

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Kontrola kvality izolačního systému zhášecích tlumivek

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na popis funkce a konstrukce izolačního systému zhášecích tlumivek, ověření kvality izolačního systému zaměřenou na problematiku vzniku částečných výbojů během zkoušek zhášecích tlumivek. Popisuje metodiku měření a vyhodnocování výbojové činnosti na zhášecích a kombinovaných tlumivkách vyráběných ve firmě EGE, spol. s.r.o. sídlící v Českých Budějovicích. Cílem této práce bylo konstrukčními úpravami dosáhnout lepších výsledků při měření částečných výbojů.

Klíčová slova

Částečné výboje (ČV), zhášecí tlumivka, zdánlivý náboj, izolační systém, konstrukce, simulace elektrostatického pole, ...

Abstract

This thesis is focused on the description of the function and construction of the insulating system of Petersen coil, the verification of the quality of the insulating system focused on the issue of partial discharges during tests of Petersen coils. It describes the methodology of measuring and evaluation of partial discharges activity on Petersen coils and combined Petersen coils produced by EGE based in České Budějovice. The Aim of this work was to achieve better results of partial discharges activity after design change.

Keywords

Partial discharges (PD), Petersen coil, Apparent Charge, Insulation System, Construction, Electrostatic Field Simulation.

Prohlášení

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

.....
podpis

V Plzni dne 11.5.2017

Václav Vlášek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Josefovi Piherovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 FUNKCE, KONSTRUKCE A IZOLAČNÍ SYSTÉM ZHÁŠECÍCH TLUMIVEK	11
1.1 FUNKCE ZHÁŠECÍCH TLUMIVEK A PROVOZ SÍTÍ V ČR	11
1.1.1 <i>Sítě s izolovaným uzlem</i>	12
1.1.2 <i>Sítě s neúčinně uzemněným uzlem přes zhášecí tlumivku</i>	12
1.1.3 <i>Sítě s neúčinně uzemněným uzlem přes rezistor</i>	12
1.1.4 <i>Sítě s neúčinně uzemněným uzlem přes rezistor a tlumivku</i>	13
1.2 KONSTRUKCE ZHÁŠECÍCH TLUMIVEK	13
1.2.1 <i>Cívka</i>	13
1.2.2 <i>Kostrá</i>	13
1.2.3 <i>Magnetický obvod</i>	14
1.2.4 <i>Pohybové ústrojí s jádry</i>	14
1.3 IZOLAČNÍ SYSTÉM ZHÁŠECÍCH TLUMIVEK	15
1.3.1 <i>Izolační systém cívky</i>	15
1.3.2 <i>Izolační systém kompletní zhášecí tlumivky</i>	16
2 SYSTÉM ZKOUŠEK PRO OVĚŘENÍ KVALITY IZOLAČNÍHO SYSTÉMU	17
2.1 MĚŘENÍ DC IZOLAČNÍHO ODPORU HLAVNÍHO VINUTÍ PROTI ZEMI A MEZI VINUTÍMI	17
2.2 MĚŘENÍ OBSAHU VODY A ELEKTRICKÉ PEVNOSTI OLEJE ZT	17
2.2.1 <i>Měření obsahu vody v transformátorovém oleji</i>	18
2.2.2 <i>Měření elektrické pevnosti transformátorového oleje</i>	18
2.2.3 <i>Zvláštní zkoušky transformátorového oleje</i>	19
2.3 DIELEKTRICKÉ ZKOUŠKY PROVÁDĚNÉ NA ZHÁŠECÍCH TLUMIVKÁCH	19
2.3.1 <i>Zkouška přiloženým střídavým výdržným napětím 50 Hz – 1minuta</i>	19
2.3.2 <i>Zkouška atmosférickým impulsem – rázová zkouška</i>	19
2.3.3 <i>Zkouška indukovaným napětím</i>	20
3 OVĚŘENÍ KVALITY IZOLAČNÍHO SYSTÉMU ZHÁŠECÍCH TLUMIVEK POMOCÍ MĚŘENÍ ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	21
3.1 ÚČINKY ČV NA IZOLAČNÍ SYSTÉM ZT	21
3.1.1 <i>Elektrické účinky</i>	21
3.1.2 <i>Erozivní účinky</i>	22
3.1.3 <i>Chemické účinky</i>	22
3.1.4 <i>Tepelné účinky</i>	22
3.2 METODA DETEKCE ČV NA ZHÁŠECÍCH TLUMIVKÁCH	22
3.2.1 <i>Metodika měření výbojové činnosti na ZT používaná v EGE</i>	23
3.2.2 <i>Kalibrace měřicího obvodu</i>	24
3.3 VYHODNOCOVÁNÍ ÚČINKŮ VÝBOJOVÉ ČINNOSTI NA ZT	26
4 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT BĚHEM ZKOUŠEK ČÁSTEČNÝCH VÝBOJŮ	28
4.1 PŘEDSTAVENÍ KOMBINOVANÉ TLUMIVKY A SCHÉMA ZAPOJENÍ PRO ZKOUŠKU INDUKOVANÝM NAPĚTÍM S VYHODNOCENÍM VÝBOJOVÉ ČINNOSTI	28
4.1.1 <i>Kombinovaná zhášecí tlumivka ASRC X.XX/X</i>	28
4.1.2 <i>Schéma zapojení pro zkoušku indukovaným napětím na ASRC</i>	30
4.2 PRŮBĚH ZKUŠEBNÍCH HLADIN V ZÁVISLOSTI NA ČASE	30
4.3 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH DAT	31
4.3.1 <i>ASRC 5.0 v.č.:5933</i>	31
4.3.2 <i>ASRC 5.0 v.č.:5934</i>	32
4.3.3 <i>ASRC 5.0 v.č.:5935</i>	33

4.3.4	Shrnutí vyhodnocení naměřených dat	34
5	VÝPOČET A SIMULACE ROZLOŽENÍ ELEKTROSTATICKÉHO POLE V IZOLAČNÍM SYSTÉMU ZHÁŠECÍ TLUMIVKY ASRC 5.0	35
5.1	MAXWELL – ÚVOD DO PROGRAMU	35
5.2	MĚŘENÍ VÝBOJOVÉ ČINNOSTI PŘED KONSTRUKČNÍMI ÚPRAVAMI	36
5.2.1	Naměřená data na kombinované tlumivce před úpravami	37
5.2.2	Analýza měření před úpravou	39
5.3	SIMULACE PROVEDENÉ PŘED ÚPRAVOU ASRC	40
5.3.1	Simulace bez použití kartitové izolace	40
5.3.2	Simulace s použitím kartitové izolace na vývodu i svorníku	42
5.3.3	Simulace s kartitem „natěsno“ pouze na svorníku	44
5.3.4	Simulace s kartitem „natěsno“ pouze na svorníku ve vzdálenosti 40 mm	45
5.4	VYHODNOCENÍ PROVEDENÝCH SIMULACÍ A NÁVRH KONSTRUKČNÍ ÚPRAVY	45
5.5	MĚŘENÍ VÝBOJOVÉ ČINNOSTI PO PROVEDENÍ KONSTRUKČNÍCH ÚPRAV	46
5.6	VYHODNOCENÍ ZÍSKANÝCH MĚŘENÍ	48
ZÁVĚR	49
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	50
PŘÍLOHA A	1
PŘÍLOHA B	2

Seznam symbolů a zkratek

<i>VN</i>	vysoké napětí
<i>ZT</i>	zhášecí tlumivka
<i>TPV</i>	oddělení technické přípravy výroby
<i>PCB</i>	Polychlorované bifenyly
U_f	efektivní hodnota fázového napětí [kV]
U_m	maximální napětí zhášecí tlumivky [kV]
U_r	jmenovité napětí zhášecí tlumivky [kV]
R_{15}	hodnota izolačního odporu v 15- té vteřině měření [Ω]
R_{60}	hodnota izolačního odporu v 60- té vteřině měření [Ω]
Q	velikost zdánlivého náboje [pC]
q_0	velikost kalibračního náboje [pC]
U_0	amplituda kalibračního náboje [V]
n	četnost impulsů [s^{-1}]
k_C	hodnota kalibračního náboje [pC]
C_a	kapacita testovaného vzorku [F]
C_k	vazební kapacita [F]
C_0	kapacita kalibračního kondenzátoru [F]
Z_m	snímací impedance [Ω]
<i>CD</i>	vazební zařízení
<i>CC</i>	spojovací stíněný kabel
<i>MI</i>	detektor částečných výbojů
<i>OL</i>	optický kabel
<i>MKP</i>	metoda konečných prvků

Úvod

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku vzniku částečných výbojů, během zkoušek pro ověření kvality izolačního systému ZT.

Text je rozdělen do pěti částí; první se zabývá obecně funkcí a konstrukcí izolačního systému zhášecích tlumivek, druhá se zabývá metodami pro ověření kvality izolačního systému, třetí je zaměřena na ověření kvality izolačního systému při měření částečných výbojů a jejich účinky, čtvrtá na analýzu naměřených dat ze vzorku kombinovaných zhášecích tlumivek vyráběné firmou EGE a poslední se zabývá konstrukčními úpravami za účelem zlepšení hodnot naměřených částečných výbojů.

1 Funkce, konstrukce a izolační systém zhášecích tlumivek

1.1 Funkce zhášecích tlumivek a provoz sítí v ČR

Sítě vysokého napětí bývají, nejen u nás v ČR ale i v zahraničních soustavách, často provozovány s tzv. neúčinně uzemněným uzlem, tj. nulový vývod transformátoru je uzemněn přes zhášecí tlumivku (u venkovních vedení), nebo přes rezistor (u kabelových vedení). Tyto sítě hustě protínají území venkova, městská centra i okraje měst s průmyslovými závody a jsou ve značné míře vystaveny buď atmosférickým vlivům, nebo cizím zásahům a četným přepětím. Následkem těchto jevů, které ovlivňují bezporuchový chod, je především vznik izolačních vad jednotlivých fází zejména proti zemi. Jedná se o tzv. zemní spojení. Rozdíl mezi jednofázovým zkratem a zemním spojením je v tom, že zkratový proud je obvykle několikanásobně větší než proud provozní a má induktivní charakter, zatímco v místě zemního spojení protéká malý poruchový proud (v řádech několika Ampér) kapacitního charakteru.

V sítích, které jsou rozsáhlejšího charakteru a v kterých hodnota poruchového proudu přesahuje hodnoty 5A vzniká při zemních spojení oblouk, který roste do značných délek, je velice pohyblivý a obvykle zasáhne vedlejší fáze vedení. Důsledkem toho, pak mohou nastat dvoj-, nebo trojfázové zkraty. Tato oblouková spojení obvykle přepalují vodiče, ničí dřevěné stožáry a izolátory.

Nebezpečným jevem jsou přepětí, která nastanou při nestabilním hoření oblouku, tj. kdy dochází k jeho hašení a opětovnému zapalování, zejména při přerušovaném zemním spojení. Na zdravých fázích se pak mohou objevit až 4,5násobky U_f (efektivní hodnota fázového napětí).

Aby se tyto sítě daly provozovat i během zemních spojení, provádí se kompenzace zemních proudů, která spočívá v různém spojení uzlu sítě s nulovým potenciálem, tedy se zemí. V případě symetrických sítí bez poruch se spojení jejich uzlu se zemí ničím neprojeví, rozdíly vznikají až při zemních poruchách nebo jiných nesymetrických stavech a přechodných dějů v této soustavě.

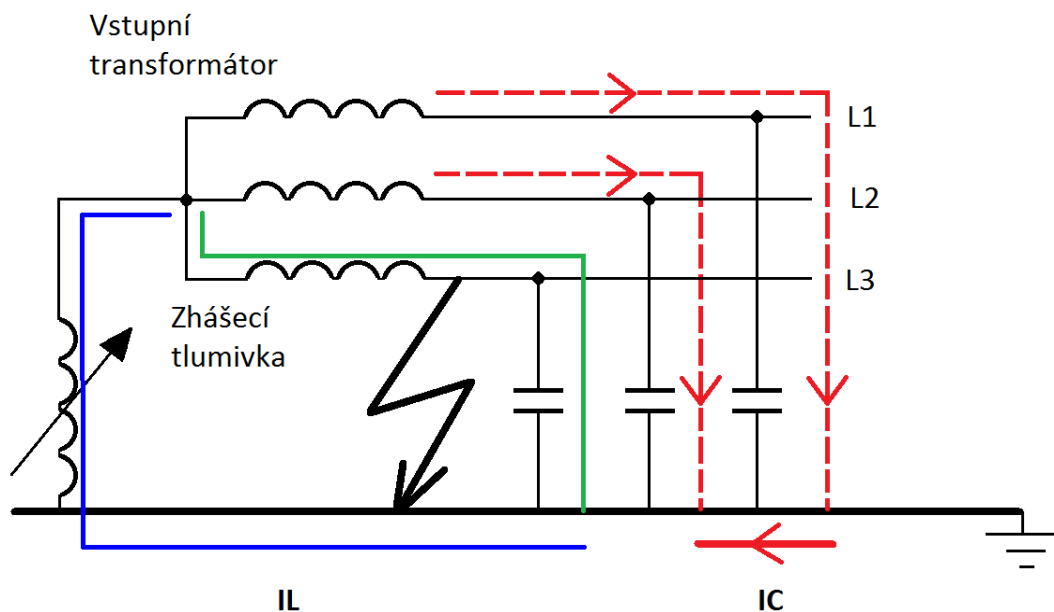
V soustavách VN v ČR se používají čtyři různá zapojení uzlu sítě se zemí:

1.1.1 Síť s izolovaným uzlem

Malé sítě VN průmyslových závodů a vlastních spotřeb elektráren a tepláren bývají provozovány s izolovaným uzlem. Důsledků přechodných poruch izolace jedné fáze proti zemi dochází u tohoto typu sítí k samočinnému odstranění.

1.1.2 Síť s neúčinně uzemněným uzlem přes zhášecí tlumivku

Převažujícím způsobem uzemnění v našich distribučních sítích VN je uzemnění uzlu přes zhášecí tlumivku. Jistou výhodou tohoto zapojení je, že i rozsáhlejší sítě lze provozovat se zemním spojením po dobu potřebnou k nalezení poruchy, takže doba přerušení dodávky elektrické energie je velmi krátká. Navíc většina přechodných zemních spojení se zháší sama.



Obrázek 1 Nulový bod transformátoru uzemněný přes zhášecí tlumivku

1.1.3 Síť s neúčinně uzemněným uzlem přes rezistor

Rozšiřováním kabelových vedení se snižuje počet přechodných poruch. Ve většině případů dochází k přechodu trvalých zemních spojení ve zkraty. U těchto sítí pak zaniká výhoda provozu kompenzace zemních kapacitních proudů. S požadavkem rychlého vypínání všech zemních poruch se začalo prosazovat spojení uzlu přes rezistor. Uzlový rezistor omezuje proudy jednopólových poruch.

1.1.4 Síť s neúčinně uzemněným uzlem přes rezistor a tlumivku

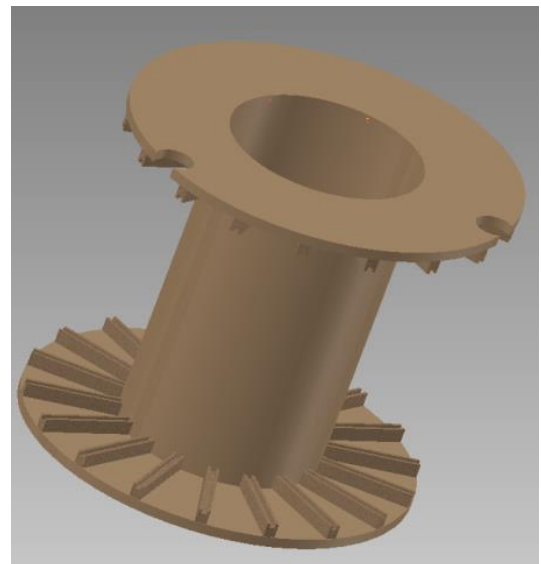
Spojení výhod provozu kompenzace zemních kapacitních proudů a provozu přes rezistor je provoz s krátkodobým přechodným uzemněním uzlu přes rezistor. Tento způsob provozu se používá v menším rozsahu u smíšených sítí. Jedná se vlastně o provoz s kompenzací zemních proudů, kde se při trvajícím poruše krátkodobě připíná paralelně ke zhášecí tlumivce rezistor. Tím dojde ke zvětšení poruchového proudu a vytvoří se podmínky pro spolehlivý náběh ochrany postiženého vývodu. Nevýhodou jsou vysoké investiční náklady, neboť je nutno použít jak zhášecí tlumivku, tak i omezující rezistor a spínací přístroje.

1.2 Konstrukce zhášecích tlumivek

Konstrukci zhášecí tlumivky zohledním na aktivní část stroje, tedy tu nejdůležitější část zhášecí tlumivky, kterou lze rozdělit na několik součástí, které jsou následně dohromady složeny.

1.2.1 Cívka

Jedna z nejdůležitějších částí celé zhášecí tlumivky je cívka. Tělo cívky se skládá z papírového válce. Materiál použitý na vinutí cívky bývá v dnešní době většinou měď, která nahradila dříve používaný hliník, a který může nabývat různých profilů a tloušťek. Cívka je z důvodů dobré přesnosti a také rychlosti navijena pomocí automatického navíjecího zařízení, nebo též také ručně. Obsluhu stroje provádí zaškolení pracovníci, kteří dohlížejí na kvalitu a dodržení správných pracovních a technologických postupů.



Obrázek 2 Model kostry cívky

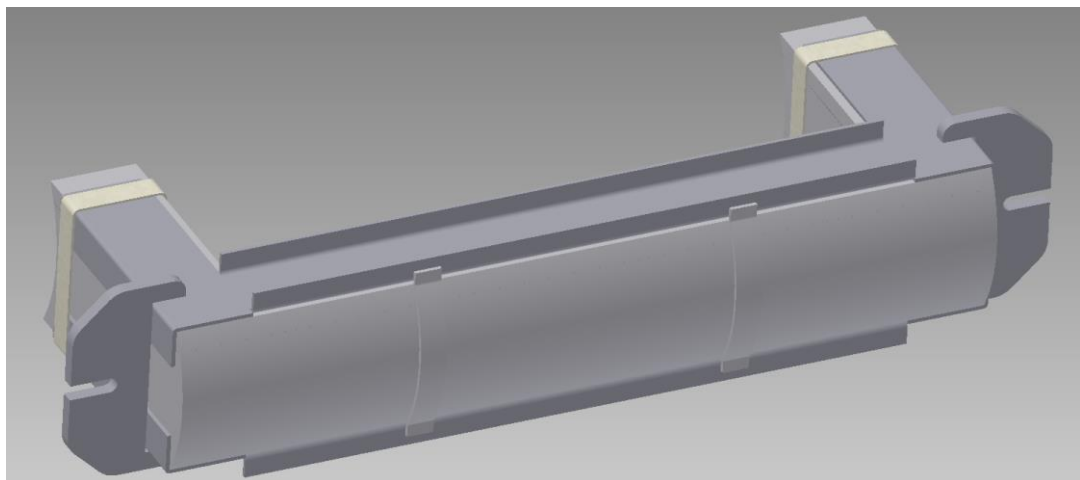
1.2.2 Kostra

Kostrou se nazývá ústrojí, které je nosnou částí magnetického obvodu, pohyblivého ústrojí s jádrem a cívky, která je umístěna uvnitř kostry. Materiálem pro konstrukci koster se používá železo, nejčastěji svařenců U-profilu. Konstrukce bývá opatřena nátěrem, který je

oleji odolný, protože celý aktivní díl je umístěn do nádoby, která je zaplněna transformátorovým olejem sloužícím jednak jako izolační prvek a také jako chladicí médium celého stroje.

1.2.3 Magnetický obvod

Magnetický obvod se skládá z článků, které jsou upevněny na kostru zhášecí tlumivky. Jednotlivé články magnetického obvodu jsou vyráběné z orientovaných transformátorových plechů, které jsou poskládány a svařeny přesně podle technologického postupu, tak aby byly dodrženy požadované vlastnosti. Magnetický obvod, který obepíná cívku zhášecí tlumivky, je uzavírán přes jádro.



Obrázek 3 Model článku magnetického obvodu

1.2.4 Pohybové ústrojí s jádry

Pohybové ústrojí s jádry uzavírá magnetický obvod kolem cívky. Skládá se ze dvou spojených šroubovic s opačným závitem. Na těchto šroubovicích jsou přes matky připevněny jádra. Jedna strana ústrojí je v kostře tlumivky uložena v ložisku a druhá strana je připojena přes víko zhášecí tlumivky k pohonu, který bývá většinou elektrický, ale dle přání zákazníka se může objevit i ruční pohon. Otáčením pohybového ústrojí se pak k sobě jádra přibližují, nebo oddalují, čímž lze plynule měnit její indukčnost.



Obrázek 4 Model pohybového ústrojí s garniturou

Jádra magnetického obvodu jsou vyrobena podobně jako články z orientovaných magnetických plechů a jsou upevněna pomocí matek k pohybovému ústrojí zhášecí tlumivky.

1.3 Izolační systém zhášecích tlumivek

Na izolační systém při výrobě zhášecích tlumivek je kladen velký důraz. Bývá často předmětem mnoha testů a vývoju, především pokud dojde ke změně dodavatele, tak aby bylo dodrženo potřebné elektrické pevnosti a spolehlivosti.

1.3.1 Izolační systém cívky

Hlavní i pomocná vinutí cívky ZT, bývá, jak je uvedeno výše nejčastěji měděné. Profil vinutí je odlišný podle druhu a výkonu ZT. Tato hlavní a pomocná, nebo měřicí vinutí se vinou na izolační válec, který je papírový. Mezi jednotlivými vrstvami vinutí cívky se

používá izolačního papíru v podobě lepenky různých tloušťek. Celá cívka je po navinutí ještě sušena v atmosférické komoře. Po osazení cívky do aktivního dílu ZT bývají vývody z cívky ještě izolovány papírovými trubičkami, nebo lepenkou a připojeny k průchodkám ZT. Vinutí, sušení a připojení provádí zaškolení pracovníci podle technologických postupů a standardů EGE. Zejména při vinutí cívek pro velké izolační hladiny jako je 110 kV je dodržení těchto technologických postupů zásadní a nedodržení čistoty při práci může mít fatální následky během zkoušek izolační kvality.

1.3.2 Izolační systém kompletní zhášecí tlumivky

Po sestrojení aktivního dílu, přichází na řadu tzv. „první zkouška“ ZT. Pracovníci zkušebny provedou nejprve vizuální prohlídku. Ta se skládá z kontroly připojení vývodů cívky, neporušení izolace, dotažení šroubových spojů a zejména dodržení stanovených vzdáleností s ohledem na izolační hladinu a prováděné zkoušky, které budou následovat. Poté připojí ZT do obvodu pro měření regulační charakteristiky a měřením v celém regulačním rozsahu (obvykle 10-100% I_{jm}) ověří správnost zapojení vývodů cívky podle štítku a jmenovitých parametrů převodu ZT. Během této zkoušky, která je bez olejové náplně, si musí zkušební technik počínat velmi obezřetně, protože v případě ZT na velmi krátký provoz (např. 10 minut) musí být měření provedeno skutečně rychle, aby nedošlo vlivem absence chladicího média k poškození izolačního systému cívky.

Po ukončení první zkoušky se aktivní díl ZT přesouvá na další oddělení, kde je provedeno umístění aktivního dílu do nádoby ZT a je provedena příprava pro naplnění ZT transformátorovým olejem. Plnění ZT se provádí ve vakuové peci, nejprve se vysuší a poté pod vakuem plní. Ohřev a vakuové plnění má za následek odstranění nadbytečné vlhkosti z izolačního systému, která se do systému dostala v předcházející výrobě. Zároveň při vakuovém plnění dochází k zaplnění veškerých míst transformátorovým olejem a nedochází tak ke vzniku vzduchových bublin, které by mohly mít neblahé účinky při zkoušení ZT.

2 Systém zkoušek pro ověření kvality izolačního systému

Zkoušení ZT se provádí podle normy ČSN EN 60076-6, která vychází z transformátorové normy ČSN EN 60076-1, jelikož na zkoušení těchto zařízení neexistuje samostatná norma. Systém zkoušek pro ZT je velice obsáhlý, proto se v následující části bude zaměřeno pouze na zkoušky týkající se ověření kvality izolačního systému.

2.1 Měření DC izolačního odporu hlavního vinutí proti zemi a mezi vinutími

Toto měření se provádí na zkompletovaném zařízení a v podstatě slouží jako ukazatel správnosti a dodržení technologických postupů při plnění ZT, zejména neporušení izolace a navlhnutí vinutí. Hodnota změřeného izolačního odporu je značně závislá na teplotě a vlhkosti, proto má informativní charakter. Měření se provádí na všech vinutích proti zemi a mezi všemi sekundárními vinutími proti hlavnímu vinutí. Na vinutí je přiloženo stejnosměrné napětí v rozsahu 500÷5000 V a zaznamenává se naměřená hodnota po R_{15s} a R_{60s} . Poměr R_{60}/R_{15} by měl být u nových zařízení vyšší než 1,3 při teplotě izolace v mezích +10 až 30 °C.[1] Pokud jsou výsledné hodnoty naměřené v řádech GΩ, pak se jedná se o kvalitní izolační systém s minimální vlhkostí ve vinutí.

Tabulka 1 Ukázka typických hodnot z měření izolačních odporů ZT v. č.:9996

GΩ[15s/60s]	GND	D1-D2
D1-D2	14/25	X
M2-N2	48/63	27/52
M1-N1	166/300	48/103
k-l	177/255	255/350

Poměr R_{60}/R_{15} převyšuje v některých případech o mnoho hodnotu 1,3, takže lze usoudit, že tato ZT má izolační systém v pořádku.

2.2 Měření obsahu vody a elektrické pevnosti oleje ZT

Měření obsahu vody a elektrické pevnosti oleje udává skutečný obraz o kvalitě transformátorového oleje, který v ZT slouží nejen jako izolační prvek, ale i jako chladicí médium. Toto měření se provádí podle návodky EGE č.9/96. Metodice odběru vzorků izolačních olejů je nutno věnovat náležitou pozornost. V opačném případě i při pečlivém

provedení jednotlivých zkoušek lze snadno získat zkreslené, nereprodukovatelné výsledky, které mohou vést k chybným závěrům o jakosti izolačního oleje.[2]

2.2.1 Měření obsahu vody v transformátorovém oleji

Toto měření provádí pracovník zkušebny před zahájením veškerých zkoušek, nebo po zkouškách je-li takto specifikováno. Odběr vzorku se provádí z výpustného ventilu ZT po dostatečném odpuštění a propláchnutí odběrové pomůcky, v tomto případě do injekční stříkačky s obsahem cca 5 ml. Tento vzorek, resp. 2 ml ze vzorku se následně vstříkne do zařízení na měření obsahu vody, který následně po chemické reakci, stanoví obsah vody v gramech vztažený na tunu oleje. Garantované hodnoty u nových zařízení nesmí překročit hodnotu 10 g/t obsahu vody v oleji, jinak se musí tento olej odčerpat a následně filtrovat. Běžně se provádí několik měření v průběhu výroby ZT, při dodávce transformátorového oleje, před plněním a v praxi se tyto hodnoty na konci procesu, tedy před zkouškami pohybují okolo 5 g/t.

2.2.2 Měření elektrické pevnosti transformátorového oleje

Hodnoty z tohoto měření patří mezi nejčastěji stanovované parametry. Naměřená hodnota závisí na obsahu vody, nečistotách ve vzorku, produktech stárnutí a obsahu plynů. Definiuje se jako poměr průrazného napětí vztaženého ke vzdálenosti zkušebních elektrod [2]. Postup odebrání a následné testy se provádějí v souladu s příslušnou normou[4], která pro určení průrazného napětí transformátorového oleje definuje semisférické mosazné elektrody o pevné vzdálenosti 2,5 mm ($\pm 0,05$ mm). Objem vzorku pro zkoušku by měl být v rozmezí 350 ml až 600 ml. Odběr se provádí tak, aby do odběrové nádoby olej volně stékal po stěně a nevytvářel tak nežádoucí vzduchové bubliny. Přesnějšího výsledku měření se dosáhne dostatečným odpuštěním odebíraného vzorku a dostatečným propláchnutím odběrového kelímku. Stejně jako u stanovení obsahu vody jsou předepsané mezní hodnoty pro



Obrázek 5 Zařízení pro stanovení obsahu vody v oleji

vyhodnocení měření. U nových zařízení je minimální hodnota elektrické pevnosti stanovena na 70kV/2,5 mm. V případě nižší hodnoty je nutné test opakovat, případně celou várku oleje přefiltrovat.

2.2.3 Zvláštní zkoušky transformátorového oleje

Na žádost zákazníka, nebo oddělení technické přípravy výroby (TPV), lze provádět i jiné zvláštní testy transformátorových olejů. Jedná se především o plynové analýzy olejů po zkouškách prováděných na ZT, případně obsah PCB látek v oleji. Z důvodů velké náročnosti těchto testů jsou tyto zkoušky zajišťovány externě. Velmi dobrá spolupráce a s mnohaletými zkušenostmi jsou tyto zkoušky prováděné firmou ElDiag s r o. sídlící v Praze.

2.3 Dielektrické zkoušky prováděné na zhášecích tlumivkách

Tento druh zkoušek je pro ověření kvality izolačního systému zhášecích tlumivek jednoznačně nejdůležitější. Zkoušky jsou definovány platnými normami a velikost jednotlivých zkušebních napětí je dána izolační hladinou, způsobem zapojení a izolování hlavního vinutí.

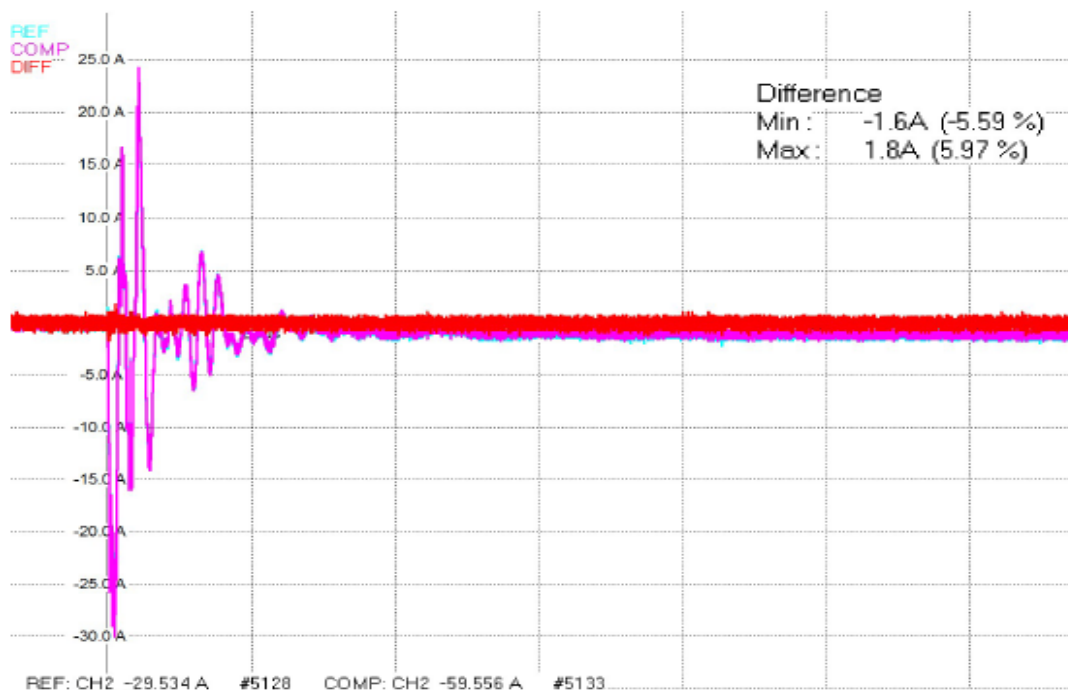
2.3.1 Zkouška přiloženým střídavým výdržným napětím 50 Hz – 1minuta

Tato zkouška je prováděna na všechna vinutí ZT. Svorky sekundárních, nebo pomocných vinutí ZT, kde je hodnota $U_m \leq 1,1$ kV, je velikost zkušebního napětí stanovena dle ČSN EN 60076-3 na hodnotu 3 kV. Toto napětí se z patřičného zkušebního zdroje přivede na jednotlivé svorky, přičemž ostatní svorky jsou spojeny a uzemněny. Kladný výsledek zkoušky znamená, že během zkoušky nedošlo k náhlému poklesu zkušebního napětí k nule, nebo nenastane jiný náznak průrazu. Napěťová hladina pro zkoušku hlavního vinutí je určena izolační hladinou svorky nulového bodu, tzn. na ZT s redukovanou izolací se hodnota maximálního zkušebního napětí řídí podle izolační hladiny pro nulovou svorku. V Praxi bývá obvyklá hodnota zkušebního napětí hlavního vinutí s plnou izolací 28, 50 a 70 kV.

2.3.2 Zkouška atmosférickým impulsem – rázová zkouška

Tento druh zkoušky patří do kategorie typových zkoušek ZT, tzn., že je prováděna na typově nových zařízeních resp. nových cívek. Ve firmě EGE slouží pro tyto zkoušky rázový generátor od švýcarské firmy Haefely, který v roce 2015 nahradil dosluhující rázový generátor od italského výrobce PassoniVilla.

Normalizovaný tvar vlny podle ČSN EN 60076-4 je zkušební impuls atmosférického přepětí s hodnotou $1,2 \mu\text{s} \pm 30\%$ / $50 \mu\text{s} \pm 20\%$. [5] V závislosti na kapacitě zkoušeného objektu nemusí tvar vlny vždy odpovídat přesně normalizovanému impulsu, proto je vhodnou kombinací čelního odporu, případně zapojením přídavné kapacity nutné požadovaný normovaný tvar vlny nastavit. Původní rázový generátor byl navržen na zkoušení převážně zhášecích tlumivek a v případě zapojení jiných objektů (kapacit) do obvodu, např. transformátorů s výrazně odlišnou kapacitou, nebylo možné normalizovaný tvar vlny dodržet, a proto bylo nutné zakoupit nové zařízení. Rázový generátor Haefely je konstruován jako 8stupňový s možností maximální velikostí zkušebního napětí 800 kV a celkovou energií 40 kJ. Během zkoušky se provede nejprve jeden referenční impuls o napětí v rozsahu 50-70 % plného zkušebního napětí. Následně se provedou tři rázy o hodnotě plného zkušebního předepsaného napětí s tolerancí $\pm 3\%$. Vyhodnocení zkoušky spočívá v porovnání proudové odezvy referenčního a plného rázu, kde by nemělo dojít k výrazným odchylkám. V praxi nepřekračují odchylky mezi referenčním a plným impulzem hodnotu $\pm 15\%$. Zároveň během zkoušek nesmí dojít k přeskokům na hlavních jiskřištích nebo uvnitř hlavního vinutí ZT.



Obrázek 6 Příklad porovnání referenčního a plného rázu při zkoušce atmosférickým impulsem

2.3.3 Zkouška indukovaným napětím

Zkouška je prováděna jako kusová zkouška, tedy na každé ZT. Velikost zkušebního napětí je tak jako u zkoušky přiloženým střídavým výdržným napětím odvislá od způsobu izolace nulového bodu. Tedy v tomto případě je hodnota zkušebního napětí pro redukovanou

izolaci nulového bodu o velikosti plného zkušební napětí a pro plnou izolaci je hodnota zkušební napětí rovna dvojnásobku jmenovitého napětí ZT. Zkouška indukovaným napětím, nebo také zkouška závitové izolace, jak je často také takto pojmenována, je důkladným vyzkoušením hlavního vinutí ZT, především mezi závitové izolace. Z důvodů velké energetické náročnosti je proto ZT resp. sekundární pomocné vinutí, napájené zvýšenou frekvencí ze střídače o maximální frekvenci 220 Hz a výkonu 700 kVA. Na hlavní vinutí se potom indukuje požadované zkušební napětí. Zkouška proběhne úspěšně, pokud nedojde k poklesu zkušební napětí k nule. Nejnáročnější bývá pro hladiny ZT vyráběné do sítí VVN, kde je hodnota zkušební napětí pro tuto zkoušku obvykle 230 kV, což s sebou přináší opravdu velkou důslednost na dodržení veškerých technologických postupů během výroby ZT. Pro tyto izolační úrovně je normou [6] předepisována zkouška indukovaným napětím současně s měřením částečných výbojů. Tato problematika bude popsána v následující kapitole.

3 Ověření kvality izolačního systému zhášecích tlumivek pomocí měření částečných výbojů

Částečné výboje mohou vznikat v ZT v místech, jejichž vznik lze hledat především v nedokonalé výrobě, popř. technologických krocích, popř. vznikají během dlouhodobého provozu ZT. Měřením lze odhalit vznikající poruchu a předcházet tím haváriím, které by mohly mít fatální následky. Existence ČV lze sledovat především v izolaci závitů hlavního vinutí ZT a v průchodkách ZT. Pro měření výbojové činnosti se ZT připravuje jako k napěťovým zkouškám resp. ke zkoušce indukovaným napětím. Vnější povrch průchodek by měl být suchý a čistý a samotné průchodky musí být opatřeny stíněním k odstranění koróny.

3.1 Účinky ČV na izolační systém ZT

Všeobecně lze tvrdit, že pro všechny elektrické stroje jsou veškeré druhy částečných výbojů charakteristické svými destruktivními účinky na izolační systém. Výboje v dielektriku mohou mít účinky elektrické, erozivní, chemické a tepelné.

3.1.1 Elektrické účinky

Vznikne-li v dutince elektrický oblouk, je jeho pravděpodobným důsledkem vznik vodivé dráhy. Při vysokých hodnotách intenzity el. pole, může tato koncentrace v určitém místě

způsobit čistě elektrický průraz a vodivá dráha se tak může prohlubovat dielektrikem. Ionty a elektrony mají silný destruktivní účinek svým bombardováním stěny dutinky.[3]

3.1.2 Erozivní účinky

Způsobují je svým účinkem ČV, ale především vznikají bombardováním stěn dutinky ionty. To má za následek šíření místem poruchy, což může vést v delším časovém horizontu k průrazu dielektrika.[3]

3.1.3 Chemické účinky

Chemické účinky ČV vznikají vlivem dlouhodobého elektrického namáhání stroje. Nejprve se chemické reakce vlivem ČV odehrávají ve vlhkosti a produktech odloučených ze vzduchu. Výsledkem těchto reakcí jsou pevné, kapalně a plynné vedlejší produkty. Tyto produkty rozkladu dále difundují do pevného dielektrika a dají za vznik vodivým oblastem nemalých rozměrů.[3]

3.1.4 Tepelné účinky

Částečné výboje resp. oteplení, které jejich aktivita způsobuje, mohou způsobit tzv. tepelnou nestabilitu dielektrika a tepelný průraz. [3] Doposud však nebyla prokázána skutečnost o vlivu teploty na ČV vyvolaný proces stárnutí dielektrika.

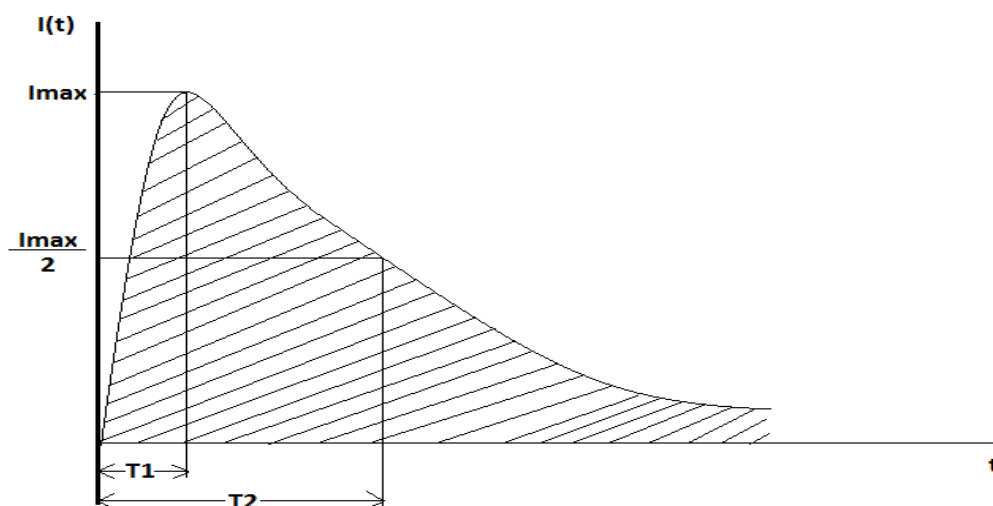
3.2 Metoda detekce ČV na zhášecích tlumivkách

V izolantu doprovází výbojovou činnost mnoho jevů fyzikálních, elektrického i neelektrického charakteru. Mimo vzniku proudových impulzů se jedná také o generování vysokofrekvenčního elektromagnetického pole, vznik chemických zplodin výbojové činnosti, světelné záření viditelného i ultrafialového spektra, či tepelný ohřev okolí apod. Vlivem těchto projevů lze přítomnost výbojové činnosti detekovat, případně v lepším případě určit místo vzniku výbojové činnosti.

Obecně se metody detekce dělí na globální a lokalizační. Globální metody se zabývají komplexním měřením ČV a vypovídají o stavu izolace jako takové. Pro hledání zdrojových lokalit ČV se používají lokalizační metody. V praxi se běžně tyto metody kombinují, kdy se globální metodou určí celková míra výbojové činnosti a následně se za pomoci lokalizační metody najde lokalita působení těchto výbojů.

Určení výbojové činnosti je základem všech elektrických metod. Tyto elektrické metody jsou mnohem více rozšířeny na rozdíl od metod neelektrických, především pro svou lepší citlivost a kvantifikovatelnost. Délka pulzu ČV je závislá na materiálu ve kterém vzniká, např. v impulzy v pevných izolantech trvají kratší dobu než v kapalných izolantech. Ideální tvar proudového pulzu je možné vidět na obrázku 7. Velikost jeho náboje Q je potom plocha pod jeho křivkou $i(t)$

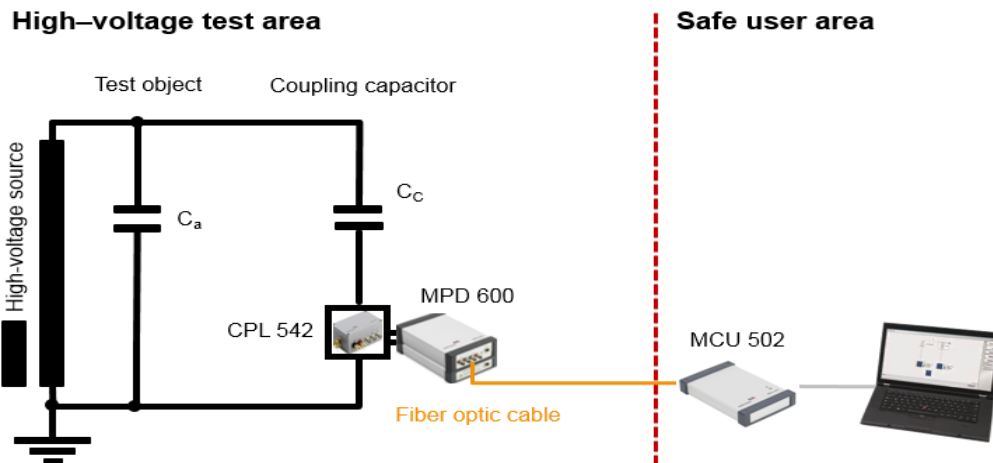
$$Q = \int_0^{\infty} i(t) dt \quad (1)$$



Obrázek 7 Tvar proudového impulsu ČV [7]

3.2.1 Metodika měření výbojové činnosti na ZT používaná v EGE

Ve firmě EGE se na měření výbojové činnosti používá globální metoda, která je založena na principu sledování impulsů ČV pomocí měřicí impedance, která je realizována jako RLC člen s ochrannými články proti přepětí. Dále slouží tento člen jako filtr superponovaných pulzů ČV od napájecího napětí. Přímé měření ČV popisuje norma [8], kde je uvedeno několik možných zapojení. Pro měření objektů uzemněných, či velkých kapacit se v EGE používá měřicí obvod se zapojením impedance do větve vazebního kondenzátoru, které umožňuje měření ČV bez starostí o měřicí zařízení při možném průrazu na zkoušeném zařízení. Výbojová činnost měřená na výrobcích EGE je prováděná pomocí měřicího systému rakouské firmy OMICRON, schéma zapojení propojení jednotlivých komponentů měření je vidět na obrázku 8.



Obrázek 8 Měřící zařízení s paralelní impedancí rakouské firmy OMICRON

3.2.2 Kalibrace měřícího obvodu

Pro zajištění dostatečné reprodukovatelnosti je velmi důležitá kalibrace měřícího obvodu. Vzhledem k rozdílným kapacitám měřícího obvodu dochází při cestě od měřících svorek zkoušené ZT ke vstupu do měřícího systému ke zkreslení pulzů ČV a vlivem ztrát při impedančním nepřizpůsobení i ke zmenšení přenášeného náboje. Princip kalibrace je založen na injektování kalibračních pulzů známé velikosti q_0 do zkoušeného obvodu o amplitudě U_0 . Důležitou vlastností kalibračních zařízení je schopnost vytvořit impuls o podobném frekvenčním spektru jako je frekvenční spektrum částečných výbojů. [9]

Kalibrátory vyráběné a používané pro laboratorní i průmyslová měření jsou obvykle vyráběné v provedení jako přenosné bateriové generátory. Obvykle používají kalibrační pulsy jedné polaritě a synchronizace těchto pulzů se provádí pomocí okolního umělého osvětlení a fotodiody na střídavé napětí tak, že opakovací frekvence je $n=100 \text{ s}^{-1}$. Výstupem z takovýchto generátorů potom bývají kalibrační náboje v rozsahu 2~1000 pC.

Na následujícím obrázku je možné vidět schéma zapojení pro kalibraci kompletně zapojeného měřícího obvodu. Kalibrační zařízení by se mělo připojit co nejbližší k měřenému objektu charakterizovaného kapacitou C_a zapojeného do série s vazebním zařízením CD a vazební kapacitou C_k . Pokud je kapacita kalibračního kondenzátoru $C_0 < 0,1(C_a + C_k)$, je velikost kalibračního pulzu dána vztahem:

$$q_0 = U_0 C_0 \quad (2)$$

V opačném případě je nutné určit kalibrační impulz podle vzorce:

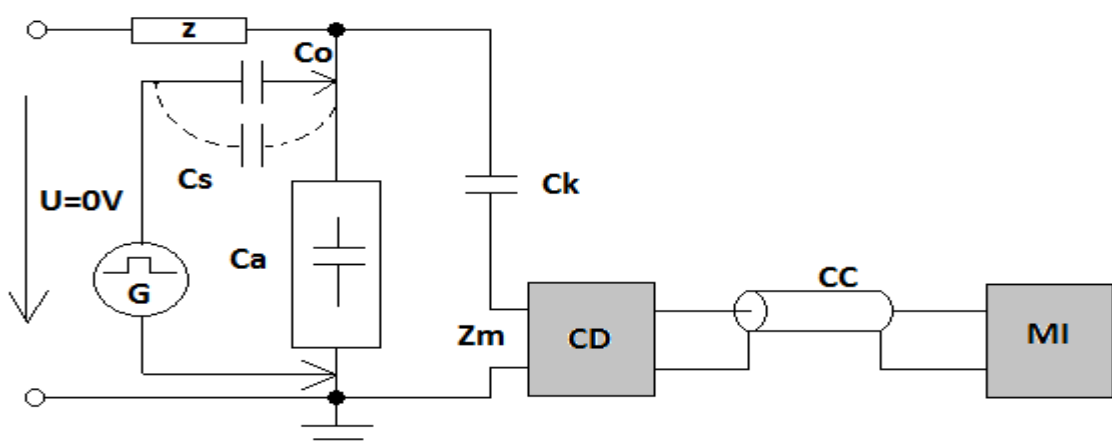
$$q_0' = q_0 \frac{C}{C_0 + C}, \quad (3)$$

kde C je kapacita celého měřicího obvodu a pro $C \gg C_0$ je $q_0 = q_0'$.

Z důvodů omezení parazitních kapacit je tedy kalibrační zařízení připojeno co nejbližší zkušební svorkám zkoušeného zařízení a zkušební napětí nesmí být v průběhu kalibrace připojeno, resp. zdroj je součástí obvodu, který ale musí být vypnutý, jinak by došlo k poškození kalibrátoru. Po ukončení kalibrace se od zkušebního obvodu kalibrátor odpojí a následně se definuje kalibrační faktor k_c jako:

$$k_c = \frac{q_0 \text{ (kalibrační náboj)}}{\text{údaj detektoru (ve zkoušeném obvodu)}} \quad (4)$$

V průběhu měření ČV je aktuální hodnota odečtená z detektoru vynásobena tímto koeficientem k_c . Tímto způsobem se získává přesná hodnota zdánlivého náboje a pro dosažení pokud možno největší citlivosti měření a odolnosti proti rušení, by měl být koeficient k_c co nejmenší. Pro zajištění dobré přesnosti měření, by kalibrace podle příslušné normy [8] měla být provedena o jedné hladině zdánlivého náboje příslušného rozsahu očekávaných úrovní.

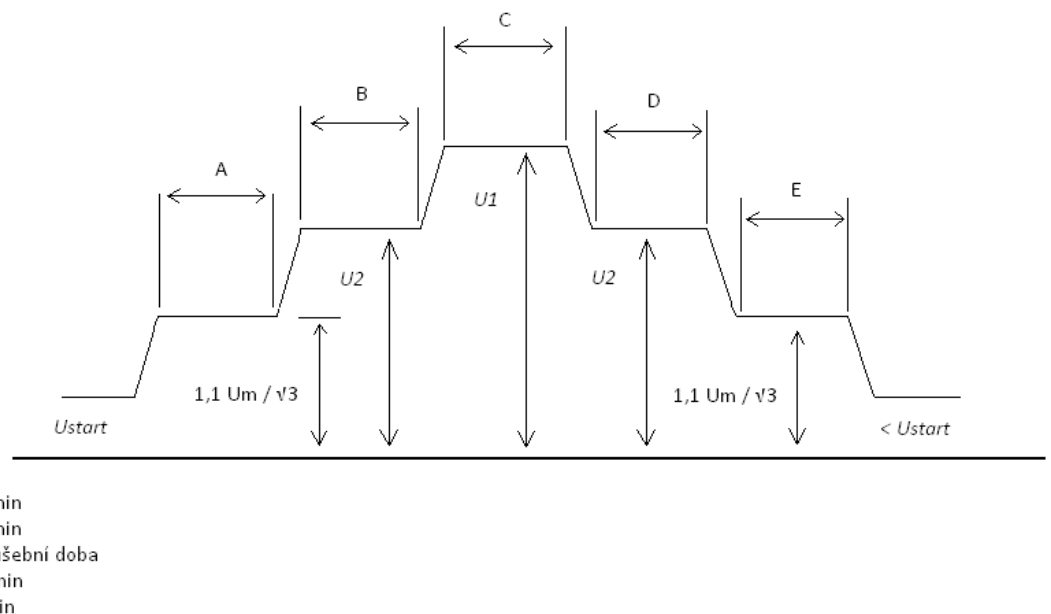


Obrázek 9 Kalibrace měřicího obvodu s uzemněným zkušebním obvodem[3]

3.3 Vyhodnocování účinků výbojové činnosti na ZT

Pro ZTs $U_m > 72,5 \text{ kV}$ předepisuje norma[6] zkoušku krátkodobým střídavým indukovaným napětím (ACSD), která se pak provádí s měřením a vyhodnocením výbojové činnosti kusově. Měřením této výbojové činnosti v průběhu zkoušky je cenným poznatkem jak pro výrobce zařízení, tak pro zákazníka. Dle této normy[6] se střídavé napětí přivádí na svorky hlavního vinutí. Tvar vlny by se měl co nejvíce blížit sinusovému průběhu a jeho kmitočet by měl dostatečně převyšovat jmenovitý kmitočet, aby se vyloučil nadměrný magnetizační proud během zkoušky. Měří se vrcholová hodnota indukovaného napětí. Při plném zkušebním napětí musí zkouška trvat 60 s při jakémkoliv kmitočtu rovném dvojnásobku jmenovitého kmitočtu nebo nižším, pokud není předepsáno jinak. Převyšuje-li zkušební kmitočet dvojnásobek jmenovitého kmitočtu, musí být zkušební doba v sekundách podle vzorce:

$$120 \times \frac{\text{jmenovitý kmitočet}}{\text{zkušební kmitočet}}, \text{ avšak ne méně než } 15 \text{ s} \quad (5)$$



Obrázek 10 Časový průběh změn zkušebního napětí proti zemi[6]

Na obrázku 10 je zobrazen průběh zkušebního napětí proti zemi v závislosti na čase. Ve firmě EGE používá na zkoušku indukovaným napětím frekvenční měnič, který je schopen

měnit frekvenci v rozsahu $50 \div 250$ Hz, takže dle výše zmíněného vzorce (2) a při zkušební frekvenci 200 Hz trvá zkušební doba $C = 30$ sekund. Podle normy [6] vychází velikost zkušebních napětí, pro vyhodnocování výbojové činnosti, v efektivních hodnotách pro $U_m = 123$ kV, $U_1 = 230$ kV a $U_2 = 1,5 U_m/\sqrt{3}$, z čehož vyplývá, že pro časové úseky A a E z obrázku 11, je hodnota pro vyhodnocování výbojové činnosti rovna 78 kV, pro úseky B a D je to hodnota 107 kV a pro úsek C je to 230 kV, avšak pro tuto hladinu není nutné výbojovou činnost vyhodnocovat. Pro vyhodnocení výbojové činnosti jsou tak nejdůležitější úseky ABDE.[10]Hodnota rušení pozadí podle normy [6]toleruje hodnotu 100 pC pro kompenzační zařízení, v praxi však hodnoty pozadí rušení pohybují na zkušebně EGE do 20pC.

4 Vyhodnocení naměřených dat během zkoušek částečných výbojů

Vyhodnocení naměřených dat bylo analyzováno na zhášecích kombinovaných tlumivkách typu ASRC 5.0.

4.1 Představení kombinované tlumivky a schéma zapojení pro zkoušku indukovaným napětím s vyhodnocením výbojové činnosti

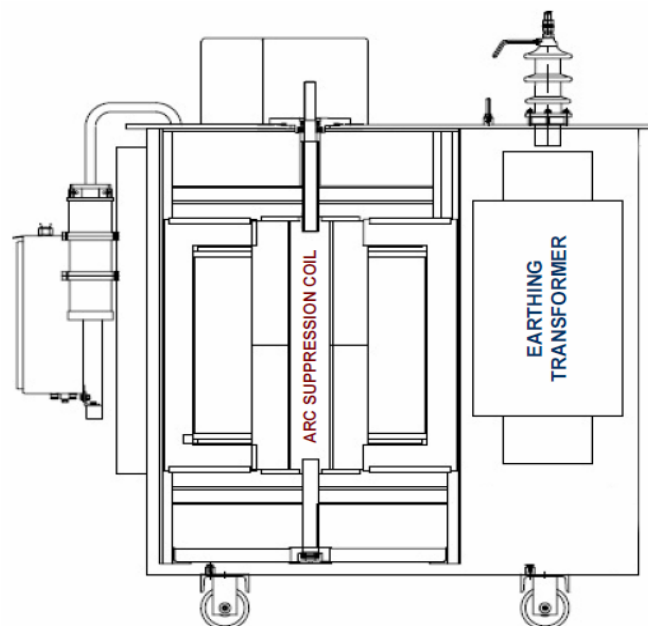


Obrázek 11 Celkový pohled na kombinovanou zhášecí tlumivku typu ASRC 1.6P

4.1.1 Kombinovaná zhášecí tlumivka ASRC X.XX/X

Tento druh zařízení je kombinací zhášecí tlumivky a zemního transformátoru umístěného do společné vlnité nádoby s transformátorovým olejem. Integrovaná aktivní část transformátoru vytváří nulový bod, který může být vyvedený na víko ZT, kde je potom propojen se zhášecí tlumivkou, nebo nulový vývod vyvedený není a spojení je provedeno uvnitř stroje. Kombinovaná tlumivka ASRC pracuje stejně jako plynule laditelná zhášecí tlumivka pro kompenzaci kapacitních proudů při zemním spojení. Používají se především

tam, kde není dostatečný prostor pro oddělení části transformátoru a ZT, nebo tam kde je instalace ASRC výhodnější.



Obrázek 12 Pohled na řez ASRC a rozmístění transformátoru a aktivního dílu ZT

V důsledku velké poptávky ze strany zákazníků, se tento produkt ve firmě EGE začal vyrábět před několika málo lety a bylo vyrobeno něco kolem 70 kusů. Přestože nemá tak velkou tradici a historii jako mají zhášecí tlumivky, poptávku zákazníků po tomto produktu je firma EGE schopna uspokojit. Typový přehled vyráběných kombinovaných zhášecích tlumivek v EGE je možné vidět v následující tabulce.

Tabulka 2 Typový přehled kombinovaných ZT vyráběných v EGE

Typ	Jmenovité napětí sítě od-do[kV]	Jmenovitý proud od-do[A]	Jmenovitý výkon od-do[kVAr]	Provoz
ASRC 0.16/P	6	55	190	DB
ASRC 0.63/P	6 - 15	20 - 173	190 - 600	DB
ASRC 1.0P	6 – 36,7	30 - 289	636 - 1000	DB
ASRC 1.6/P	10 - 35	80 - 208	1200 - 1617	DB
ASRC 3.2/P	16,4 - 20	300 - 350	2983 - 3500	DB
ASRC 5.0	20	500	5775	KB-2hod

4.1.2 Schéma zapojení pro zkoušku indukovaným napětím na ASRC

V příloze č.1 této práce je přiloženo kompletní schéma zapojení pro zkoušku indukovaným napětím. Zkušební obvod je zapojen dle tohoto schématu. Výstupní napětí z měniče frekvence je přivedeno na pomocné vinutí zhášecí tlumivky. Svorky 1U,1V,1W jsou spojeny a zde je zároveň připojena vazební kapacita pro vyhodnocování výbojové činnosti. Svorka 1B je připojena na zemní potenciál. Ostatní svorky pomocných a měřících vinutí jsou zapojeny jako při běžném provozu. Poloha tlumivky musí být během této zkoušky nastavena na největší indukčnost, tedy jádra magnetického obvodu sjeta co nejvíce na sebe, jelikož s rostoucí vzduchovou mezerou roste množství energie potřebného k dosažení zkušebního napětí.

4.2 Průběh zkušebních hladin v závislosti na čase

Tento druh zhášecích tlumivek je vyráběn do sítí s jmenovitým napětím $U_r = 20$ kV. Maximální napětí v této síti U_m je 24 kV. Výpočet jednotlivých zkušebních hladin, který vychází z normy[6] a doba trvání zkoušky pro vyhodnocování výbojové činnosti jsou uvedeny v následující tabulce. Zároveň jsou zde uvedeny toleranční hodnoty naměřených ČV získaných během zkoušky odsouhlasené zákazníkem.

Tabulka 3 Zkušební postup a jednotlivé hladiny pro vyhodnocení výbojové činnosti na ZT typu ASRC 5.0

Zkouška indukovaným napětím s měřením ČV ($f=200$ Hz)								
Zkušební napětí „fáze – zem“ [kV]			Zkušební postup					Hodnota pozadí[pC]
			A	B	C	D	E	
			$1,1U_M/\sqrt{3}$	$1,3U_M/\sqrt{3}$	$2xU_R$	$1,3U_M/\sqrt{3}$	$1,1U_M/\sqrt{3}$	
	15,25	18,0	23,1	18,0	15,25			
Svorka zkoušená:	Svorka uzemněná:	Čas [s]	120	120	30	120	300	
1U+1V+1W	1B	Hodnota ČV[pC]	≤ 100	≤ 100	-	≤ 100	≤ 100	≤ 10

Výbojová činnost se vyhodnocuje v bodech ABDE, kde nesmí překročit hodnotu 100 pC. Na hodnotě plného zkušebního napětí se výbojová činnost nevyhodnocuje. Jelikož je tento druh ZT kombinací zhášecí tlumivky a transformátoru probíhá vyšetřování výbojové činnosti jak při 3f.měření, tak i při 1f.měření. Vzhledem k obsáhlosti veškerých měření, byla vyhodnocení výbojové činnosti provedena při 1f.měření, tedy zkoušce, kdy je přiloženo zkušební napětí zároveň na tlumivku, tak i na transformátor.

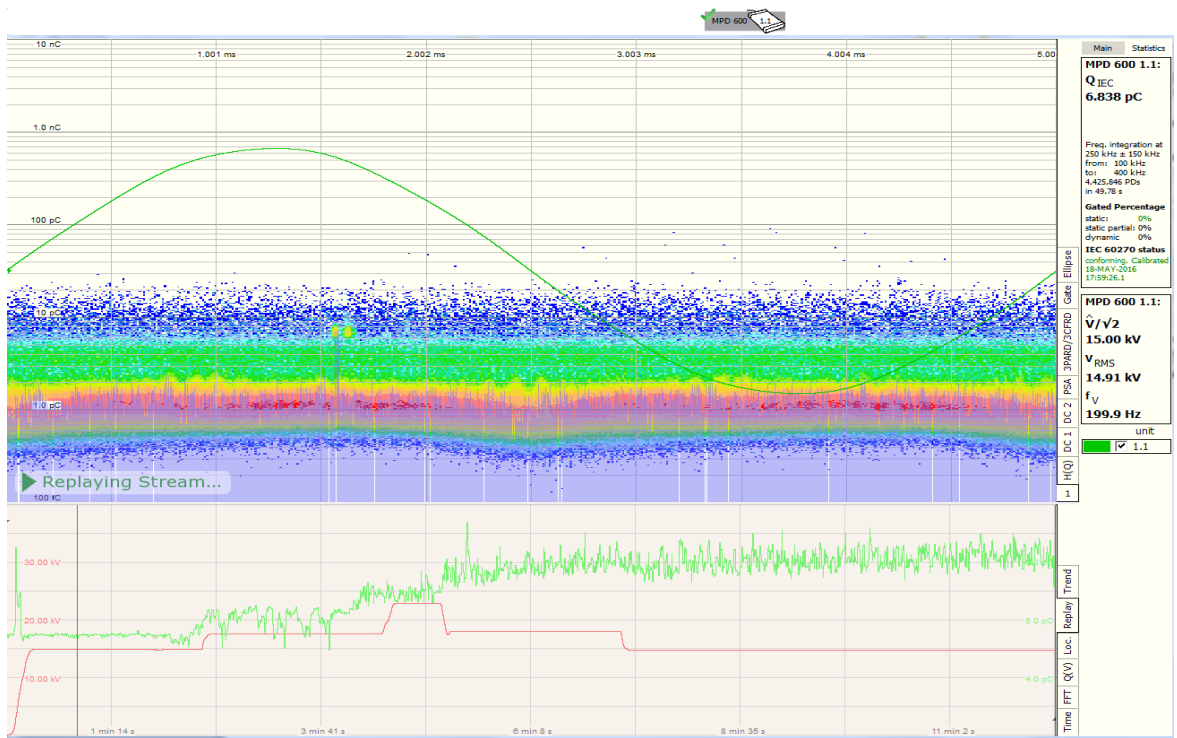
4.3 Vyhodnocení naměřených dat

Měření a vyhodnocení těchto kombinovaných tlumivek bylo zároveň provedeno při přijímacím řízení, tedy za účasti zákazníka, které proběhlo dne 18. 5. 2016.

4.3.1 ASRC 5.0 v.č.:5933

Tabulka 4 Záznam naměřených dat pro jednotlivé hladiny při 1f.měření z ASRC 5.0 v. č.:5933

Zkouška indukovaným napětím s měřením ČV ($f=200\text{Hz}$)								
Zkušební napětí „fáze – zem“ [kV]			Zkušební postup					Hodnota pozadí [pC]
			A	B	C	D	E	
			$1,1U_M/\sqrt{3}$	$1,3U_M/\sqrt{3}$	$2xU_R$	$1,3U_M/\sqrt{3}$	$1,1U_M/\sqrt{3}$	
			15,25	18,0	23,1	18,0	15,25	
Svorka zkoušená:	Svorka uzemněná:	Čas [s]	120	120	30	120	300	
1U+1V+1W	1B	Hodnota ČV [pC]	7-8	8-9	9-10	11-12	12-13	5-6



Obrázek 13 Záznam z průběhu na zkušební hladině A během zkoušek ASRC 5.0 v.č.:5933

4.3.2 ASRC 5.0 v.č.:5934

Tabulka 5 Záznam naměřených dat pro jednotlivé hladiny při 1f.měření z ASRC 5.0 v. č.:5934

Zkušební napětí „fáze – zem“ [kV]			Zkušební postup					Hodnota pozadí [pC]
			A	B	C	D	E	
			$1,1U_M/\sqrt{3}$	$1,3U_M/\sqrt{3}$	$2xU_R$	$1,3U_M/\sqrt{3}$	$1,1U_M/\sqrt{3}$	
			15,25	18,0	23,1	18,0	15,25	
Svorka zkoušená:	Svorka uzemněná:	Čas [s]	120	120	30	120	300	5-6
1U+1V+1W	1B	Hodnota ČV[pC]	5-6	6-7	6-7	5-6	12-13	

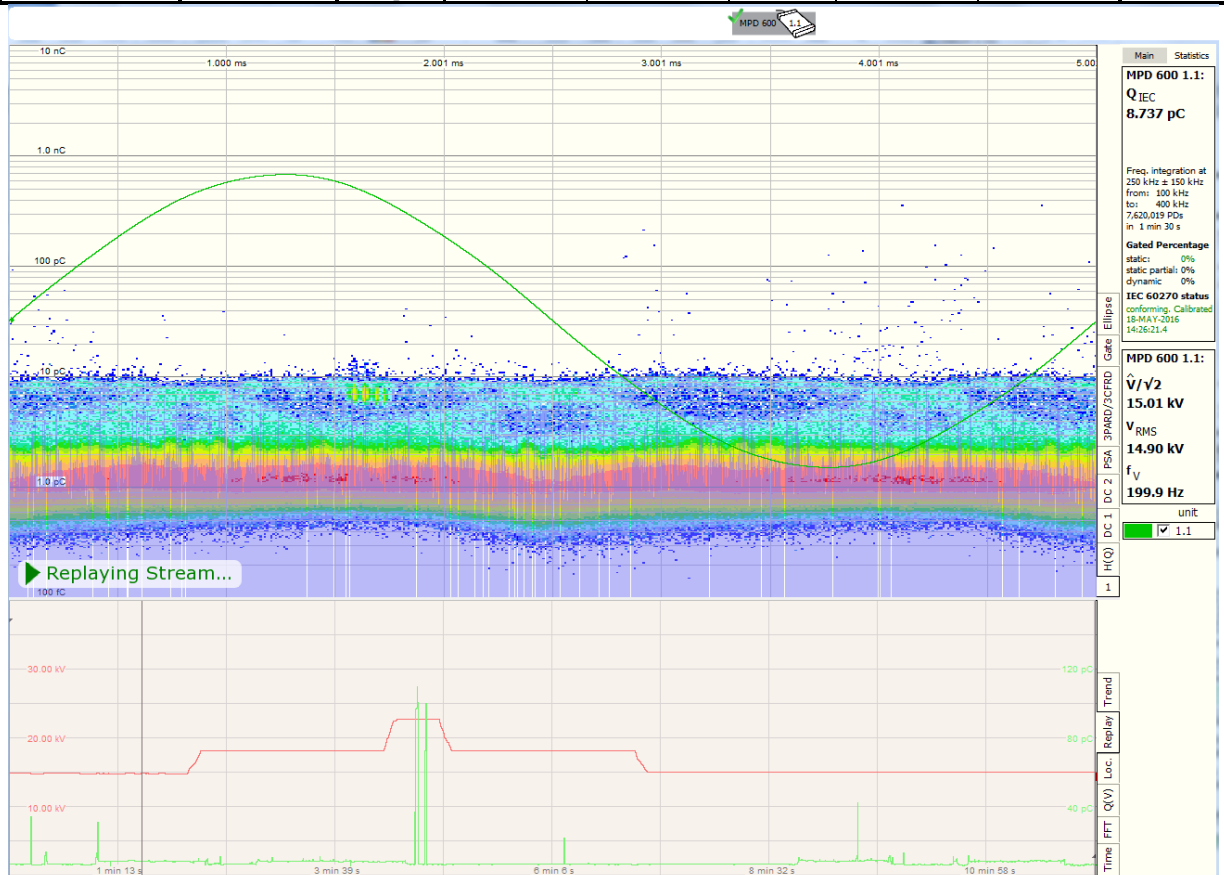


Obrázek 14 Záznam z průběhu na zkušební hladině A během zkoušek ASRC 5.0 v.č.:5934

4.3.3 ASRC 5.0 v.č.:5935

Tabulka 6 Záznam naměřených dat pro jednotlivé hladiny při 1f.měření z ASRC 5.0 v. č.:5935

Zkušební napětí „fáze – zem“ [kV]			Zkušební postup					Hodnota pozadí [pC]
			A	B	C	D	E	
			$1,1U_M/\sqrt{3}$	$1,3U_M/\sqrt{3}$	$2xU_R$	$1,3U_M/\sqrt{3}$	$1,1U_M/\sqrt{3}$	
			15,25	18,0	23,1	18,0	15,25	
Svorka zkoušená:	Svorka uzemněná:	Čas [s]	120	120	30	120	300	
1U+1V+1W	1B	Hodnota ČV[pC]	7 - 8	8 - 9	8 - 9	7 - 8	7 - 8	



Obrázek 15 Záznam z průběhu na zkušební hladině A během zkoušek ASRC 5.0 v. č.:5935

4.3.4 Shrnutí vyhodnocení naměřených dat

Průběh zkoušek byl zákazníkem akceptován podle 4.2 stejně jako výsledek naměřených hodnot částečných výbojů, které nepřesahovaly stanovené meze. Hodnota rušení pozadí byla změřena vždy před započítáním a po skončení samotných měření na jednotlivých zařízeních a nepřesáhla hodnoty 6 pC.

Ze záznamu trendu průběhu měření na kombinované ZT v. č.:5933 je možno vidět nepatrný nárůst hodnot částečných výbojů a to z 7 pC na 13 pC. Růst hodnot začal zároveň s přechodem z měřicího bodu A do B a z B do C. Zdálo by se tedy, že by se jednalo o výbojovou činnost závislou na napětí. Při přechodu z C na D však hodnota zůstává a osciluje na hodnotě 13 pC, což by odpovídalo spíše na rušení z externího okolí, než na výbojovou činnost způsobenou zhášecí tlumivkou.

Průběh záznamu z měření na kombinované ZT v. č.:5934 je, co se týče hodnot obdobný s předchozí zhášecí tlumivkou. Hodnoty zdánlivého náboje q_0 jsou v rozmezí 7 ÷ 9 pC. Stejně jako u předchozí kombi zhášecí tlumivky se v poslední vyhodnocovací části, tedy v bodě E, objeví zvýšená hodnota částečných výbojů způsobená pravděpodobně externím rušením.

Poslední záznam z měření na kombinované ZT v. č.:5935 vykazuje obdobné hodnoty jako předcházející kombinované tlumivky s tím, že se zde neprojeví zvýšené hodnoty způsobené rušením. Pouze během plného zkušební napětí se objevily dvě malé špičky, které ale nebyly způsobeny výbojovou činností ZT.

Závěrem této kapitoly je nutné zmínit, že v průběhu vývoje měření výbojové činnosti na tomto typu zhášecí tlumivky, nebyly vždy výsledky takto přijatelné. Bylo nutné provést některé konstrukční úpravy k dosažení lepších výsledků. Tyto konstrukční úpravy budou popsány v následující kapitole.

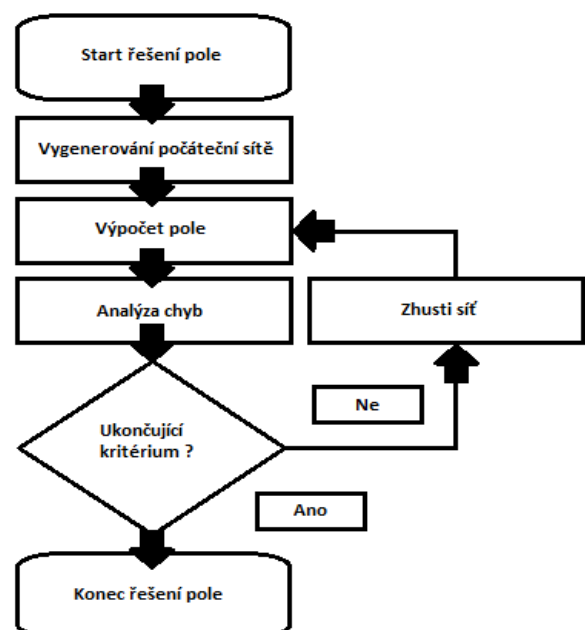
5 Výpočet a simulace rozložení elektrostatického pole v izolačním systému zhášecí tlumivky ASRC 5.0

Pro simulaci elektrostatického pole bylo použito softwarového programu MAXWELL 2D/3D, ANSYS Electromagnetics Suite 17.1.0.

5.1 MAXWELL – Úvod do programu

Maxwell 2D/3D Electromagnetics je software se zaměřením na řešení problematiky elektrostatického a magnetostatického pole, problematiku časově proměnných magnetických polí, polí vířivých proudů v oblastech elektromagnetismu. V oblastech nízkofrekvenčních dokáže být dobrý pomocník pro důvěryhodné simulace elektromagnetických polí. Simulační prostředí programu Maxwell umožňuje pomocí přídavných modulů snadno vytvářet 3D modely. Pro řešení elektrických, magnetostatických či jiných lze modely vytvářet např. pomocí Inventoru, který umožňuje projekty ukládat do formátu podporující software Maxwell. Ke svým výpočtům používá tento program tzv. metodiku FEA z anglického Finite Element Analysis. Jde o metodu konečných prvků – MKP. Tato metoda je založena na předpokladu, že model, který je vytvořen má konečný tvar. Obecně řečeno Maxwell pro hledání výsledku svého řešení používá soustavu algebraických rovnic, které získává diskretizováním geometrie řešeného objektu do malých prvků za pomoci „sítě“ (mesh). Sestavení objektu se potom nazývá metoda konečných prvků. Na obr.16 je zjednodušený algoritmus výpočtu pole objektu.

Podle zadaných počátečních a okrajových podmínek Maxwell vytvoří výpočetní síť, kterou diskretizuje řešený objekt. Posléze vypočte a zanalyzuje chyby. Je-li je výsledek neuspokojivý, Maxwell zhustí síť pro diskretizaci a provede opakovaný výpočet. V případě, že je výsledek tak přesný, že se dá objekt zpětně zrekonstruovat, se výpočet ukončí. Výpočty tak mohou trvat dlouhou dobu a ačkoliv nejsou hardwarové nároky na běh programu



Obrázek 16 Vývojový diagram výpočtu pole

vysoké, pro práci s Maxwellem je výhodou pracovat s výkonným počítačem se silným procesorem a větším množstvím operační paměti. Výkonný výpočetní systém dokáže výsledky výpočtu zkrátit o několik hodin. [11]

Pomocí řešení elektrického pole umožňuje Maxwell 3D vyřešit model:

- **Electrostaticfields** – řešení elektrostatického pole v dielektriku, kterým lze dodatečně spočítat kapacity, nebo síly působící v modelu,
- **Transientelectricfields** – řeší přechodné děje v el.poli,
- **DC conductionfields** – řeší DC el.pole ve vodičích,

Pomocí řešení magnetického pole:

- **Magnetostaticfields** – řeší magnetostatické pole,
- **Transientmagneticfields** – řeší v magnetickém poli přechodné děje,
- **Eddy currentfields** – řeší pole vířivých proudů vznikající v pevném vodiči modelu.

5.2 Měření výbojové činnosti před konstrukčními úpravami

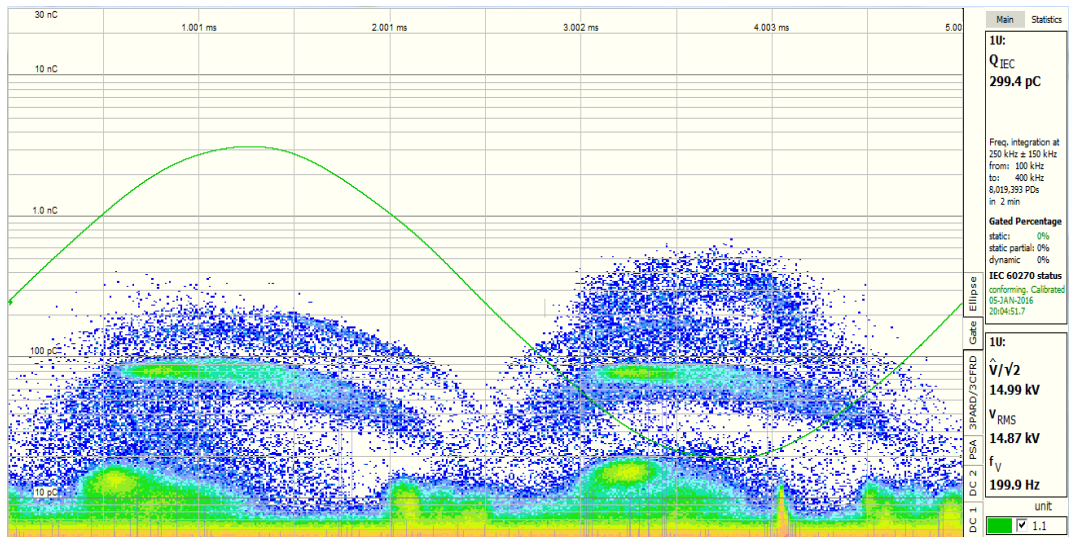
Před konstrukčními úpravami bylo v průběhu ledna roku 2016 provedeno několik měření na kombinované ZT typu ASRC 5.0. Opakovaná měření byla provedena z důvodu potvrzení zvýšené výbojové činnosti na tomto zařízení. Měření se prováděla jak během dne, tak i v noci, aby se vyloučily rušivé vlivy, které mohou výsledky měření značně zkreslit. V následující tabulce je možné vidět výsledky z jednoho měření, které by zákazníkem nemohly být odsouhlaseny a zařízení by tak nemohlo být přijato do provozu. Záznam z měření je při jednofázové indukované zkoušce s měřením ČV.

5.2.1 Naměřená data na kombinované tlumivce před úpravami

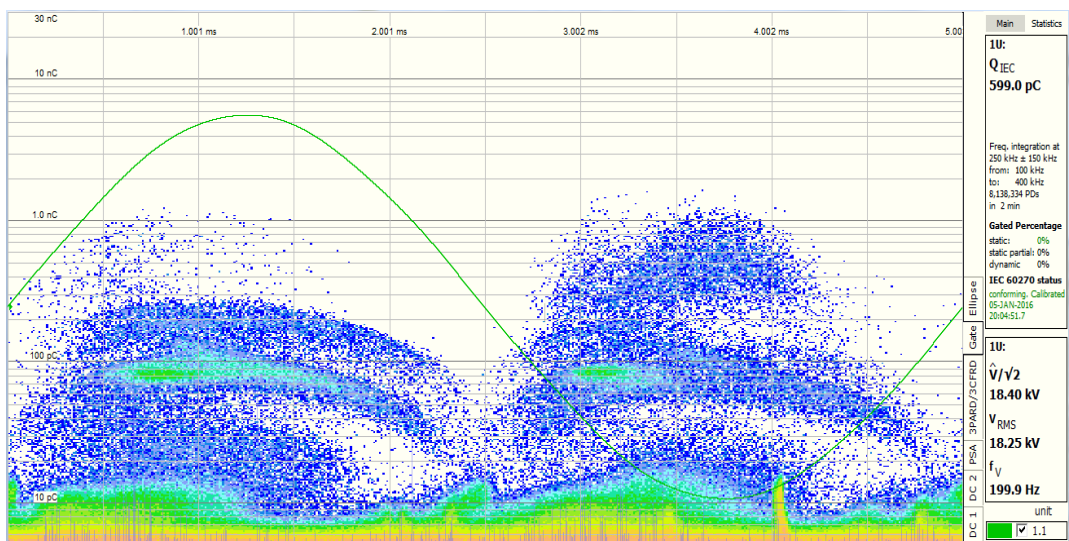
Tabulka 7 Záznam naměřených dat pro jednotlivé hladiny při 1f.měření z ASRC 5.0 v. č.:5955

Zkušební napětí „fáze – zem“ [kV]			Zkušební postup					Hodnota pozadí [pC]
			A	B	C	D	E	
			$1,1U_M/\sqrt{3}$	$1,3U_M/\sqrt{3}$	$2xU_R$	$1,3U_M/\sqrt{3}$	$1,1U_M/\sqrt{3}$	
			15,25	18,0	23,1	18,0	15,25	
Svorka zkoušená:	Svorka uzemněná:	Čas [s]	120	120	30	120	120	10-12
1U+1V+1W	1B	Hodnota ČV[pC]	300	600	1200	620	371	

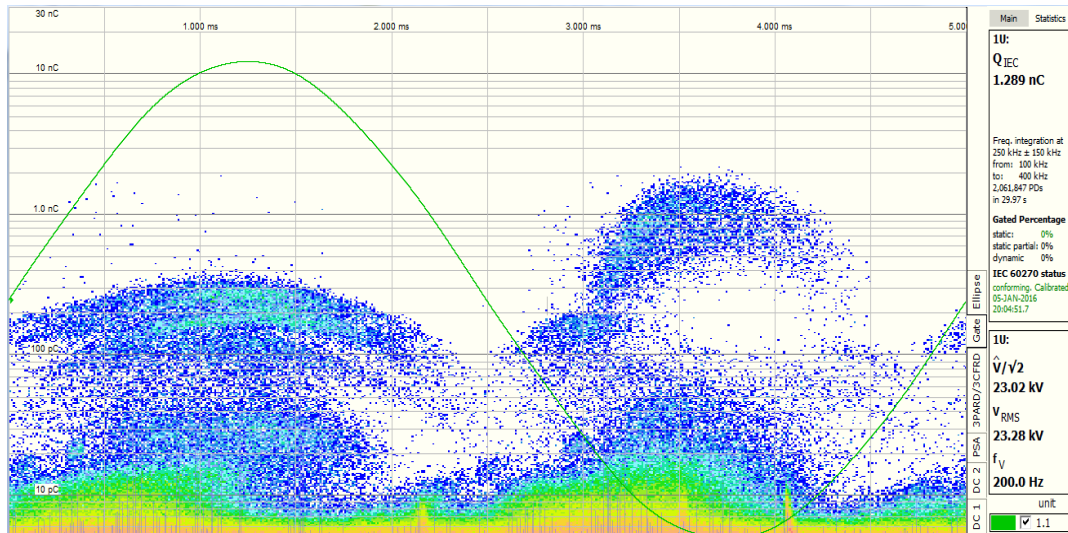
Následující obrázky ukazují na zvýšenou činnost během zkoušky.



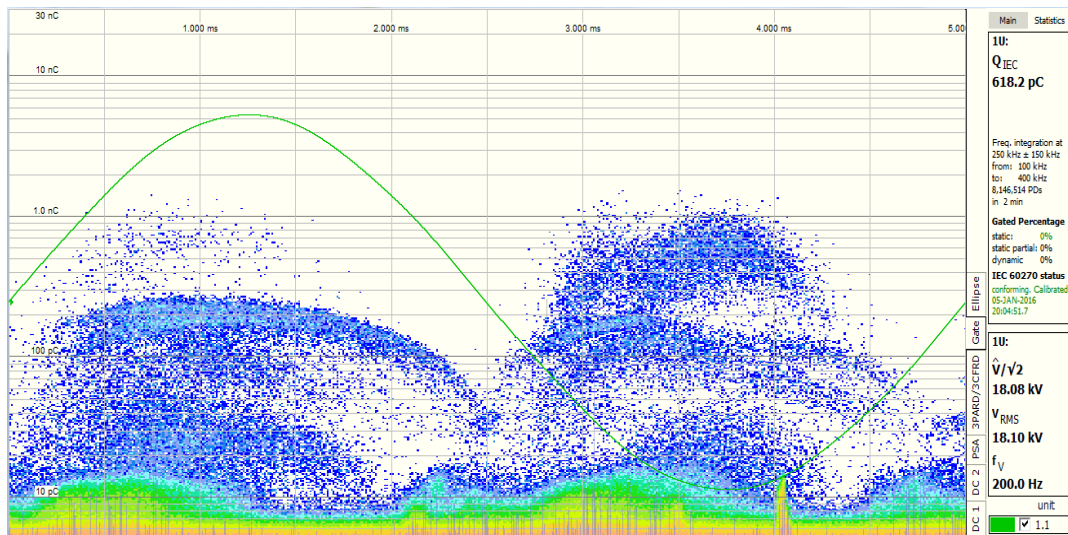
Obrázek 17 Průběh výbojové činnosti na zkušební hladině A v. č.:5955



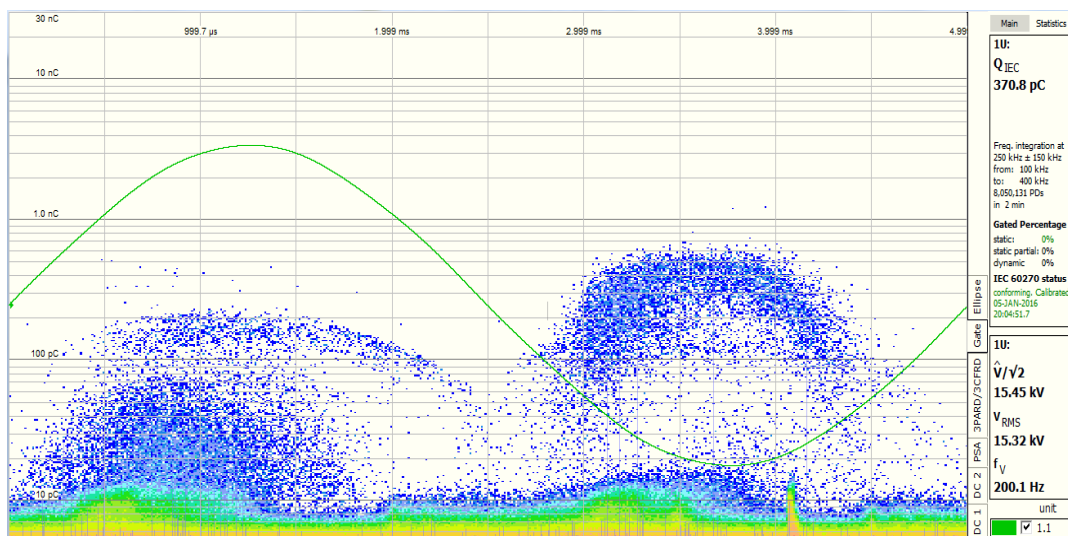
Obrázek 18 Průběh výbojové činnosti na zkušební hladině B v. č.:5955



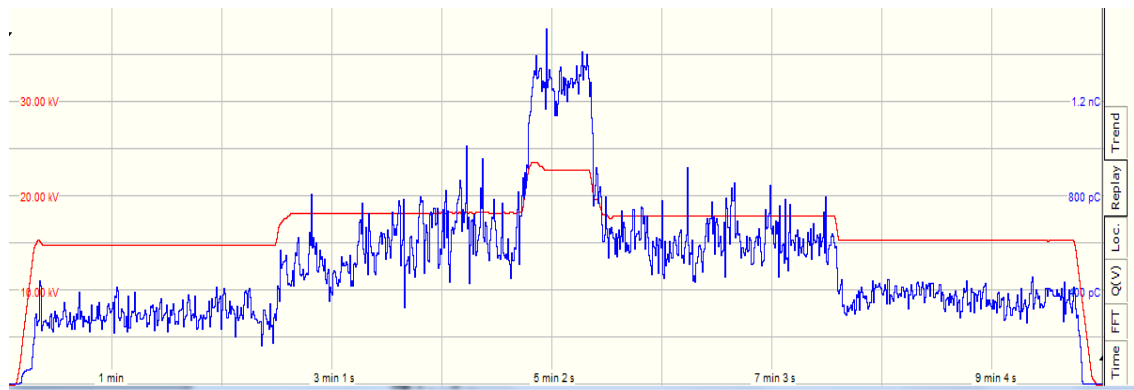
Obrázek 19 Průběh výbojové činnosti na zkušební hladině Cv.č.:5955



Obrázek 20 Průběh výbojové činnosti na zkušební hladině Dv.č.:5955



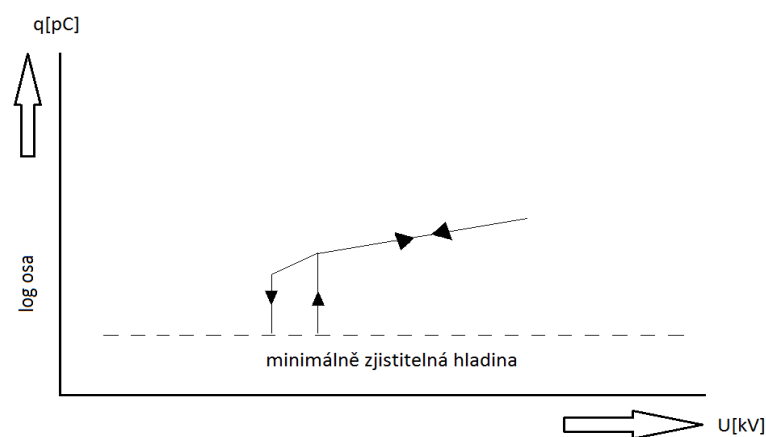
Obrázek 21 Průběh výbojové činnosti na zkušební hladině Ev.č.:5955



Obrázek 22 Trend průběhu měření v časev.č.:5955

5.2.2 Analýza měření před úpravou

V průběhu opakovaného měření byla zjištěna zvýšená výbojová činnost, která se s podobnými hodnotami opakovala, ať se jednalo o měření přes den, či v noci. S oddělením TPV byla provedena analýza, kdy vlivem opakovaného měření se vyloučila výbojová činnost způsobená rušivými vlivy. Důkladným rozborem se došlo k závěru, že se jedná částečné výboje vnitřní, které mohou vznikat na povrchu dielektrika v místech vysokého gradientu napětí, případně vnější výboje mezi izolacemi dotýkajících se vodičů. Projevem těchto výbojů jsou téměř symetrické průběhy v obou půlperiodách přiloženého napětí, což je patrné i z průběhů na obrázcích 17 až 21. Průběh výbojové činnosti lze zaznamenat ihned po zapálení a s hodnotou rostoucího přiloženého napětí roste i velikost zdánlivého náboje. Zhášecí napětí je podobné jako zapalovací, nebo nepatrně nižší.[12] Výbojová činnost mohla být také způsobena nedostatečnou vzdáleností vývodů z transformátoru od nulového potenciálu nádoby kombinované tlumivky.



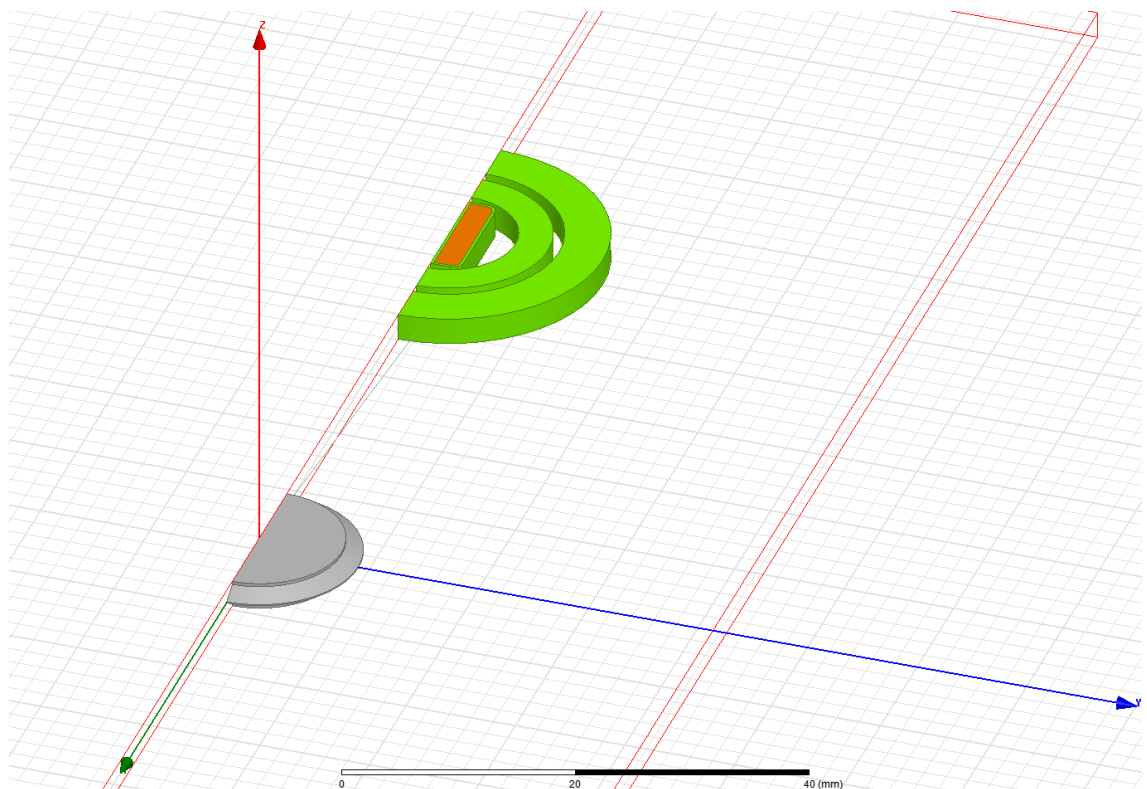
Obrázek 23 Závislost velikosti náboje na zkušebním napětí[3]

5.3 Simulace provedené před úpravou ASRC

Analýzou získaných dat byla vybrána možná kritická oblast uvnitř kombinované zhášecí tlumivky. V programu Maxwell bylo nasimulováno elektrostatické pole závitové tyče M18 proti vývodu. Model má výšku jednoho závitu svorníku a vše je symetrické. Napětí bylo zvoleno 23,1 kV, tedy stejné jako je plné zkušební napětí při zkoušce indukovaným napětím. Vývod jedné fáze transformátoru a svorníku magnetického obvodu byly od sebe vzdáleny 20 mm. Simulace byly provedeny na třech možných způsobech izolování hlavního vývodu a svorníku magnetického obvodu. Nejprve bez použití kartitové izolace, poté s použitím kartitové izolace na obou částech a poslední s kartitovou izolací umístěnou s minimální vzduchovou mezerou „natěsno“ na svorníku. Poslední simulace byla provedena s jednou kartitovou izolací umístěnou „natěsno“ na svorníku, kde ale navíc byla zvětšena vzdálenost od hlavního vývodu na 40 mm. V příloze č. 2 této práce je možné vidět celkový pohled na model svorníku včetně rozměrů.

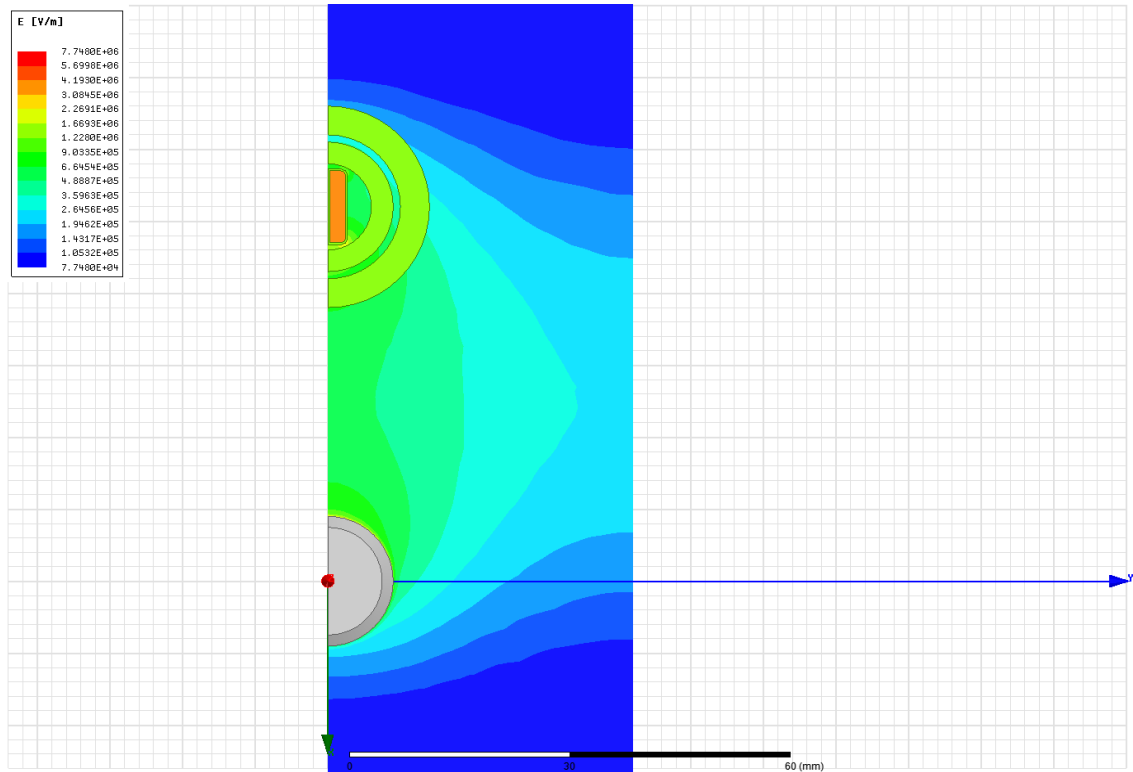
5.3.1 Simulace bez použití kartitové izolace

Uspořádání této simulace je možné vidět na následujícím obrázku.

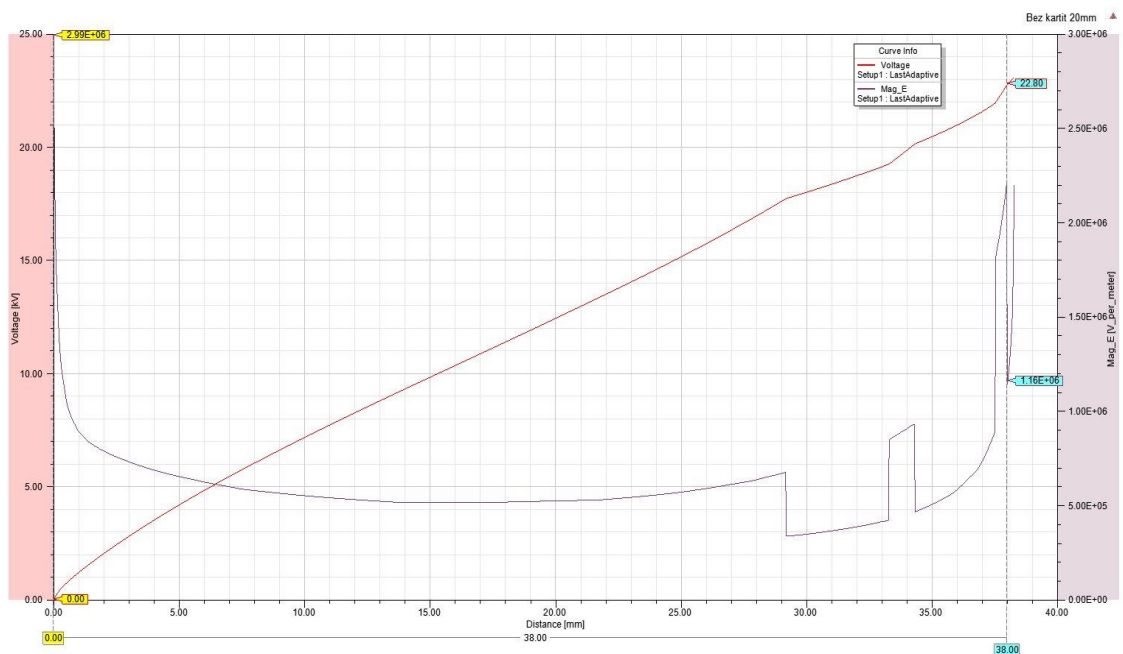


Obrázek 24 Uspořádání bez použití kartitové izolace

V prvním případě simulace byl izolován pouze hlavní vývod papírovou izolací o tloušťce 0,25 mm a dvěma trubkami Weidmann o tloušťce 3 a 4 mm. Následující obrázek ukazuje průběh intenzity elektrostatického pole.



Obrázek 25 Intenzita elektrostatického pole při pohledu shora

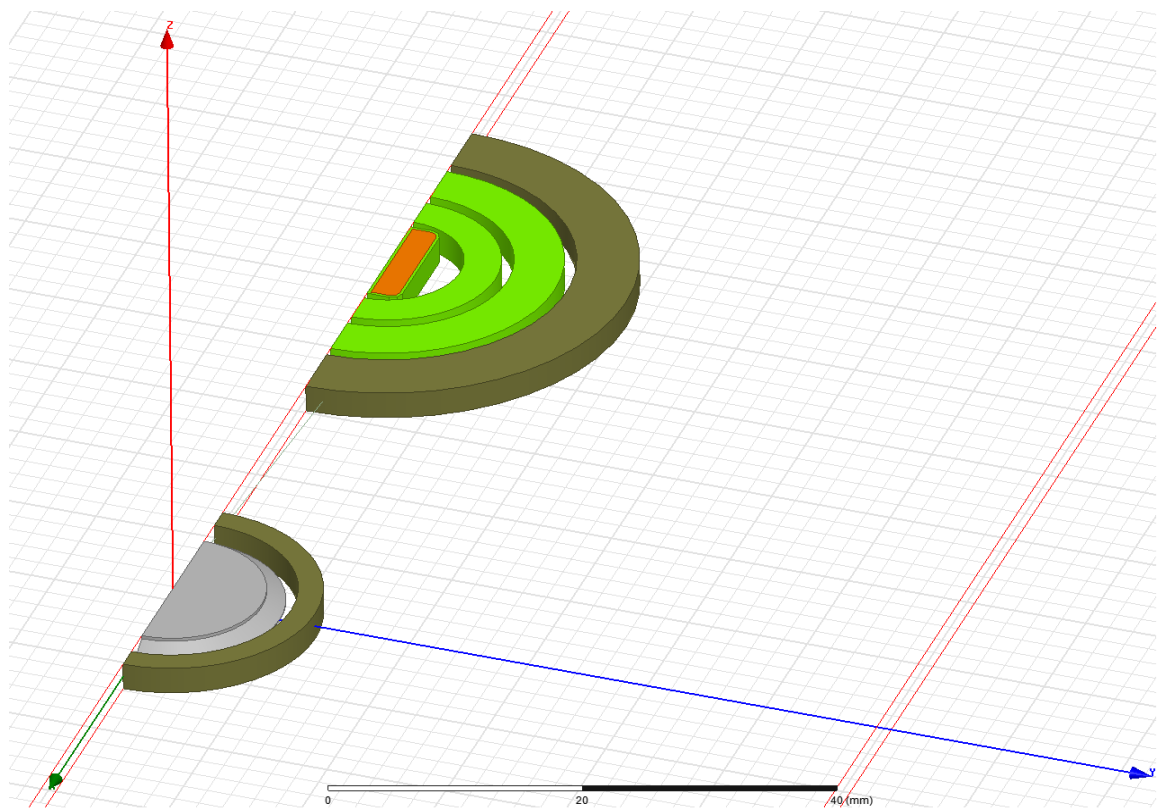


Obrázek 26 Průběhu intenzity elektrostatického pole a napětí v závislosti na vzdálenosti

Na obrázku 26 je možné vidět grafické znázornění průběhu intenzity elektrostatického pole a přiloženého napětí v závislosti na vzdálenosti mezi vývodem a svorníkem. Výsledná maximální hodnota intenzity elektrostatického pole byla v tomto případě Maxwellem vypočtena na 2,99 kV/mm.

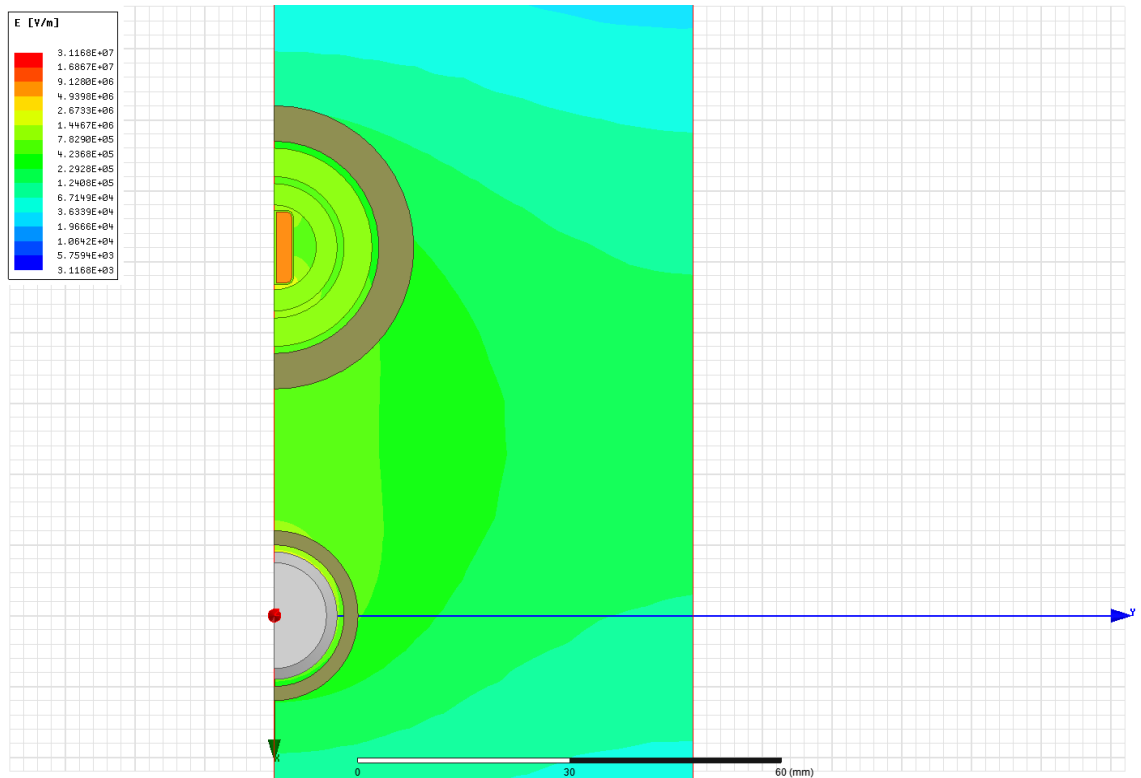
5.3.2 Simulace s použitím kartitové izolace na vývodu i svorníku

Uspořádání je patrné z následujícího obrázku. Kartitová izolace (na obrázku tmavě zelená) je volně umístěna jak na vývodu transformátoru, tak i na svorníku. Tloušťka izolace na svorníku je 2 mm a na vývodu pak 5 mm.

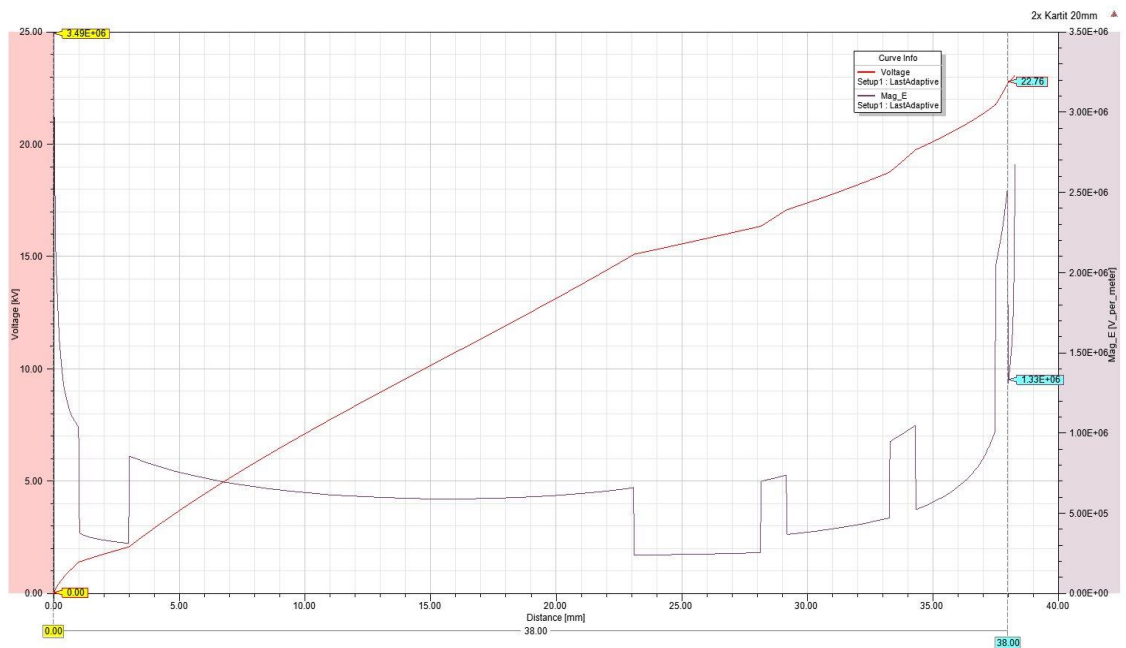


Obrázek 27 Uspořádání simulace s použitím kartitové izolace

Intenzita elektrostatického pole a grafický průběh intenzity a přiloženého napětí v závislosti na vzdálenosti je možné vidět na obrázcích 28 a 29.



Obrázek 28 Intenzita el. statického pole při pohledu shora

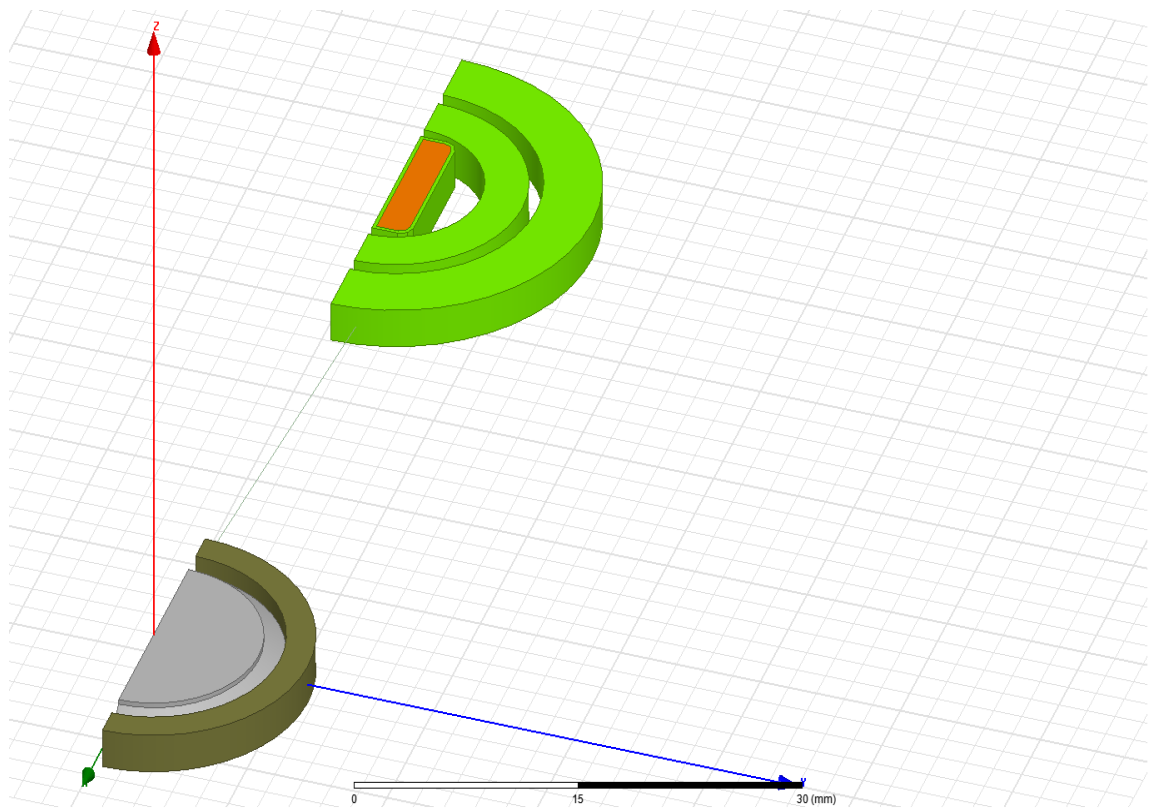


Obrázek 29 Průběhu intenzity elektrostatického pole a napětí v závislosti na vzdálenosti

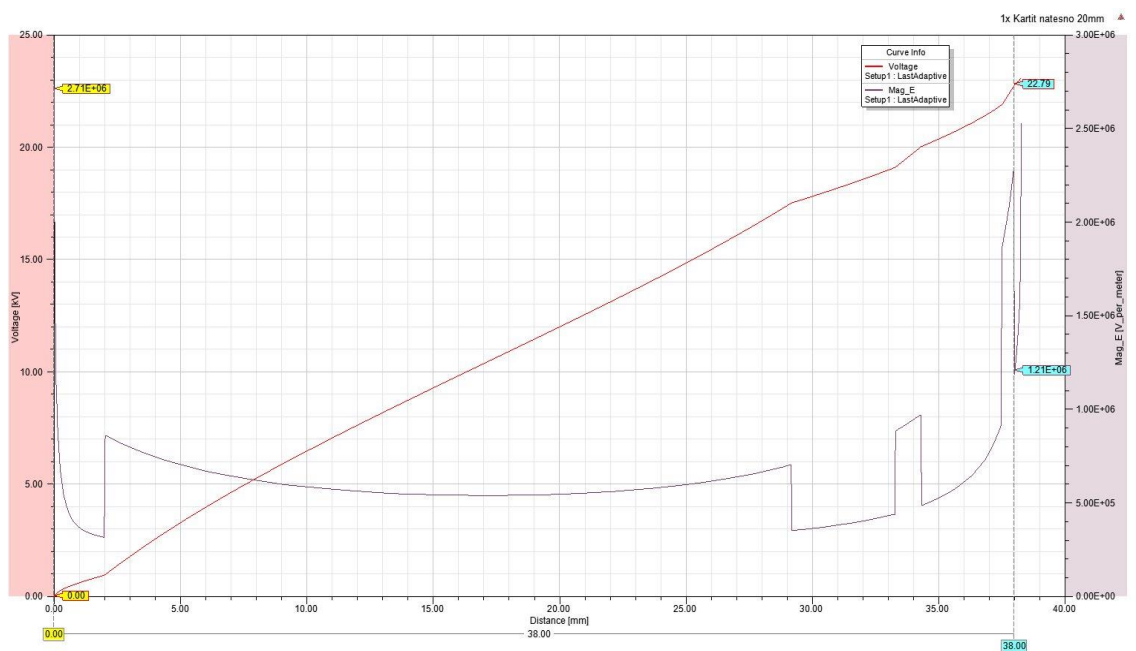
V tomto případě byla výsledná hodnota velikosti intenzity elektrostatického pole Maxwellem vypočtena na 3,49 kV/mm.

5.3.3 Simulace s kartitem „natěsno“ pouze na svorníku

Při této simulaci byla vzdálenost svorníku a vývodu stále 20 mm, ale byla použita pouze jedna izolace kartit na svorníku v jeho těsném doteku. Uspořádání je na obrázku 30.



Obrázek 30 Uspořádání s jedním kartitem "natěsno" se svorníkem

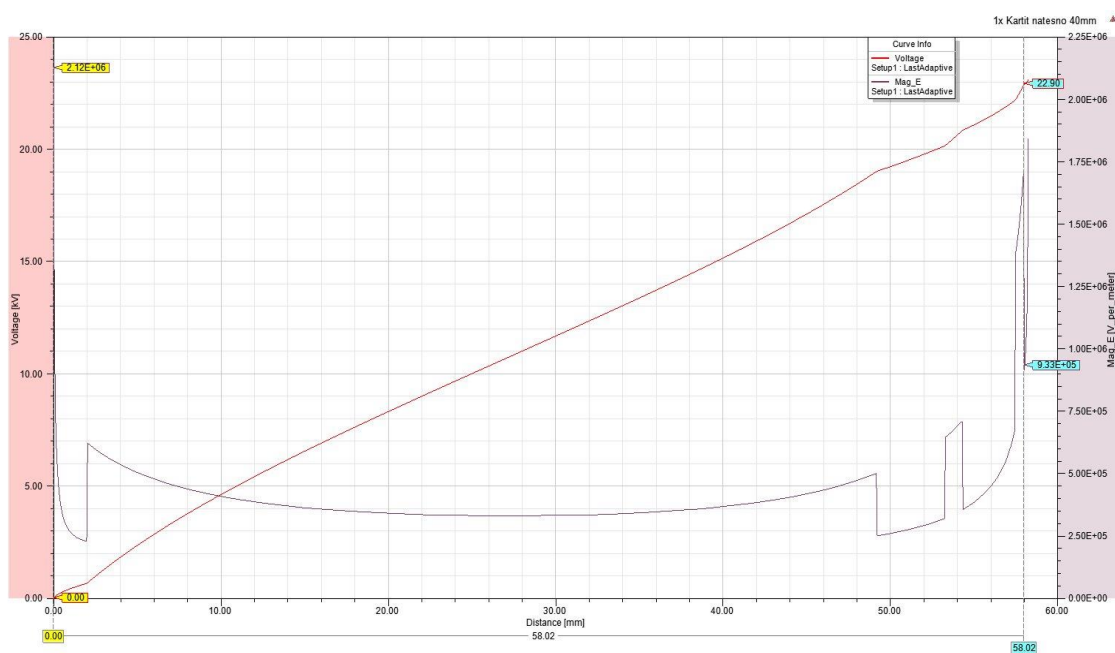


Obrázek 31 Průběhu intenzity el.stat. pole a napětí v závislosti na vzdálenosti

Výsledná hodnota byla Maxwellem vypočtena na hodnotu 2,71 kV/mm, což je při zachování vzdálenosti 20 mm mezi elektrodami nejlepší výsledek.

5.3.4 Simulace s kartitem „natěsno“ pouze na svorníku ve vzdálenosti 40 mm

Tato simulace byla provedena se stejnými parametry jako v bodě 5.3.3 jen s tím rozdílem, že byla změněna vzdálenost jednotlivých elektrod od sebe na dvojnásobnou hodnotu, tedy 40 mm. Uspořádání je tedy shodné s obrázkem 30. Výsledný průběh intenzity elektrostatického pole a přiloženého napětí je na obrázku 32.



Obrázek 32 Průběhu intenzity el. stat. pole a napětí v závislosti na vzdálenosti (40 mm)

Výsledná intenzita elektrostatického pole byla Maxwellem stanovena na hodnotu 2,12 kV/mm.

5.4 Vyhodnocení provedených simulací a návrh konstrukční úpravy

Získaná data z provedených simulací se stala v oddělení TPV velmi cenným podkladem k diskuzi pro rozhodnutí jakou konstrukční úpravu provést za účelem dosažení lepších hodnot výbojové činnosti. S nejhodnějším výsledkem vyšla simulace s použitím kartitové izolace na obou elektrodách, kdy výsledná hodnota byla 3,49 kV/mm. V případě že nebyla použita kartitová izolace vůbec, byla výsledná hodnota intenzity 2,99 kV/mm. S výsledkem 2,71 kV/mm vyšla simulace, kdy kartitová izolace byla umístěna v těsném kontaktu se svorníkem. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo při použití kartitové izolace „natěsno“ se

svorníkem a při zvětšení vzdálenosti na dvojnásobek mezi hlavním vývodem a svorníkem. Na základě této simulace se oddělení TPV rozhodlo zvětšit vzdálenosti mezi vývody transformátoru a nulovými potenciály uvnitř stroje. Jelikož se jedná o velice flexibilní části, nebyl problém s konstrukční úpravou za účelem dosažení větších vzdáleností. Zároveň během této konstrukční změny došlo k celkovému upravení a uspořádání všech vývodů kombinované zhášecí tlumivky.

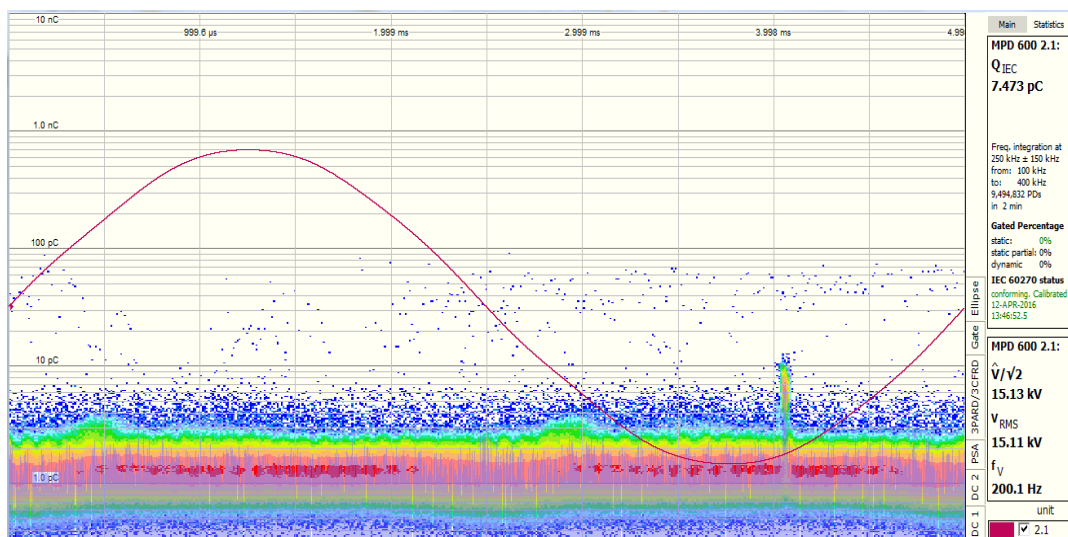
5.5 Měření výbojové činnosti po provedení konstrukčních úprav

Měření výbojové činnosti bylo provedeno na kombinované zhášecí tlumivce po veškerých úpravách provedených v měsíci březnu 2016.

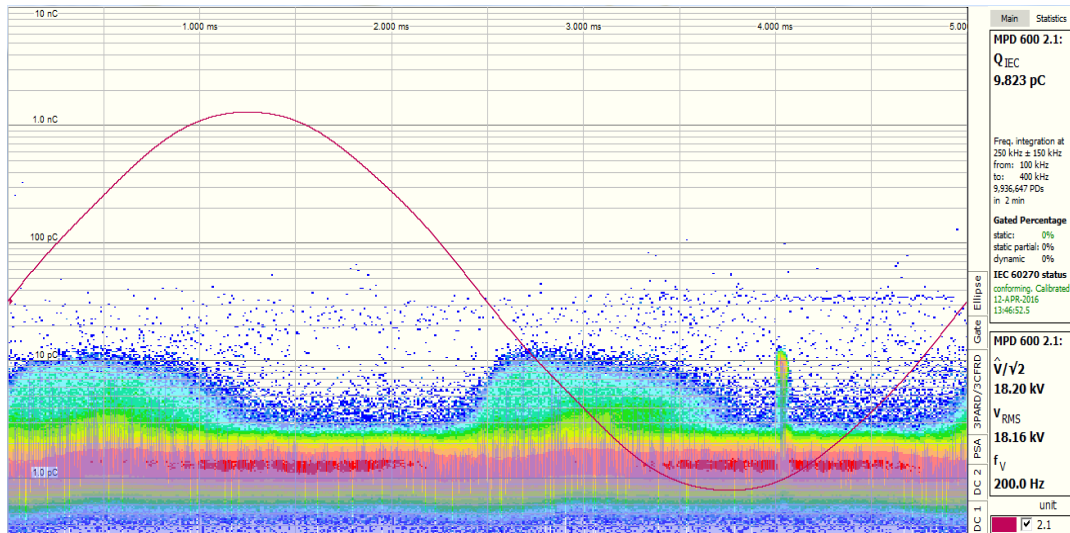
Tabulka 8 Měření výbojové činnosti při na ASRC 5.0 v. č. 5955 po provedení veškerých úprav

Zkouška indukovaným napětím s měřením ČV (f=200Hz)								
Zkušební napětí „fáze – zem“ [kV]			Zkušební postup					Hodnota pozadí [pC]
			A	B	C	D	E	
			$1,1U_M/\sqrt{3}$	$1,3U_M/\sqrt{3}$	$2xU_R$	$1,3U_M/\sqrt{3}$	$1,1U_M/\sqrt{3}$	
			15,25	18,0	23,1	18,0	15,25	
Svorka zkoušená:	Svorka uzemněná:	Čas [s]	120	120	30	120	120	
1U+1V+1W	1B	Hodnota ČV [pC]	7-8	9-10	11-12	10-11	8-9	5-6

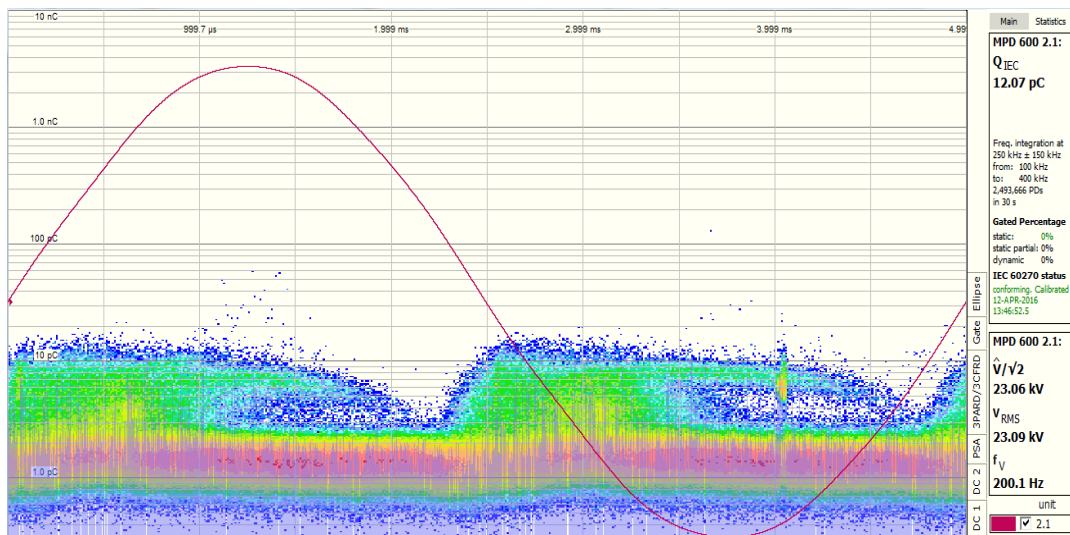
Následující obrázky (33÷38) ukazují na záznamy z jednotlivých zkušebních postupů provedených při přejímce zařízení provedené v dubnu 2016.



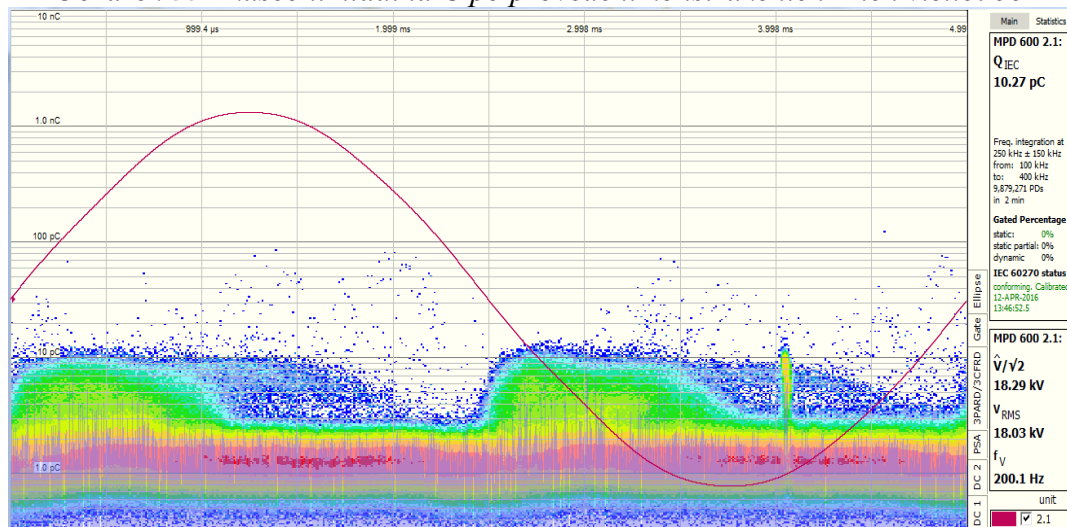
Obrázek 33 Zkušební hladina A po provedení konstrukčních změn v.č.:5955



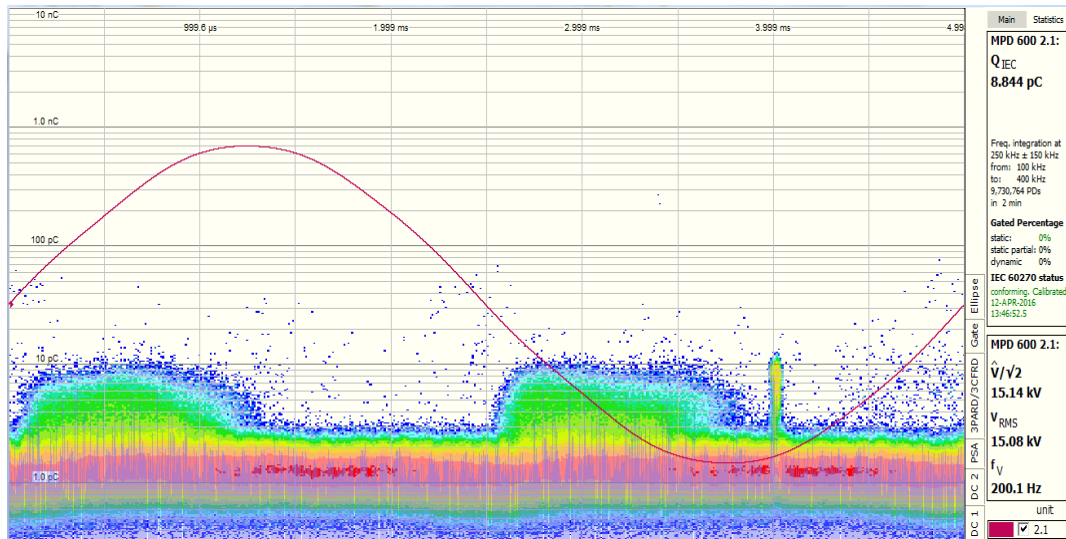
Obrázek 34 Zkušební hladina B po provedení konstrukčních změn v.č.:5955



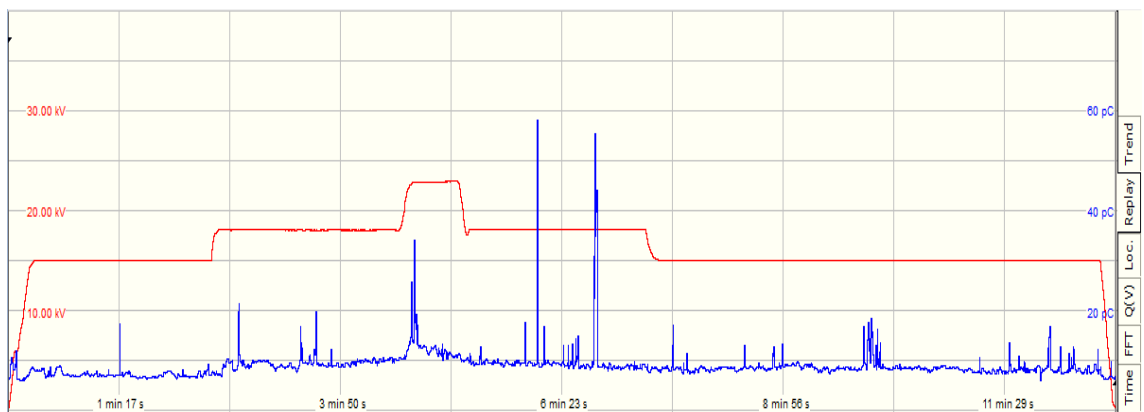
Obrázek 35 Zkušební hladina C po provedení konstrukčních změn v.č.:5955



Obrázek 36 Zkušební hladina D po provedení konstrukčních změn v.č.:5955



Obrázek 37 Zkušební hladina Epo provedení konstrukčních změn v.č.:5955



Obrázek 38 Trend průběhu měření ČV po provedení konstrukčních změn v.č.:5955

5.6 Vyhodnocení získaných měření

Na základě získaných simulací byly provedeny konstrukční úpravy především v podobě upravení hlavních vývodů ASRC a zvětšení vzdáleností těchto vývodů od nádoby, případně jiných nulových potenciálů. Rozdíl oproti měření před úpravami byl zásadní pro vytvoření nových pravidel při postupu a zapojování jednotlivých vývodů tohoto druhu zařízení.

Závěr

Cílem této práce bylo popsání funkce a konstrukce izolačního systému zhášecích tlumivek. Ověření kvality provedení izolačního systému zhášecích tlumivek pomocí měření částečných výbojů během zkoušek indukovaným napětím. Funkce a konstrukce izolačního systému byla popsána v první kapitole této práce a systém zkoušek pro ověření kvality izolačního systému byl definován ve druhé kapitole.

Ve třetí kapitole bylo popsáno ověření kvality izolačního systému zhášecích tlumivek, pomocí měření částečných výbojů během zkoušky indukovaným napětím. Zde byly definovány účinky částečných výbojů na izolační systém a probrány užívané metodiky měření ve firmě EGE. V první části následující kapitoly je představena kombinovaná zhášecí tlumivka, na kterou navazuje porovnání a rozbor naměřených dat z měření částečných výbojů na třech typech zařízení ASRC 5.0. Během těchto měření se nevyskytly větší odchylky, takže zařízení byla zákazníkem přijata bez výhrad.

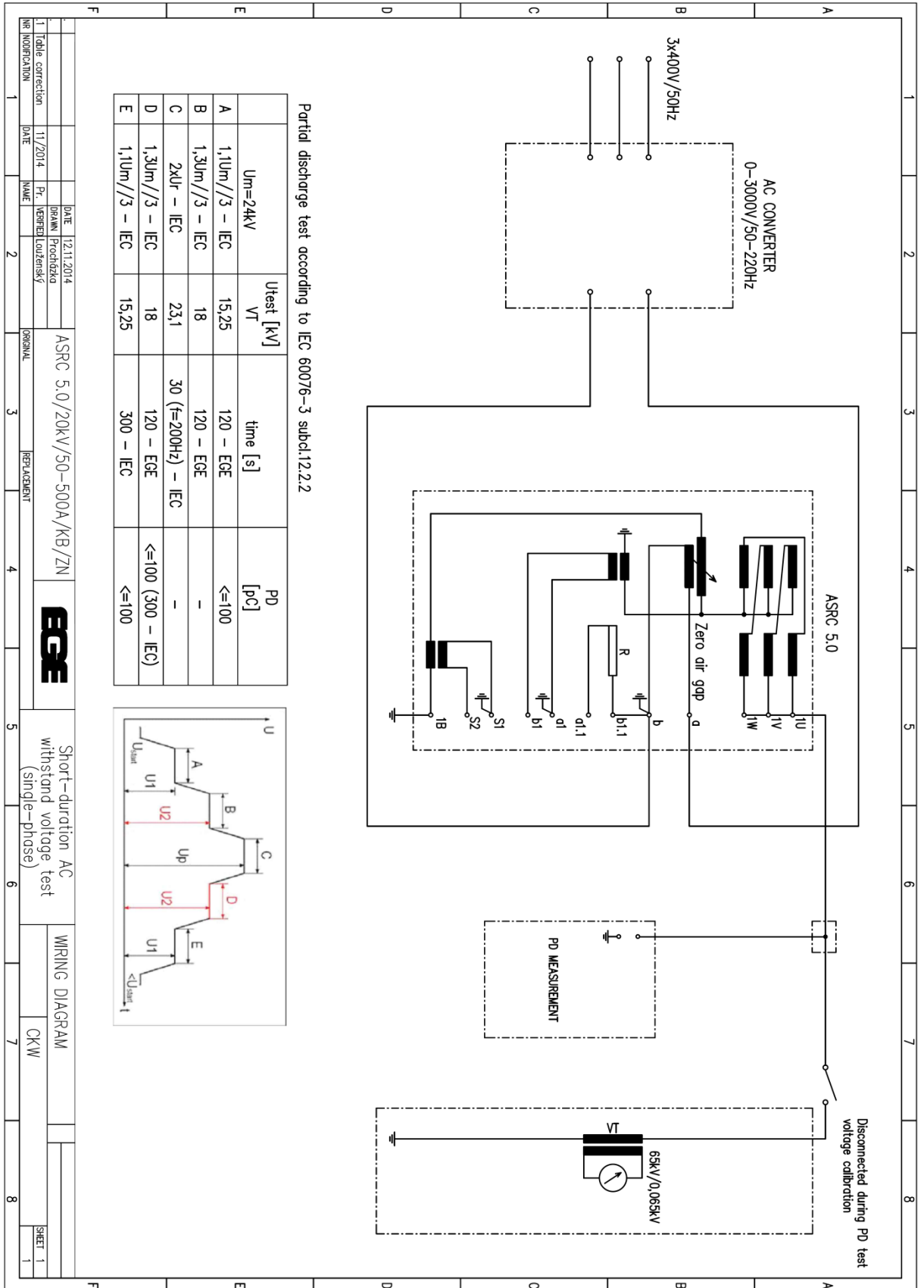
Poslední pátá kapitola se zabývala simulacemi vybrané kritické části systému, jejíž detail byl modelován pomocí programu MAXWELL. Zde bylo vybráno několik možných způsobů izolování hlavního vývodu ZT a jednoho závitu svorníku M18 magnetického obvodu. Model simuluje v různých kombinacích průběh intenzity elektrostatického pole, kdy nejlepšího výsledku bylo dosaženo při zvětšení vzdálenosti vývodu od svorníku z 20 mm na 40 mm. Výsledek těchto simulací se stal podmětem pro konstrukční úpravu kombinované ZT především v oblasti uspořádání a vymezení dostatečných vzdáleností vývodů ZT od nulového potenciálu stroje. Provedené simulace se tak staly, nejen v tomto případě, velmi cenným nástrojem pro konstrukci a vývoj tohoto zařízení, především v oblasti zajištění lepších výsledků během měření výbojové činnosti. Veškeré konstrukční úpravy byly následně ověřeny měřením, kdy velikost zdánlivého náboje, i při plném zkušebním napětí, nepřesáhly hodnoty 15 pC oproti původním 1200 pC.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Vlach, J.: *Pokyny pro provoz a údržbu distribučních transformátorů*, ZM – 14. Praha: AZVN, 2005.
- [2] Anderlová, N.: *Metoda určení průrazného napětí kapalných izolantů*, ZM – 04. Praha: AZVN, 2000
- [3] Mentlík V., Pihera J., Polanský R., Prosr P., Trnka P.: *Diagnostika elektrických zařízení*. 1. vyd. BEN-Praha 2008. 440 s. ISBN 978-80-7300-232-9
- [4] ČSN EN 60156 Izolační kapaliny – Stanovení průrazného napětí při síťovém kmitočtu. 1998.
- [5] ČSN EN 60076-4 Výkonové transformátory – Průvodce zkouškami atmosférickým a spínacím impulzním napětím. 2003
- [6] ČSN EN 60076-3 Výkonové transformátory – Izolační hladiny, dielektrické zkoušky a vnější vzdušné vzdálenosti. 2003.
- [7] Mentlík V.: *Diagnostika izolantů*. VSŠE, Plzeň, 1986, 62 s.
- [8] ČSN EN 60270 technika zkoušek vysokým napětím - Měření částečných výbojů. 2001.
- [9] Záliš K.: *Částečné výboje v izolačních systémech elektrických strojů*. 1. vyd. Praha 2005. 139 s. ISBN 80-200-1358-X
- [10] Vlášek V.: *Měření částečných výbojů v průmyslové výrobě*. České Budějovice: 2015
- [11] ANSOFT CORPORATION. User's guide – Maxwell 2D,; Pittsburgh, USA: Ansoft, 2009. Dostupné z: http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell2D_V12.pdf
- [12] Pihera J., Martínek P., Trnka P., Netolický P.: *Analýza signálů pulzů částečných výbojů*. ElectroScope ISSN 1802-4564[online]. Ročník 2008. 2. vyd. Dostupné z: http://147.228.94.30/index.php?option=com_content&view=frontpage&Itemid=9

Příloha A

Schéma zapojení indukované zkoušky spolu s měřením výbojové činnosti na zařízení ASRC 5.0.



Příloha B

Geometrie simulace použítá v programu MAXWELL.

