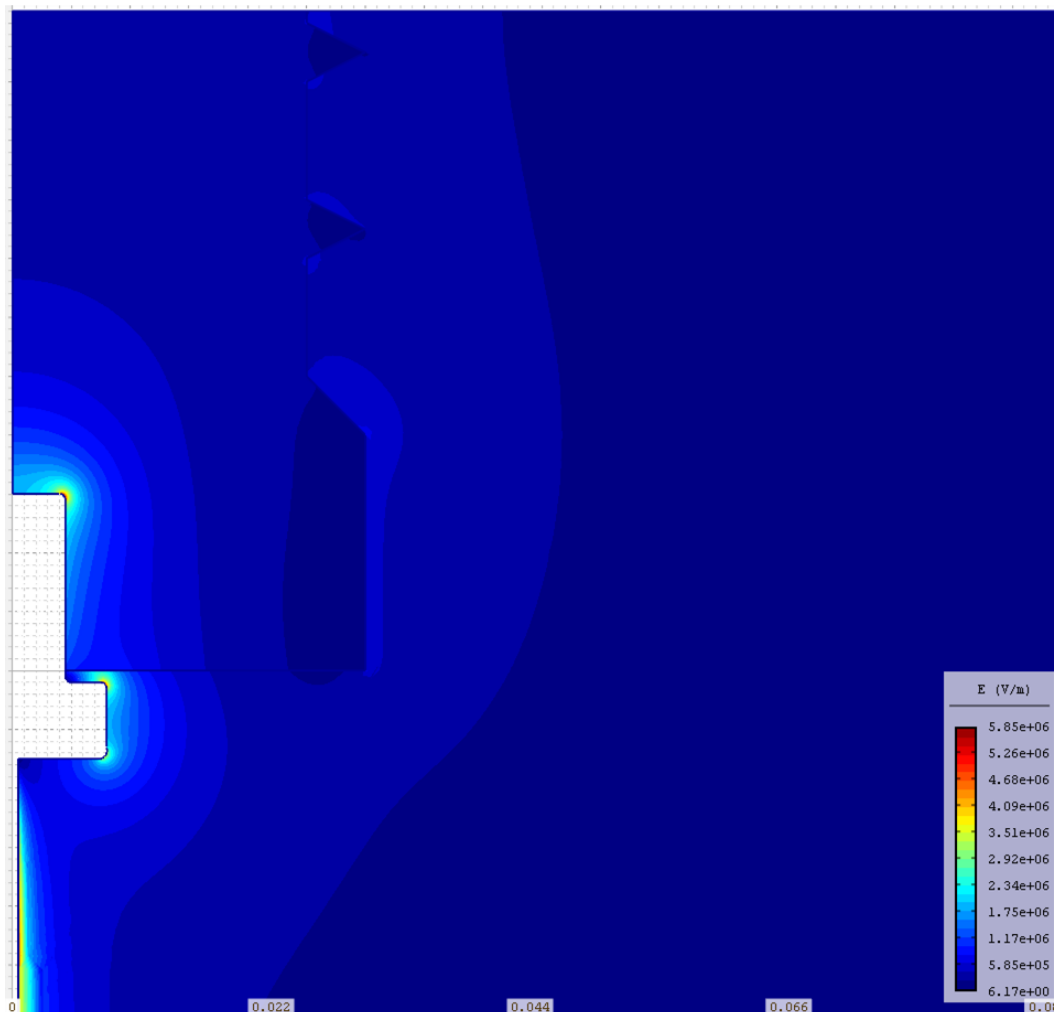


Obr. 15: Rozložení skalárního elektrického potenciálu

Zde jsou barevně odděleny ekvipotenciály – červeně je plné napětí 23 kV, tmavě modrou barvou je znázorněno uzemnění.

Pokud bych zobrazoval i vektory elektrostatického pole, všechny by směřovaly kolmo na ekvipotenciály směrem od šroubu k uzemněné izolátorové desce.

Na dalším obrázku je zobrazen modul intenzity elektrického pole. To je právě veličina, kterou se snažím snížit co možná nejvíce.



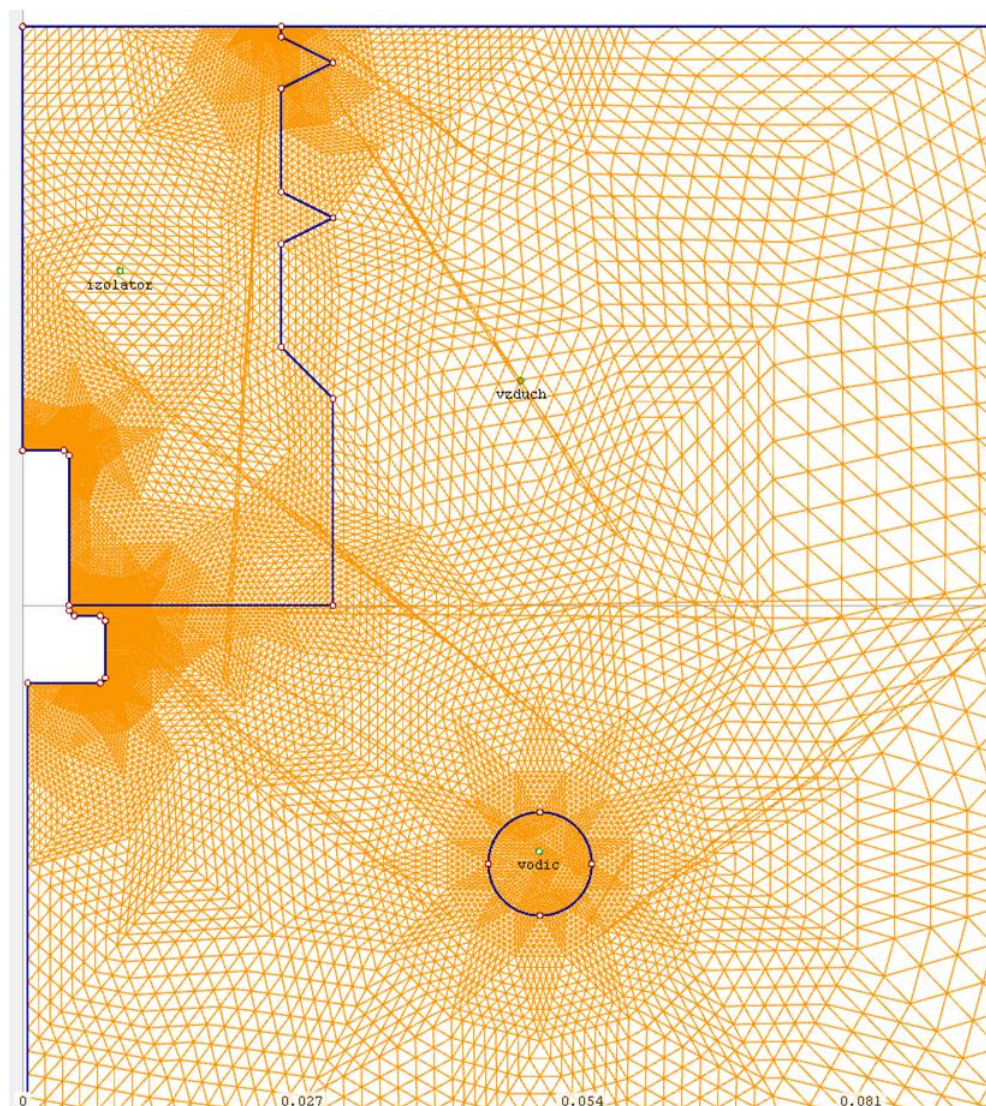
Obr. 16: Modul intenzity elektrického pole

Zatímco rozložení skalárního elektrického potenciálu se dalo relativně snadno předvídat, zde je již situace zajímavější. Nejvyšší hodnota na celém modelu je $5,85e6$ V/m, přičemž na hlavě šroubu tato intenzita dosahuje hodnoty přibližně $5e6$ V/m.

Celková energie naakumulovaná v modelu je 1,057 mJ. Vzduchové prostředí se na této hodnotě podílí hodnotou 0,4975 mJ, energie v tělese izolátoru hodnotou 0,5595 mJ.

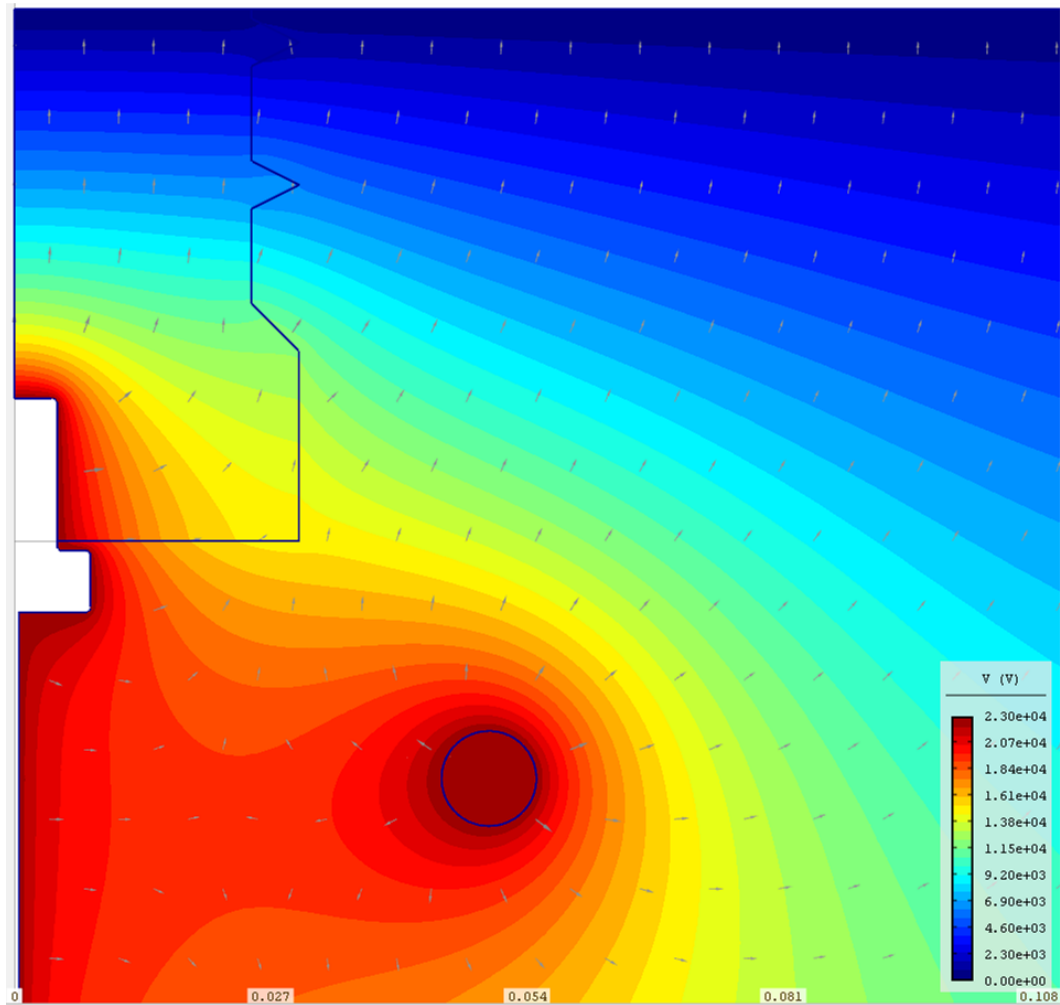
Tím je simulace pro první případ – model s izolátorovým plechem – vyřešena a následuje simulace s kapacitním kruhem.

Prvním obrázkem druhého případu je rozložení meshovací mřížky. Mřížka je částečně stejná, jen se zjemnila v okolí geometrie kapacitního kruhu.



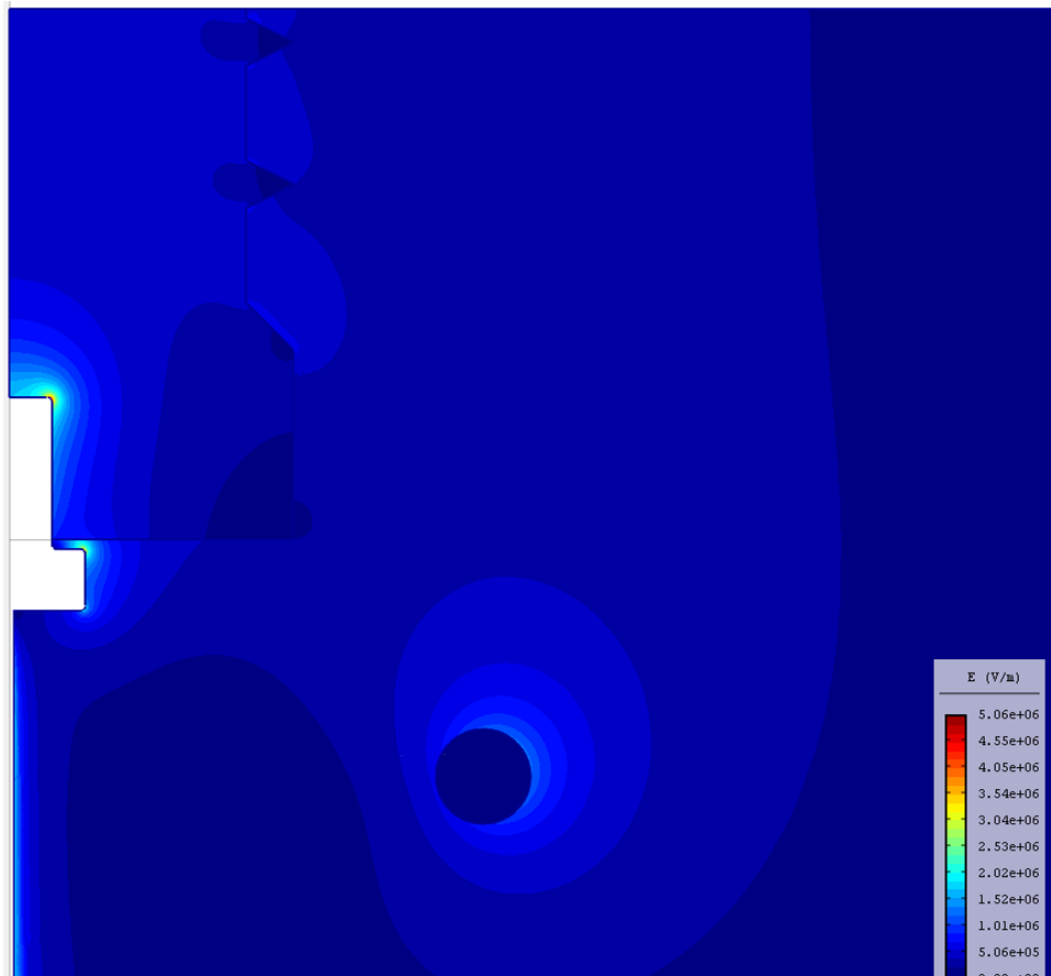
Obr. 17: Zdiskretizovaná geometrie, druhý případ

Na dalším obrázku je opět rozložení skalárního elektrického potenciálu včetně vektorů elektrostatického pole. Zde se potvrzuje předchozí úvaha o kolmosti těchto vektorů na jednotlivé ekvipotenciály pole. Je zde názorně vidět výrazné ovlivnění rozložení pole vlivem kapacitního kruhu.



Obr. 18: Rozložení skalárního elektrického pole s kapacitním kruhem

Nejdůležitějším výsledkem simulace je následující obrázek zobrazující modul intenzity elektrického pole s připojeným kapacitním kruhem.



Obr. 19: Modul intenzity s kapacitním kruhem

Nejvyšší hodnota intenzity v celém modelu je $5,06e6$ V/m. Oproti předchozímu případu zde došlo ke snížení vrcholové hodnoty o $0,79e6$ V/m. Na hlavě šroubu se velikost intenzity pohybuje okolo hodnoty $3,85e6$ V/m, což je proti předchozímu případu výrazné snížení.

Celková energie naakumulovaná v modelu je $1,688$ mJ s následujícími podíly:

- izolátor – $0,5269$ mJ
- kapacitní kruh – $2,249e-24$ J
- vzduchové okolí – $1,162$ mJ

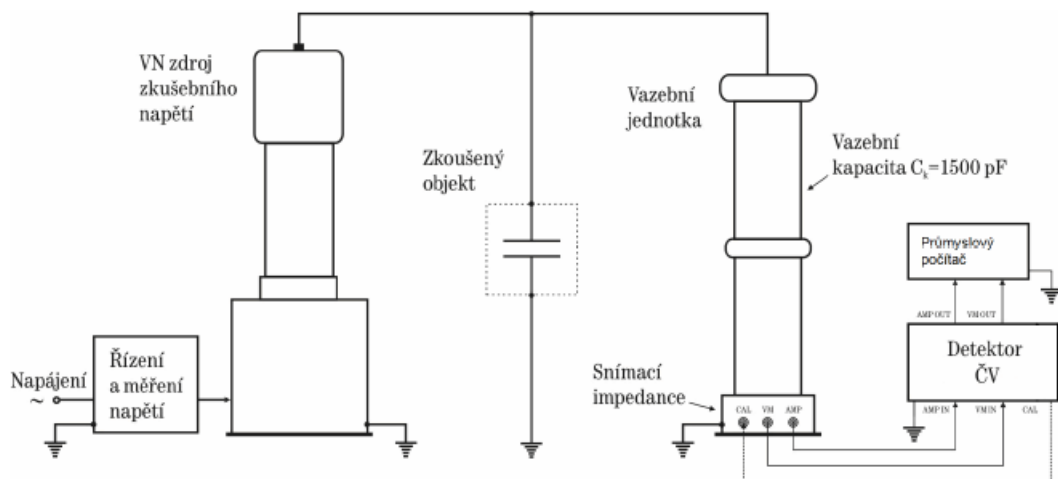
3.4 Měření funkce ochrany – částečné výboje

3.4.1 Teorie

Druhým ověřením funkce ochrany bylo měření částečných výbojů modelu.

Částečné výboje se projeví jako malé a velmi krátké impulsy, které jsou superponované na průběh kapacitního proudu, který prochází zkoušeným objektem. Tyto impulsy se při určitém napěťovém zatížení pravidelně opakují. Při střídavém elektrickém poli se mění polarita proudových rázů v závislosti na okamžitém napětí.

Proudové impulsy vyvolané částečnými výboji se v obvodu projeví jako přerozdělení náboje na příslušných kapacitách. Zdroj pak musí do obvodu dodat náboj, který kompenzuje úbytek napětí vyvolaný výbojem. K vyhodnocení výbojů se využívá také to, že charakter výbojů na obrazovce detektoru je závislý na místě a podmínkách jejich vzniku.

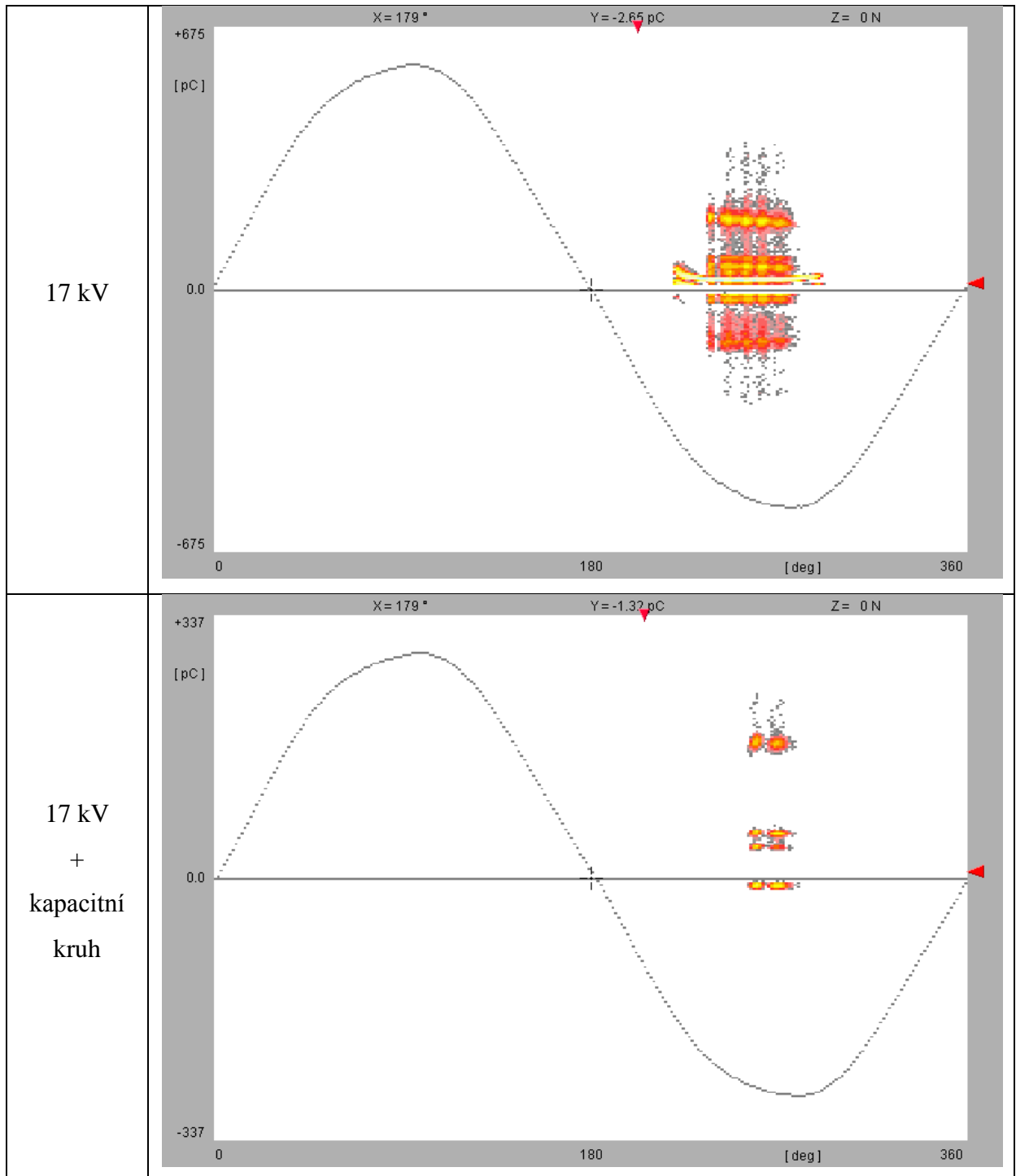


Obr. 20: Schéma měření částečných výbojů, převzato z [10]

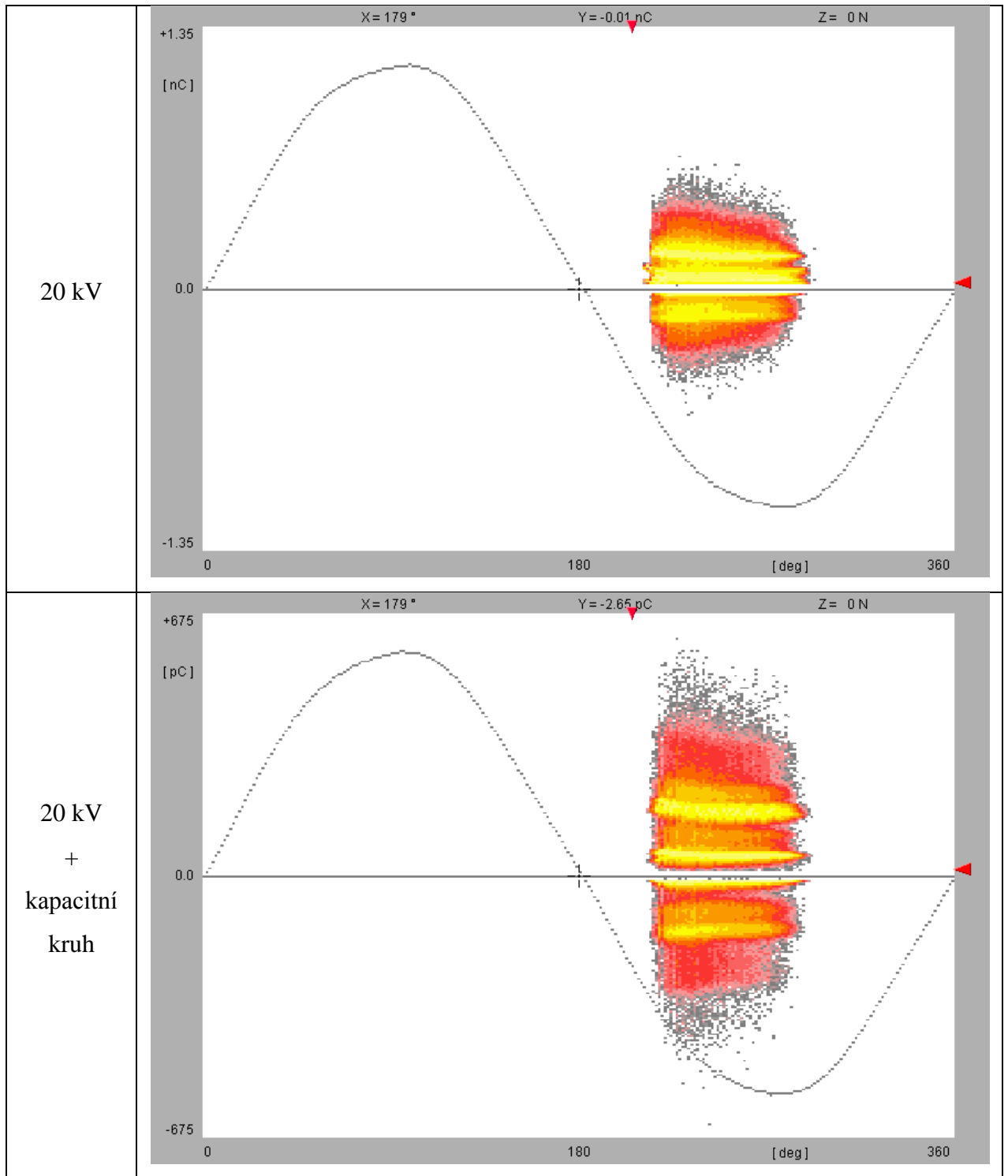
Celkové zapojení je na obr. 20. K napájení slouží transformátor částečných výbojů s regulací napětí pro spolehlivé rozpoznání zapalujících a zhášejících se částečných výbojů. Měřený objekt se připojuje paralelně ke zdroji a k vazební kapacitě. Na spodní části vazební kapacity je umístěna měřicí impedance Z_m . Impulzy se vedou od integračního obvodu k detektoru, tvořenému zesilovačem, vestavěným kalibrátorem a zobrazovací jednotkou s eliptickou základnou (sinusové napětí zkušebního zdroje), na které jsou superponovány pulzy částečných výbojů. Kalibrátor slouží ke kalibraci zkušební obvodu pomocí impulsu o známé velikosti náboje. Citlivost metody stoupá, je-li vazební kapacita větší než kapacita zkoušence, což ale v praxi nelze vždy [11].

3.4.2 Měření

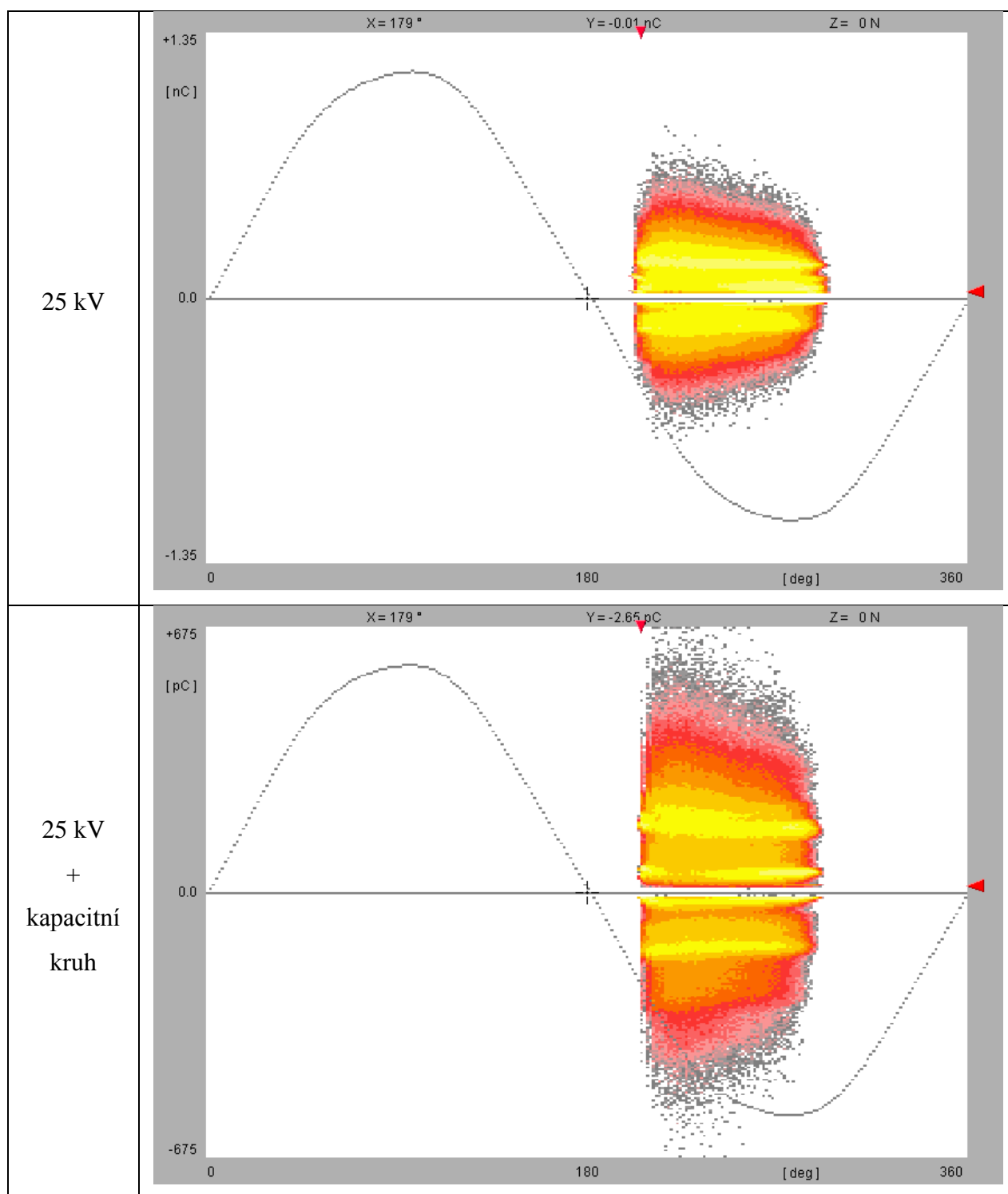
Měření jsem prováděl pro samotný izolátor pro 6 různých napětí – 17 kV, 20 kV, 25 kV, 30 kV, 40 kV a 50 kV. Po proměření uvedených napětí a záznamu částečných výbojů jsem k modelu připojil kapacitní kruh. Izolátorový zemnicí plech jsem (vzhledem k velikosti výdržného napětí – tabulka 4) do sestavy nedával. Poté jsem celé měření opakovl.



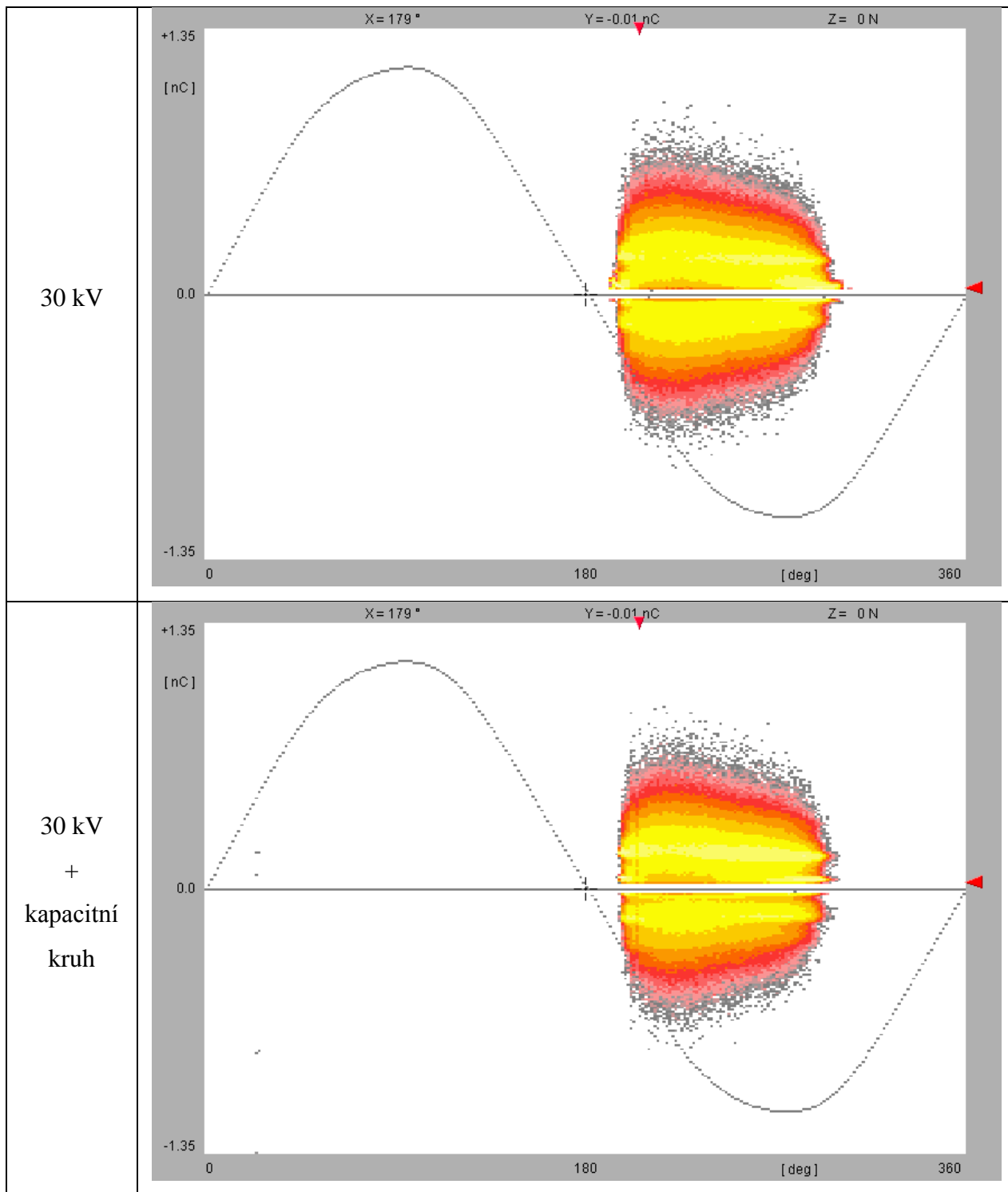
Tabulka 6: Porovnání měření částečných výbojů I - 17 kV



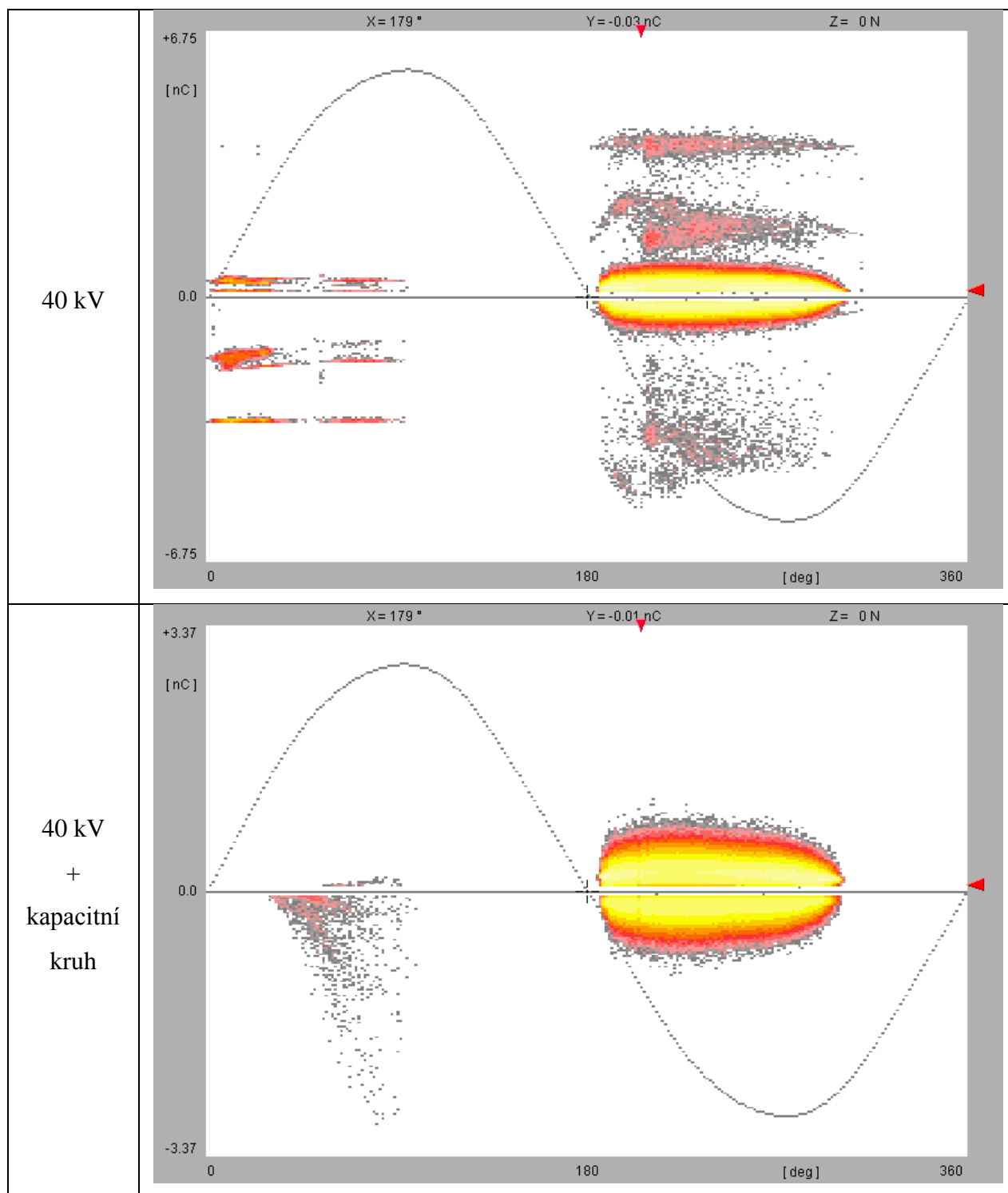
Tabulka 7: Porovnání měření částečných výbojů II - 20 kV



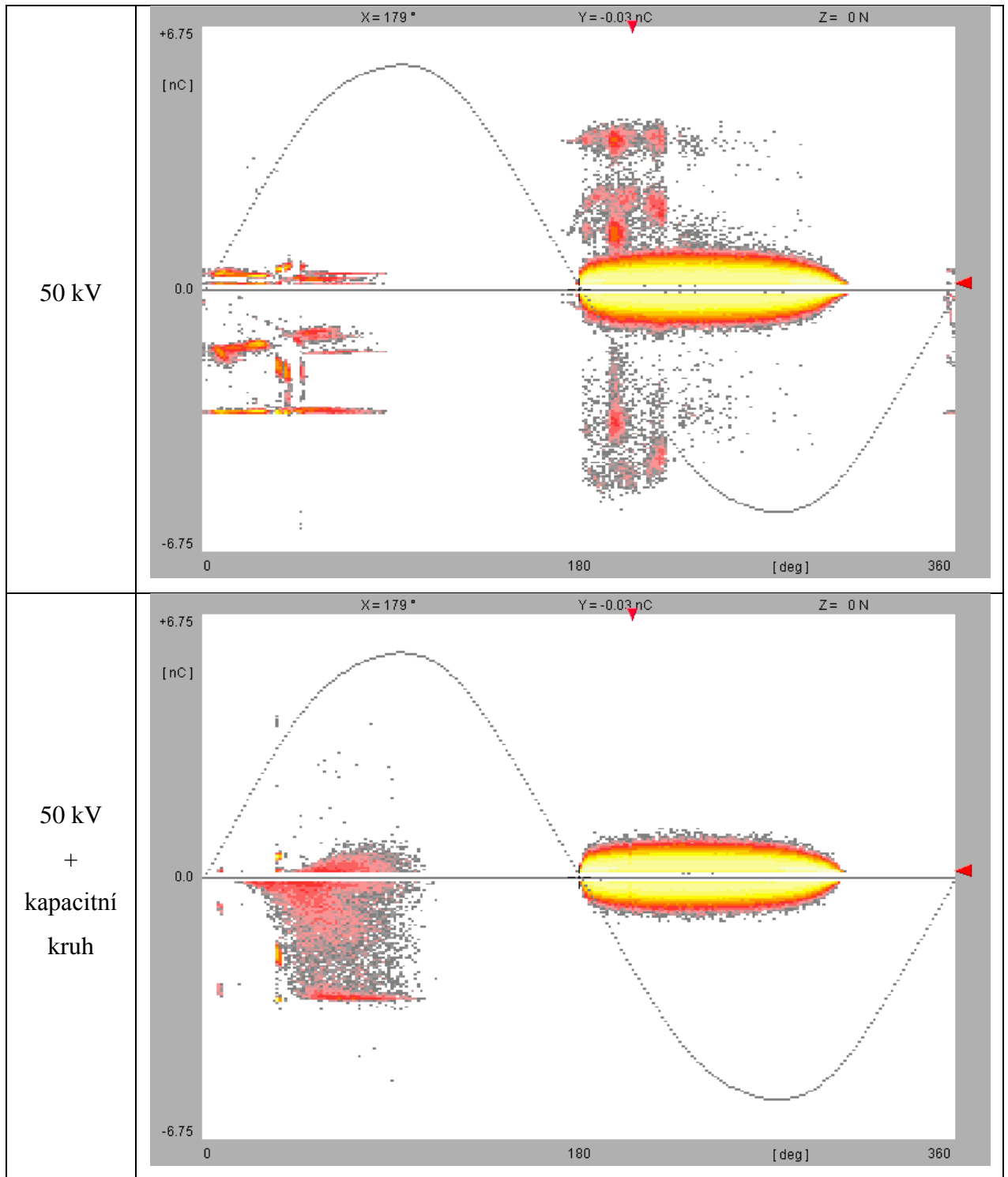
Tabulka 8: Porovnání měření částečných výbojů III - 25 kV



Tabulka 9: Porovnání měření částečných výbojů IV - 30 kV



Tabulka 10: Porovnání měření částečných výbojů V - 40 kV



Tabulka 11: Porovnání měření částečných výbojů VI - 50 kV

3.4.3 Shrnutí výsledků

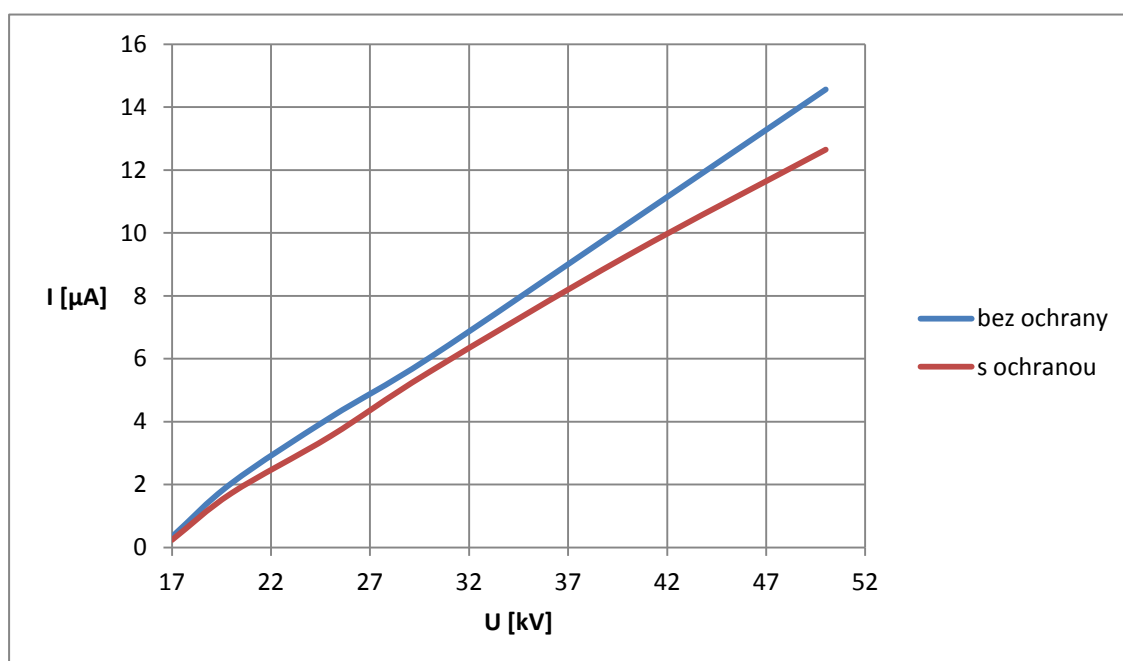
Výsledkem měření jsou obrázky v tabulkách 6 – 11. Na nich je zřetelně vidět rozložení částečných výbojů v čase a jejich četnosti. Nejlépe pozorovatelný rozdíl je u nižších napětí. Pro napětí 17 kV je efekt omezení koróny velmi výrazný. U napětí 20 kV je stále pozorovatelné zlepšení, avšak již ne tak výrazně. Pro napětí 25 kV je ještě lehce patrná snížená četnost částečných výbojů. Pro vyšší napětí již je obalová koróna příliš intenzivní, takže efekt potlačení protikorónovou ochranou již není tak výrazný. Protože se ale bude model běžně používat při napětí daných tabulkou 4 (tj. maximálně do 23 kV), není teoretická snížená účinnost ochrany pro vyšší napětí významným nedostatkem.

3.5 Svodový proud

Dalším měřením bylo určení svodového proudu. Svod jako takový je všeobecně nežádoucí a ideálně by byl svodový proud nulový. Při měření částečných výbojů měřicí souprava zaznamenávala velikost proudu, dodávaného do sestavy vazební kapacitou. Velikost proudu v závislosti na napětí a konfiguraci sestavy udává tabulka 12.

napětí [kV]	bez ochrany [μA]	s ochranou [μA]
17	0,342	0,243
20	2,042	1,728
25	4,136	3,541
30	6,032	5,585
40	10,29	9,284
50	14,56	12,65

Tabulka 12: Svodový proud

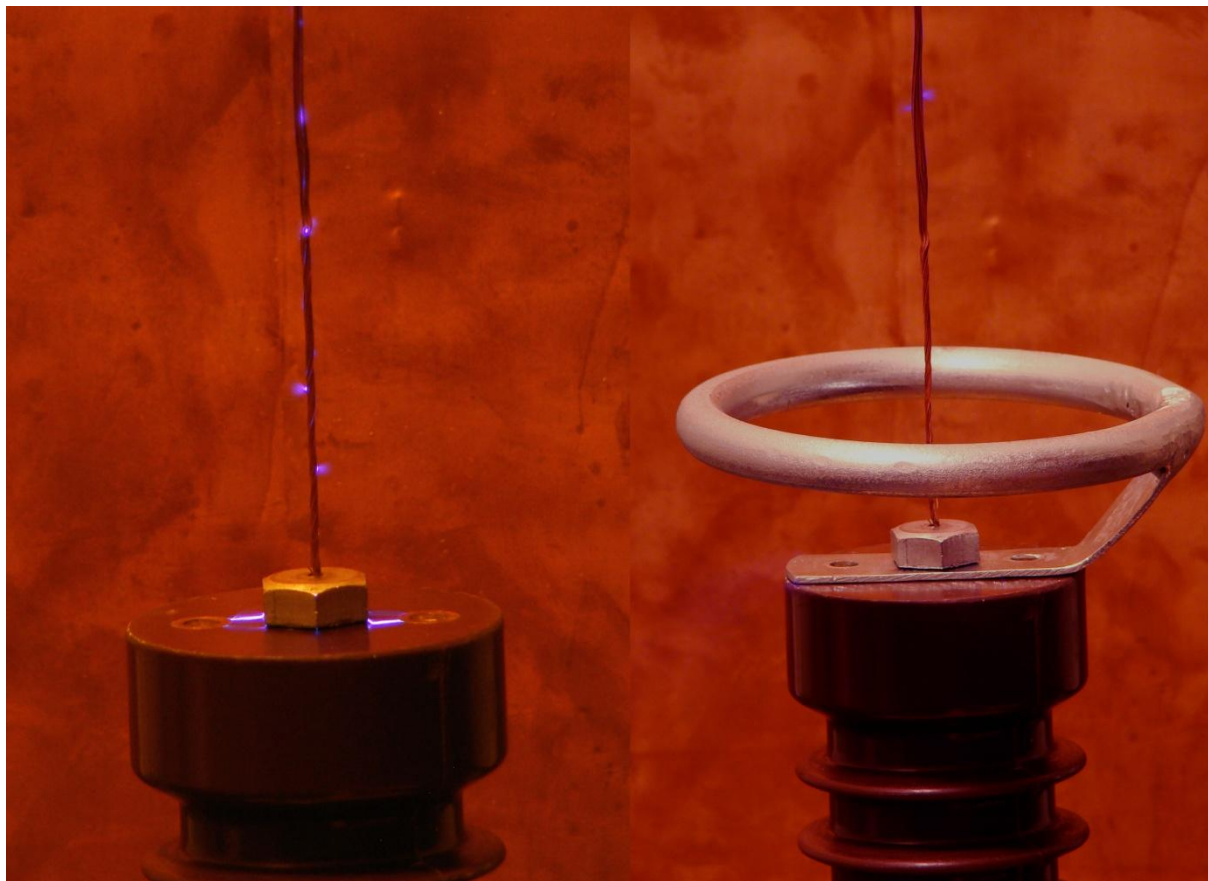


Obr. 21: Svodový proud

Hodnoty z tabulky 12 jsem vynesl do grafu na obrázku 21. Je zde vidět, že při použití protikorónové ochrany došlo ke snížení svodového proudu v celém rozsahu měřených napětí.

3.6 Vizualní ověření funkce ochrany

Kontrolu funkce ochrany jsem prováděl také vizuálně pomocí fotoaparátu. Na model jsem přivedl napětí 25 kV a pomocí fotoaparátu na stativu jsem udělal fotografie konce vodiče s ochranou a posléze i bez ní.



Obr. 22: Vizualní kontrola funkce ochrany

Porovnáním těchto dvou snímků je zřejmé, že při provozu modelu bez ochrany dochází k silné výbojové činnosti na hlavě šroubu, povrchu vodiče i mezi šroubem a pomocnými závity vedle hlavního.

Na snímku s připevněnou ochranou je vidět, že veškerá výbojová činnost v okolí hlavy šroubu zmizela a je jen lehce patrná na vodiči v podstatně větší vzdálenosti, než u sestavy bez ochrany.

3.7 Praktické použití ochrany

Tato protikorónová ochrana má širší možnosti použití než jen pro tento konkrétní model a měření na něm. Její další využití je například při měření částečných výbojů v transformátoru, zobrazené na obrázku 22.



Obr. 22: Ochrana při měření částečných výbojů v transformátoru

Zde se ochrana používá pro redukci koróny na spirálovitém zakončení. Celé zapojení při měření částečných výbojů v dutinách izolace vinutí transformátoru je na obrázku 23.



Obr. 23: Měření částečných výbojů

4 Závěr

V první části práce jsem popsal účel a vybavení laboratoře vysokého napětí FEL ZČU, včetně detailnějšího popisu vybraných důležitých zařízení – transformátorová kaskáda, rázový generátor, zdroj pro měření částečných výbojů a vazební kapacita. Popis obsahuje technické parametry zařízení, případně jejich vnitřní schéma.

Hlavní část práce se zabývá teorií koróny a možnostmi jejího využití a eliminace. Součástí je i teoretický popis jejího vzniku, vzorce pro výpočty ztrát na vedení a možnosti jejího omezení. Dále se v druhé kapitole zabývám návrhem protikorónové ochrany – kapacitního kruhu. V práci je popsána funkce kapacitních kruhů, popis jeho návrhu, výroby a finálního pokovení. K tomu bylo nutno upravit stávající měřicí model, aby se dala přesně určit funkčnost navržené ochrany. Po vyrobení ochrany a úpravě měřicího modelu jsem provedl měření přeskokového napětí a výdržného napětí, abych mohl bezpečně změřit funkci ochrany.

V poslední části práce jsem se zabýval simulací funkce ochrany a poté několika způsoby měření. Provedl jsem simulaci v softwaru Agros2D, která potvrdila funkci ochrany. Dále jsem provedl několik měření. Měření částečných výbojů ukázalo, že ochrana má největší vliv při napětích zhruba do 25 kV, pro vyšší napětí je její efekt slabší. Měřením svodového proudu jsem graficky dokázal nižší velikost svodového proudu modelem při použití ochrany a v poslední řadě jsem také ověřil funkci ochrany vizuálně, porovnáním fotografií, které zachycují výbojovou činnost. Ochrana má i praktické využití při měření částečných výbojů uvnitř transformátoru a věřím, že se její využití v budoucnu rozšíří i na další úlohy.

5 Použitá literatura

- [1] LAURENC, J.: *Laboratoře vysokého napětí a elektromagnetické kompatibility*, dostupné z WWW [13.11.2011]: <<http://home.zcu.cz/~laurenc/>>
- [2] HAEFELY Test Systems: *Impulse Voltage Testing*, dostupné z WWW [17.1.2012]: <<http://www.haefely.com/>>
- [3] TETTEX AG Instruments: Dokumentace ke zdroji částečných výbojů, Basel, Switzerland, 1980
- [4] WHITEHEAD, S.: *Dielectric Breakdown of Solids*, Oxford, Clarendon Press, 1951
- [5] VEVERKA, A.: *Technika vysokých napětí*, SNTL ALFA, Praha 1978
- [6] Pattanadech, N., Potivetkul, S. a Yuttagowith, P.: *Corona Phenomena of Various High Voltage Shielding Types*, International Conference on Power System Technology, Chongqing, 2006
- [7] The hp-FEM Group online documentation, dostupné z WWW [28.11.2011]: <<http://hpfem.org/main/>>
- [8] University of Florida: Department of Computer and Information Science and Engineering, dostupné z WWW [28.11.2011]: <<http://www.cise.ufl.edu/>>
- [9] Agros2D features, dostupné z WWW [28.11.2011]: <<http://agros2d.org/>>
- [10] NAGLMÜLLER, J.: *Projevy koróny a možnosti jejího omezení*, bakalářská práce, ZČU 2010
- [11] Laurenc, J.: *přednášky z předmětu Technika vysokého napětí*, Plzeň, 2009-2010

6 Seznam příloh

6.1 Fotodokumentace vybraných zařízení

6.1.1 Rázový generátor

6.1.2 Transformátorová kaskáda

6.1.3 Vazební kapacita

6.1.4 Zdroj částečných výbojů

6.2 Vnitřní schéma zdroje částečných výbojů

6.3 Výkresy protikorónové ochrany

6.1 Fotodokumentace jednotlivých zařízení

6.1.1 Rázový generátor



6.1.2 Transformátorová kaskáda



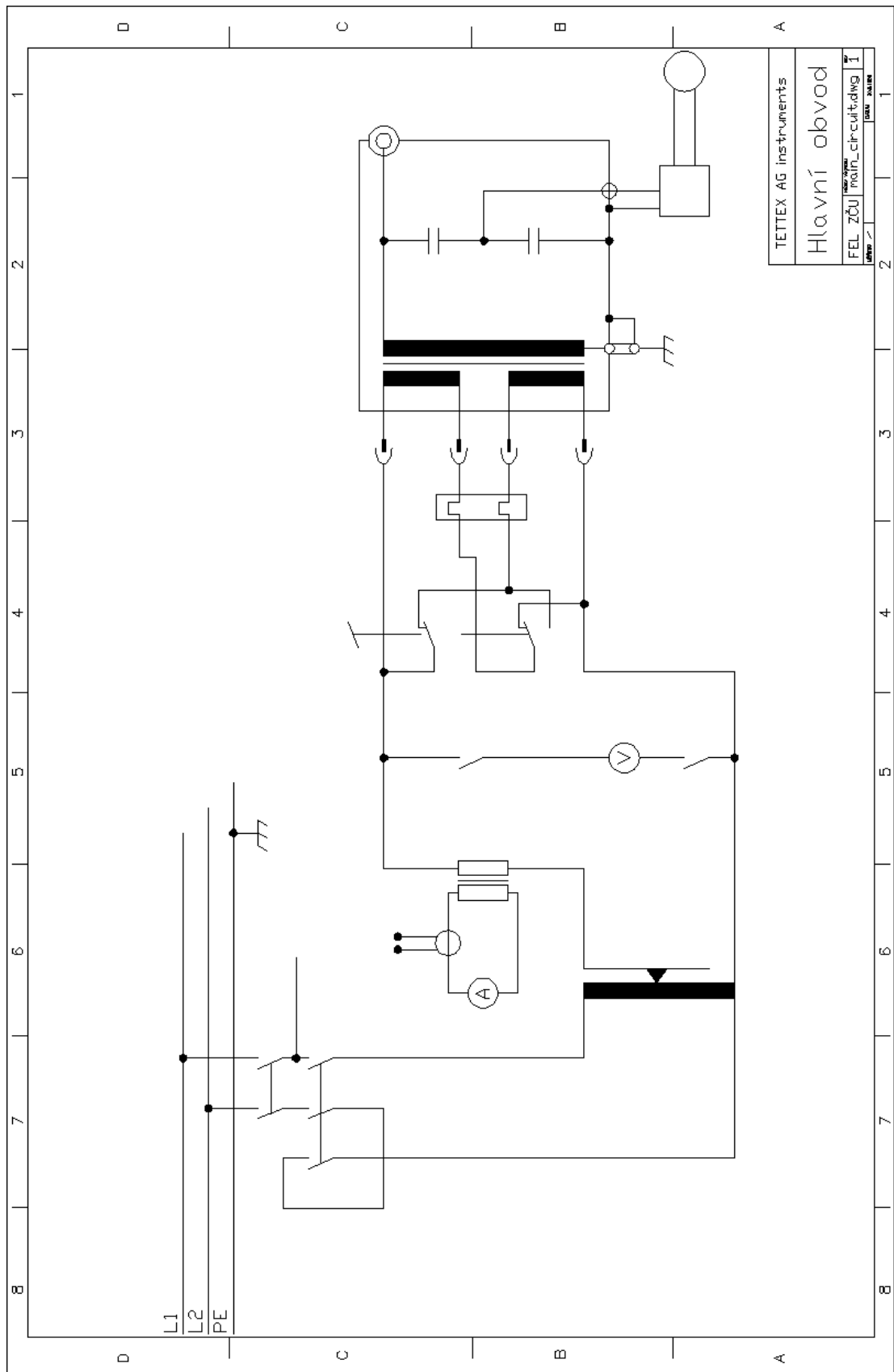
6.1.3 Vazební kapacita



6.1.4 Zdroj částečných výbojů



6.2 Schéma hlavního obvodu zdroje částečných výbojů



6.3 Výkres protikorózní ochrany

