

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Inovace laboratorních úloh z předmětu technika vysokého
napětí**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr KUČERA**

Osobní číslo: **E15N0106P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Elektroenergetika**

Název tématu: **Inovace laboratorních úloh z předmětu technika vysokého napětí**

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. Podrobně se seznamte se stávajícími úlohami z předmětu TVN.
2. Provedte kontrolní proměření stávajících úloh s využitím stávající techniky a na základě výsledků upravte zadání.
3. Navrhněte minimálně dvě nové laboratorní úlohy pro které zpracujte zadání.
4. Provedte kontrolní proměření navržených úloh včetně vyhodnocení.



Abstrakt

Stávající úlohy v předmětu Technika vysokého napětí, včetně jejich popisu a následným změřením modelů v skutečných podmínkách školní laboratoře. Experimentální část práce se zabývá nově navrhovanými úlohami do předmětu.

Klíčová slova

vysoké napětí, rázový generátor, rázová vlna, rozložení napětí na izolátoru, koróna, částečné výboje

Abstract

Measuring school assignments at subject called Technika vysokého napětí (Technics of high voltage) including their description and control measure this models in real conditions of school laboratory. The experimental part is about newly proposed tasks to the subject.

Key words

high voltage, surge generator, surge, voltage distribution, corona, partial discharges

Prohlášení

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.

.....
podpis

V Plzni dne

Petr Kučera

Poděkování

Tímto bych velmi rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Laurencovi, CSc. za cenné profesionální rady a následné připomínky.

Obsah

Úvod.....	9
1 Měření vysokého napětí.....	10
1.1 Měření střídavého napětí.....	11
1.2 Měření stejnosměrného napětí.....	13
1.3 Měření atmosférického impulzního napětí.....	15
2 Měření výbojů v plynech.....	17
2.1 Homogenní pole - Paschenova křivka pro vzduch.....	17
2.2 Silně nehomogenní pole.....	20
3 Měření na modelech.....	22
3.1 Měření ztrát korónou při namáhání stejnosměrným napětím.....	22
3.2 Vyšetřování napět'ových poměrů na cívce.....	25
3.3 Pohyb elektromagnetických vln po vedení.....	28
3.4 Ochrana vedení zemním lanem.....	30
4 Aplikační úlohy.....	33
4.1 Měření částečných výbojů.....	33
4.2 Rozložení napětí na řetězci izolátorů.....	35
5 Měření frekvenčních vlastností koróny.....	37
6 Testování elektrické pevnosti vzduchu rázovým generátorem.....	41
7 Inovace úlohy rozložení napětí na izolátoru.....	46
8 Závěr.....	50
9 Seznam zdrojů.....	51

Seznam použitých symbolů

d	(m)	průměr
l	(m)	výška
x	(m)	vzdálenost
p	(Pa)	tlak vzduchu
T	(°C)	teplota
U	(V)	napětí
U_{kor}	(V)	napětí korigované
U_{tab}	(V)	tabulkové napětí
U_{nab}	(V)	nabíjecí napětí
I	(A)	proud
L	(H)	indukčnost
C	(F)	kapacita
Z	(Ω)	impedance
R	(Ω)	činný odpor
E	(Vm^{-1})	intenzita elektrického pole
η	(-)	účinnost
p	(-)	převod
t	(s)	čas
v	(ms^{-1})	rychlost

Úvod

Předmět Technika vysokého napětí je zaměřen na vysoké napětí v elektroenergetice a umožňuje náhled do vysokého napětí z teoretického i praktického hlediska. Významnou měrou přispívá k všeobecnému přehledu v oblasti přenosu elektrické energie i praktický náhled na daný problém. Jedná se zejména o elektrická vedení vysokých napětí a zařízení připojených k nim.

Tématem této diplomové práce je kontrolní proměření současných úloh v předmětu, které jsou přizpůsobeny skutečným podmínkám vycházejícím z reálného světa a jeho požadavkům na vytvoření modelu pro ověření daných parametrů, návrh konstrukčních částí či definování podmínek. Některé jsou zmenšeninami reálných případů, některé se měří přímo na zařízení bez dalších úprav. Průřez stávajících úloh zahrnuje celou oblast přenosu elektrické energie, od ochrany vedení až po nežádoucí stavy na transformátoru. V závěru práce se soustřeďuje na realizovatelné úlohy (vyhovuje na to současné vybavení laboratoře).

1 Měření vysokého napětí

Důležitá součást všech úloh na vysokém napětí – bez měření nic nezjistíme, proto musíme dbát na přesnost vlastních přístrojů i na děliče napětí – z tohoto důvodu se kalibrují, viz následující úlohy.

Hodnotu velmi vysokých a zvláště vysokých napětí můžeme měřit vzduchovými jiskřiči. Princip metody je ve zjištění průrazné vzdálenosti mezi dvěma elektrodami. Průraz dielektrika, kterým je vzduch (elektrická pevnost asi 30 kV/cm), vzniká působením silného elektrického pole. Elektrická pevnost je definována jako schopnost izolantů bránit průchodu náboje (odolávat namáhání elektrickým polem). Její jednotkou je V/m, avšak častěji se udává v kV/cm či kV/mm. Děliče napětí sníží napětí na požadovanou úroveň. Jsou tam, kde nestačí elektrostatické nebo vrcholové voltmetry (pro hodnoty napětí přes 300kV). Další možnost použití je pro rozšíření měřicího rozsahu různých elektronických přístrojů (voltmetrů, osciloskopů atd) Jedná se o měření velmi vysokých napětí v řádu několika jednotek MV nebo stovek kV. Ale na vstup měřicího přístroje je možno přivádět pouze setiny nebo tisíce kV.

Mezi nároky kladené na děliče napětí patří dva základní požadavky:

- připojení děliče napětí k měřenému místu se tento měřený jev může následně lišit jen zanedbatelně.
- časový průběh napětí na výstupu děliče má být přesnou minimalizovanou kopií měřeného časového průběhu napětí.

Platí pravidlo, že dělič má být frekvenčně nezávislý. Napětí různých frekvencí má být zmenšeno ve stejném poměru. Napěťové děliče se rozdělují:

- odporový dělič pro měření stejnosměrných, střídavých a impulsních napětí,
- kapacitní dělič pro měření střídavých a impulsních napětí,
- smíšený dělič pro měření impulsních napětí,
- speciální druhy děličů. [2]

Vlastní měření - bezpečnost

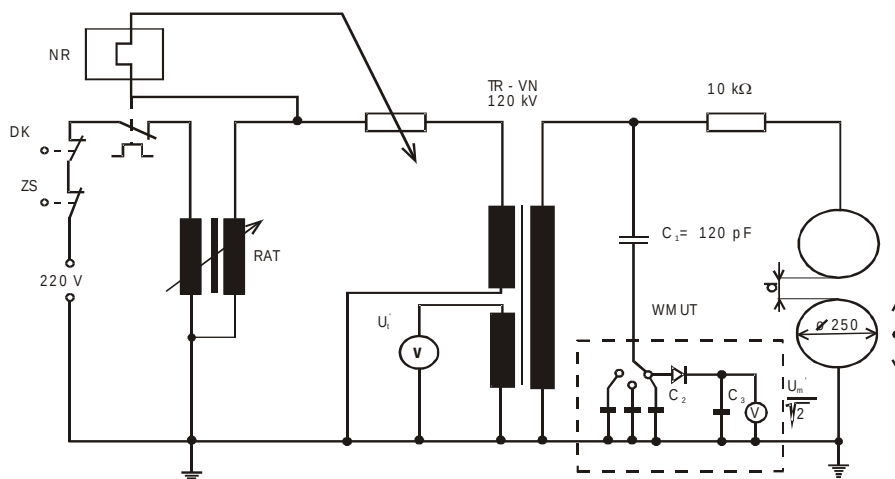
Po zapojení podle schématu nezapomeneme sejmout zkratovací soupravu a po uzavření zkušebny se nastaví první vhodný doskok na jiskřiči. Zapne se VN obvod a ruční regulací se zvyšuje napětí až do přeskočení. Po skončení měření vybijeme zkratovací soupravou všechny části obvodu.

1.1 Měření střídavého napětí

Zadání

- Ocejchujte měřicí vinutí transformátoru ČKD 120 kV. Měřicí vinutí má vzhledem k vinutí VN převod cca 1:1000. Cejchovním přístrojem je vertikální měřicí kulové jiskřiště o průměru 25 cm.
- Ocejchujte vrcholový voltmetr WMUT, připojený na kapacitní dělič napětí. Cejchovním přístrojem je měřicí kulové jiskřiště o průměru 25 cm.
- Porovnáním vrcholové a efektivní hodnoty napětí vyhodnoťte tvar křivky napětí transformátoru. Tvar křivky sledujte osciloskopem.

Schéma zapojení



Obr.1 Zapojení stř. měření

Naměřené a vypočítané hodnoty

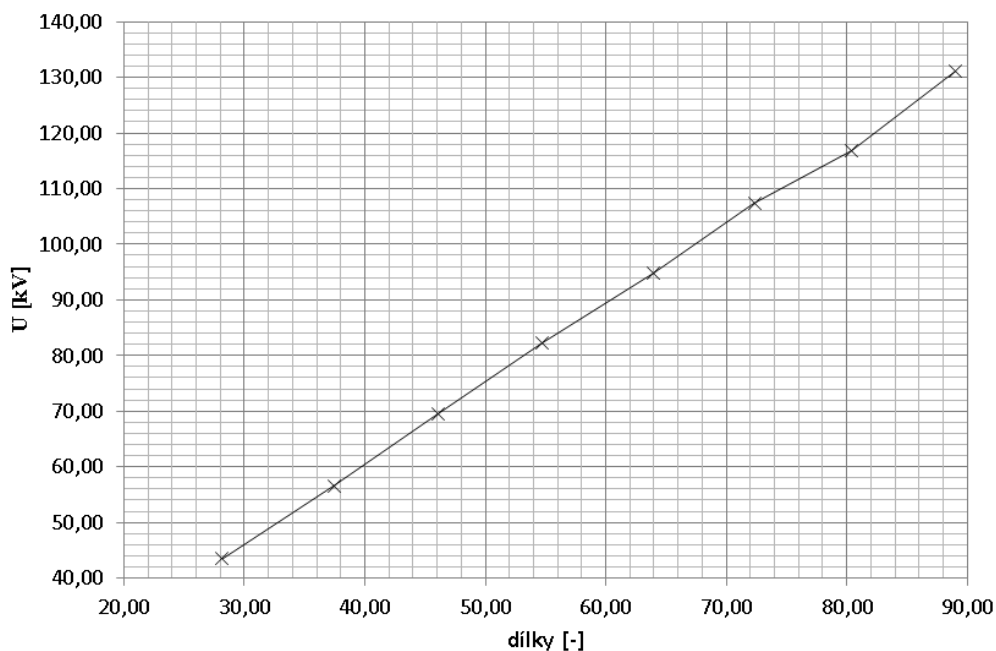
Tab.1

Kulové jiskřiště			Vrcholový voltmetr				Měřicí vinutí trafo			
d	U_{tab}	U_{korig}	U'_{mi} (dílky)			U_{m}	U'_{ti} (dílky)			U_{t}
[cm]	(kV)	(kV)	i = 1	i = 2	i = 3	(dílky)	i = 1	i = 2	i = 3	(dílky)
1,5	45,5	43,57	145	145	144	144,67	29,5	27,8	27,3	28,20
2	59	56,50	183	184	186	184,33	37,3	38,2	36,7	37,40
2,5	72,75	69,67	232	231	230	231,00	47,3	45,6	45,6	46,17
3	86	82,36	272	273	274	273,00	55,1	54	55,06	54,72
3,5	99	94,81	134	133	134	133,67	64,7	62,2	64,9	63,93
4	112	107,26	149	150	150	149,67	72,7	72,3	71,9	72,30
4,5	122	116,83	166	167	167	166,67	81,05	80	80,17	80,41
5	137	131,20	183	183	183	183,00	87,9	89,4	89,6	88,97

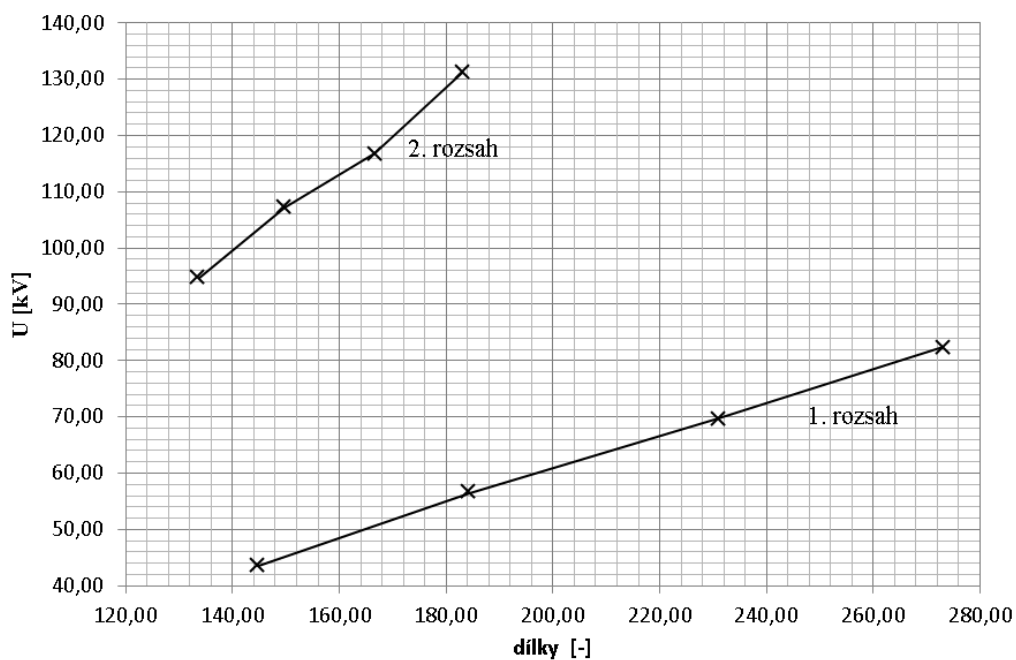
Příklad výpočtu

$$k_H = \frac{p_{LAB} \cdot (273 + t_{TAB})}{p_{TAB} \cdot (273 + t_{LAB})} = \frac{98.3 \cdot (273 + 20)}{101.3 \cdot (273 + 23.9)} = 0.9576$$

$$U_{korig} = U_{TAB} \cdot k_H = 45.5 \cdot 0.9576 = 43.57 \text{ kV}$$



Graf 1 Cejchovní křivka měřícího vinutí transformátoru



Graf 2 Cejchování vrcholového voltmetru WMUT

Závěr

Z výsledků měření vyplývá, že každý voltmetr lze ocejchovat pomocí kulového jiskřiště.

Vrcholový voltmetr s kapacitním děličem i měřící cívka transformátoru má dle výsledných grafů téměř lineární závislost výchylky ručky na napětí. Proto i při vynášení hodnot v relativně širokém rozsahu dílků vzniklo poměrně přesné ocejchování použitelné pro široký rozsah hodnot. Jedná se tedy o velice efektivní způsob a výsledné ocejchované přístroje pak lze použít i pro mobilní měření a to v podstatě se stejnou přesností, jakou má kulové jiskřiště (které je většinou nepřenositelné). Pro hladší průběh křivky je potřeba více měření.

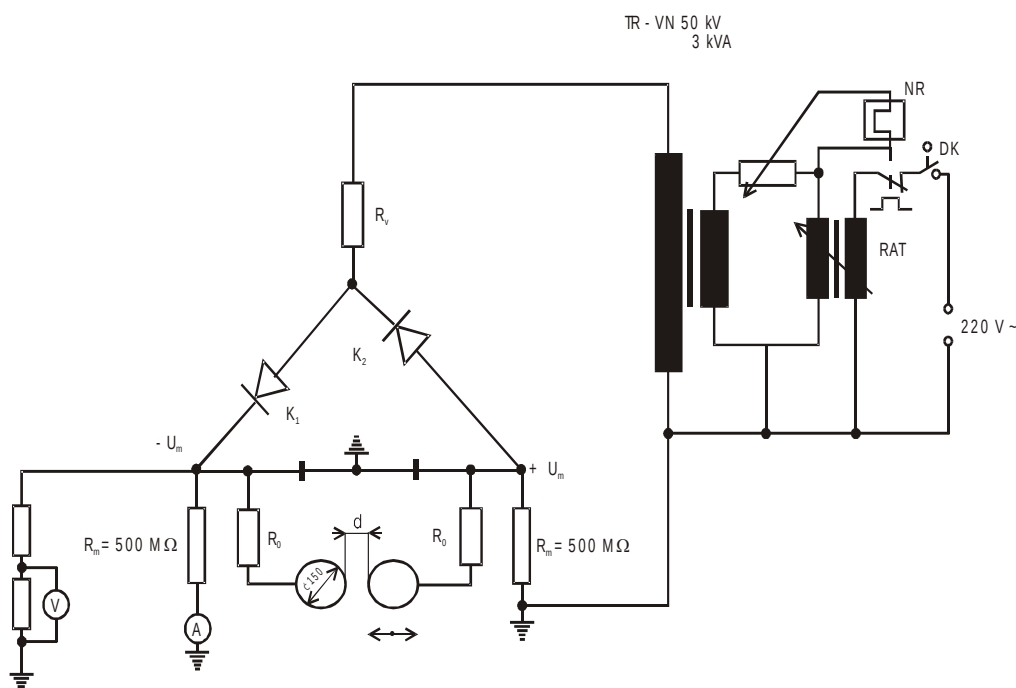
1.2 Měření stejnosměrného napětí

Zadání

Ocejchujte měřící obvody (VN odpor s mikroampérmetrem a odporový dělič s voltmetrem) VN zdroje napětí ± 70 kV. Cejchovním přístrojem je horizontální kulové jiskřiště průměru 15 cm.

Doskok kulového jiskřiště nesmí přesáhnout 3 cm pro obě polarity.

Schéma zapojení



Obr.2 Zapojení stejnosměrného měření

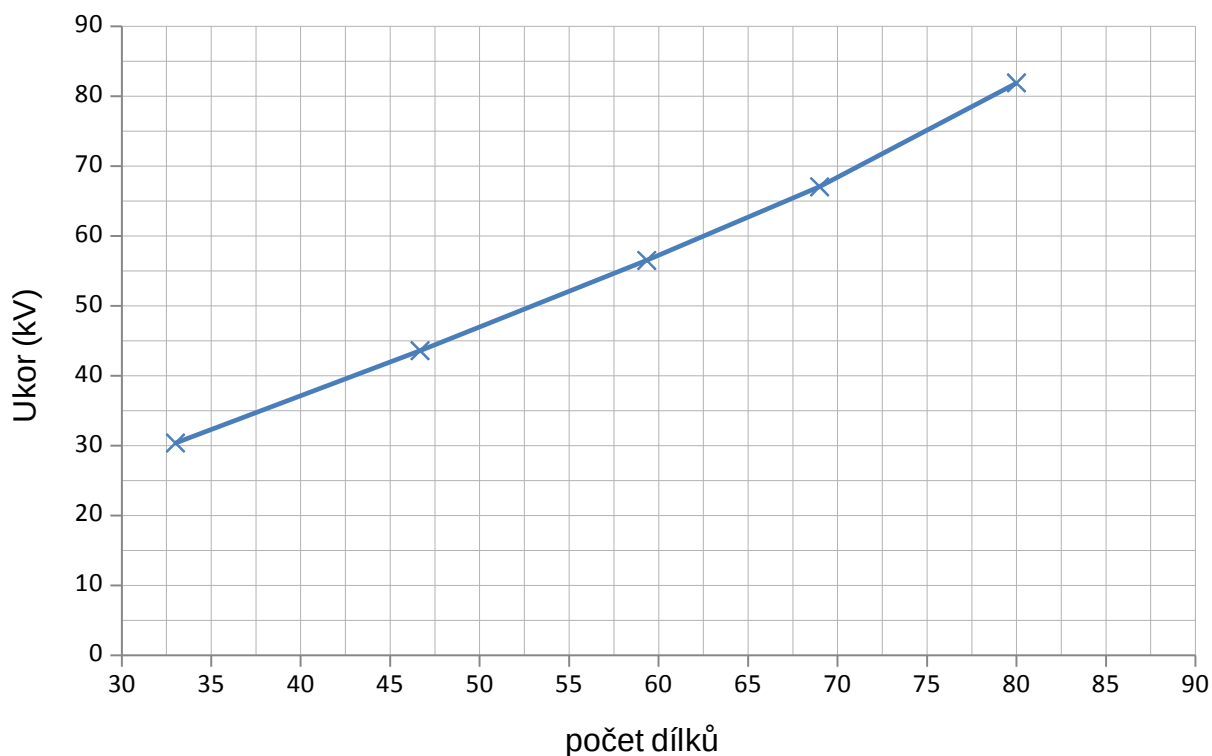
Naměřené a vypočítané hodnoty

Tab.2

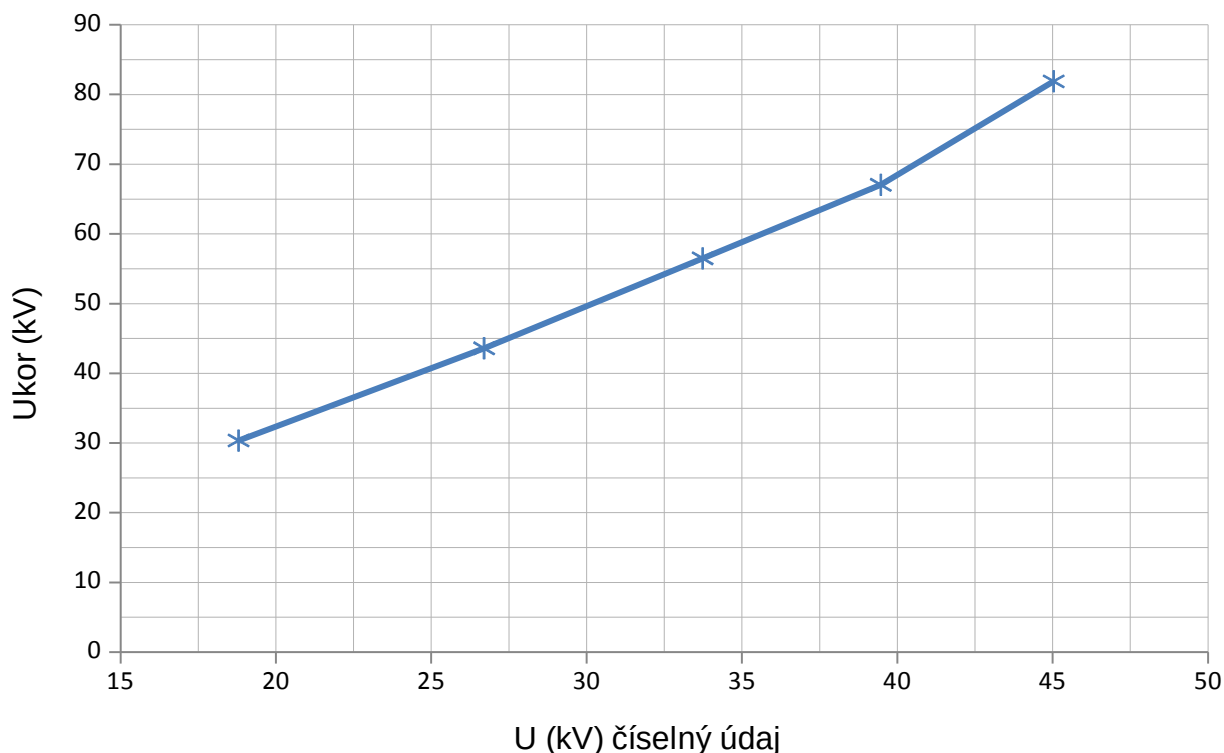
kulové jiskřiště			mikroampérmetr s předřadným odporem				VN dělič, voltmetr				atmosférické podmínky	
d	U _{tab}	U _{korig}	+ I _i (dílký)			+ I	+ U _i (čís. údaj)			+ U	T (°C)	23,9
(cm)	(kV)	(kV)	i = 1	i = 2	i = 3	(dílký)	i = 1	i = 2	i = 3	(dílký)	p (kPa)	98,3
1	31,7	30,36	34	33	32	33	19	18,8	18,6	18,8	konstanta	
1,5	45,5	43,57	46	47	47	47	26	27,1	27	26,7	k	0,96
2	59	56,5	59	60	59	59	33,7	33,3	34,2	33,7		
2,5	70	67,03	69	69	69	69	39,4	39,7	39,3	39,5		
3	85,5	81,88	80	80	80	80	44	45,7	45,4	45		

Korekční činitel je v omezeném rozsahu roven poměrné hustotě vzduchu, která je definována

$$k = \frac{p \cdot (273 + 20)}{101.3 \cdot (273 + t)} = \frac{98.3 \cdot (273 + 20)}{101.3 \cdot (273 + 23.9)} = 0.96$$



Graf 3 Cejchovní křivka mikroampérmetru s odporem



Graf 4 Cejchovní křivka voltmetru s děličem

Závěr

Cílem měření bylo sestavení cejchovní tabulky pro měření mikroampérmetrem a digitálním voltmetrem s pomocí kulového jiskřiště. Na počátku jsou obě cejchovní charakteristiky téměř lineární, přibližně od 60kV se začíná lámat. Zřejmě důsledek, že při velkých napětích se vzdálenost elektrod přibližuje k podmínce $d_{\max} = 0,5D$ a tedy pole začíná být nehomogenní a charakteristika nelineární.

1.3 Měření atmosférického impulzního napětí

Zadání

Ocejchujte měřicí systém generátoru impulzního napětí připojený na kapacitní rázový dělič napětí. Cejchovním přístrojem je vertikální kulové jiskřiště průměru 50 cm. Určete činitel využití rázového generátoru. Za tím účelem měřte nabíjecí napětí rázového generátoru.

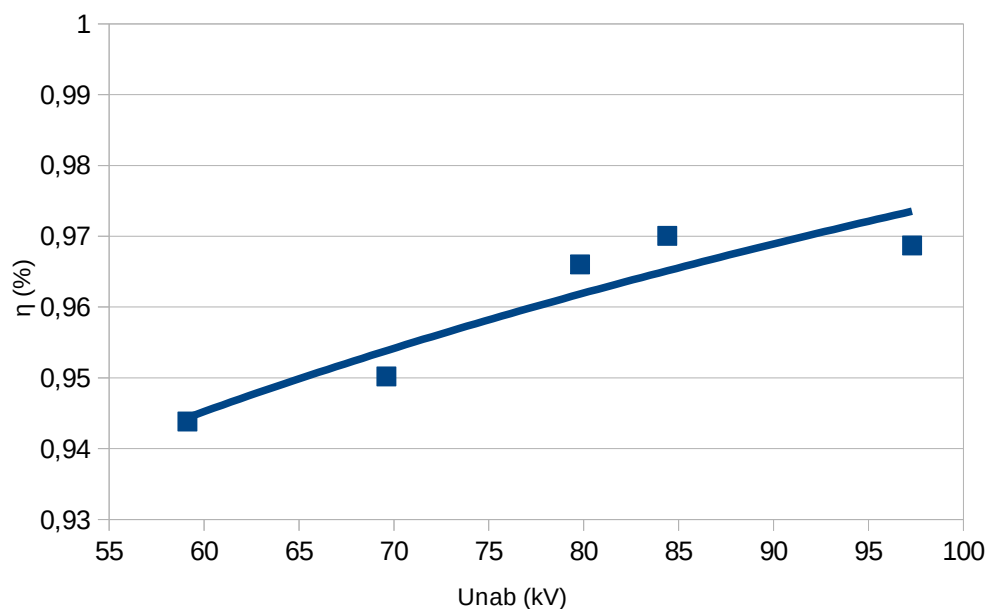
Naměřené a vypočítané hodnoty

Tab.3

d (cm)	Unab (kV)	T (°C)	p (kPa)	Utab (kV)	k	Ukor	η_{RG}
2	59,125	26,2	97,92	59	0,946	55,803	0,944
2,4	69,6	26,5	97,91	70	0,945	66,134	0,950
2,8	79,8	25,9	98,43	81	0,952	77,088	0,966
3	84,4	25,5	98,33	86	0,952	81,872	0,970
3,5	97,3	26	98,5	99	0,952	94,254	0,969

Příklad výpočtu

$$k = \frac{p \cdot (273 + 20)}{101.3 \cdot (273 + T)} = \frac{97.92 \cdot (273 + 20)}{101.3 \cdot (273 + 26.2)} = 0.946$$



Graf 5 Procentní využití rázového generátoru

Závěr

Z grafu je vidět, že se zvyšujícím se nabíjecím napětím, roste využití rázového generátoru.

2 Měření výbojů v plynech

Plyny jsou za obvyklých podmínek nevodivé. Ionizujeme-li je, stanou se prostřednictvím kladných iontů a elektronů vodivými, a pokud se nacházejí v elektrickém poli, vzniká elektrický proud jako uspořádaný proud uvedených částic a to ve formě výboje. Elektrická pevnost je definována jako schopnost izolantů bránit průchodu náboje (odolávat namáhání elektrickým polem). Její velikost udává hodnotu intenzity elektrického pole, při které se uvolní elektrony vázané v izolantu a ten se stane vodičem. Tento jev se nazývá průraz a je s ním spojená hodnota průrazného napětí U_{pr} . Jednotkou elektrické pevnosti je V/m, často se setkáme s jednotkou kV/cm nebo kV/mm. Elektrická pevnost izolantu závisí na jeho chemické čistotě, znečištění povrchu, mechanickém namáhání, teplotě, tlaku a vlhkosti prostředí, ve kterém se izolant nachází. Důležité je také geometrické uspořádání izolantu a elektrod, mezi než izolant vložíme. Např. elektrická pevnost slídy je 55-75 kV/mm, keramických izolantů 20-35 kV/mm, transformátorového oleje 200 kV/cm.

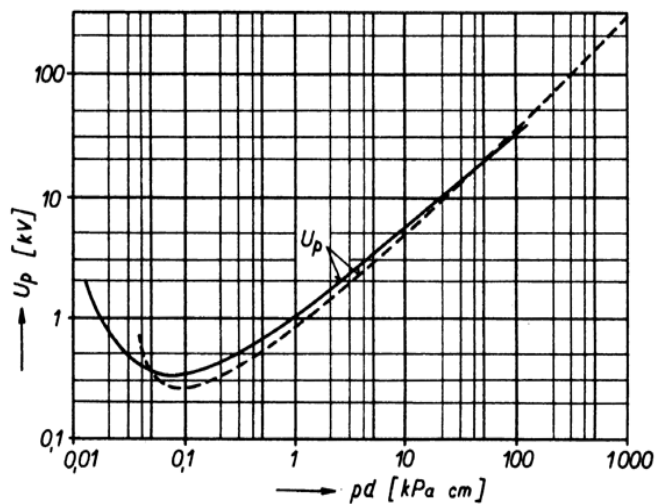
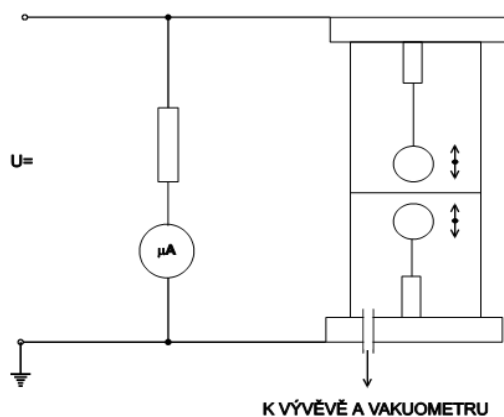
Vzorec pro výpočet Paschenovi křivky je odvozen Townsendem a definuje, při jakém napětí dojde k přeskoku v homogenním poli mezi dvěma elektrodami v prostředí vyplněné známým plynem.

2.1 Homogenní pole - Paschenova křivka pro vzduch

Zadání

- 1) Sestrojte graf závislosti přeskokového napětí ve vzduchu v homogenním poli při ss napětí na součinu pd pro rozsah tlaku 40 Pa ÷ 100 kPa a rozsah doskoků 5 ÷ 20 mm.
- 2) Pro hodnoty součinu pd , pro které bylo změřeno přeskokové napětí, spočítejte hodnotu přeskokového napětí podle vzorce uvedeného v úvodu k této úloze. Z vypočítaných hodnot vynesť křivku závislosti $U_p = f(pd)$ do grafu pokusně zjištěné závislosti

Schéma zapojení



Obr.3 Měření homogenní pole

Graf 6 Ideální průběh Paschenovi křivky

Změřené a vypočítané hodnoty

Tab.4

p (kPa)	U (kV)			U _{prum}	U _p (kV)
0,01	5,8	5,8	5,75	5,78	0,022
0,02	3,4	3,2	2,8	3,13	0,104
0,03	2,2	2,6	2,4	2,4	0,670
0,07	0,3	0,5	0,5	0,43	0,264
0,1	0,8	0,5	0,3	0,53	0,253
0,2	0,4	0,6	0,4	0,47	0,309
0,5	0,6	0,5	0,5	0,53	0,509
1,2	1,27	1	1,2	1,16	0,921
2,6	2,3	2,3	1,9	2,17	1,640
6	4,1	4,2	3,9	4,07	3,174
9,9	6,1	5,7	5,6	5,8	4,775
17,9	9,1	9,2	8,4	8,9	7,818
35,4	13	11,3	12,5	12,27	13,945
56,9	17,7	17,5	18,5	17,9	20,981

Příklad výpočtu

$$U_p = \frac{B \cdot p \cdot d}{\ln \left[\frac{A \cdot p \cdot d}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right]} = \frac{2738 \cdot 98 \cdot 1}{\ln \left[\frac{109,5 \cdot 98 \cdot 1}{\ln \left(1 + \frac{1}{0,025} \right)} \right]} = 33,671 \text{ kV}$$

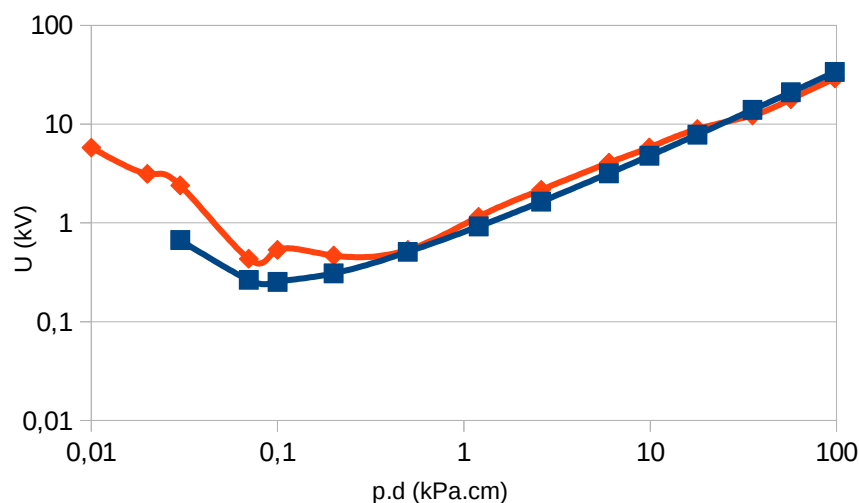
Pro vzduch (při teplotě 20 °C) mají konstanty A, B hodnoty:

$$A = 109,5 \text{ cm}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$$

$$B = 2738 \text{ Vcm}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$$

(uvedené konstanty platí pro rozsah $E/p = 1125$ až $4500 \text{ Vcm}^{-1} \text{ kPa}^{-1}$)

$$\gamma = 0,025 \quad \text{pro měděné elektrody}$$



Graf7 Paschenova křivka změřená

Závěr

Vypočtený průběh Paschenovi křivky je shodný s naměřenými hodnotami. Neshoda naměřené charakteristik s vypočtenou je dána tím, že konstanty A a B nejsou pevné po celou dobu měření a též vnáší chybu nejistota měření.

2.2 Silně nehomogenní pole

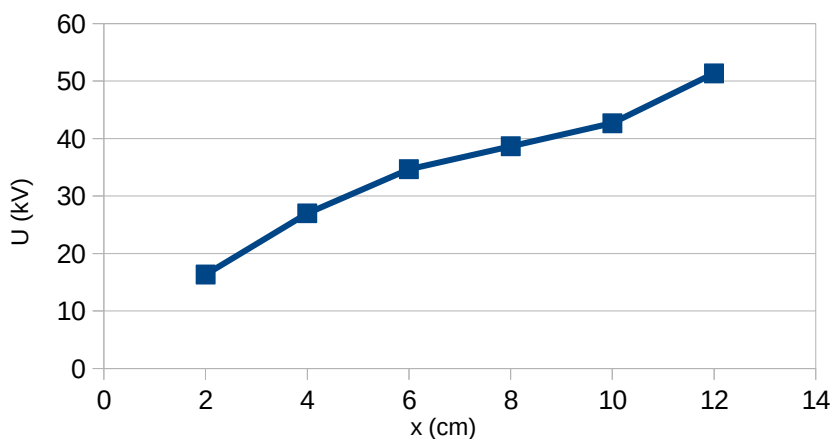
Zadání

- 1) Změřte přeskokové napětí v silně nehomogenním poli, tvořeném hrotem proti desce, pro obě polarity hrotu. Při zvyšování napětí pozorujte vznik koróny, která předchází výboji mezi elektrodami. Z naměřených hodnot sestrojte příslušné grafické závislosti.
- 2) Zjistěte, jak se změní přeskokové napětí v silně nehomogenním poli při použití papírové bariéry tím, že zjistíte závislost přeskokového napětí na poloze bariéry pro obě polarity uspořádání

Naměřené hodnoty

Tab. 5

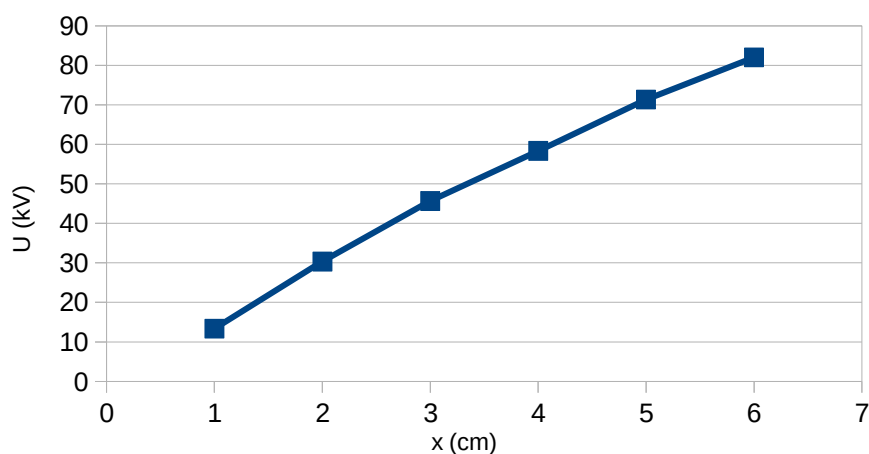
+ hrot, - deska				
x (cm)	U (kV)			
2	17	16	16	16,3
4	27	27	27	27
6	35	35	34	34,7
8	43	36	37	38,7
10	43	43	42	42,7
12	53	50	51	51,3



Graf 8 Kladný hrot, záporná deska

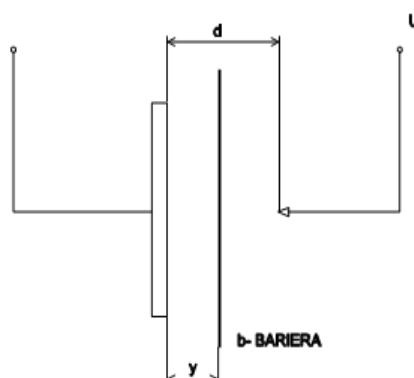
Tab. 6

- hrot, + deska				
x (cm)	U (kV)			
1	13	14	13	13,3
2	29	31	31	30,3
3	46	45	46	45,7
4	58	59	58	58,3
5	71	72	71	71,3
6	81	84	81	82



Graf 9 Kladná deska, záporný hrot

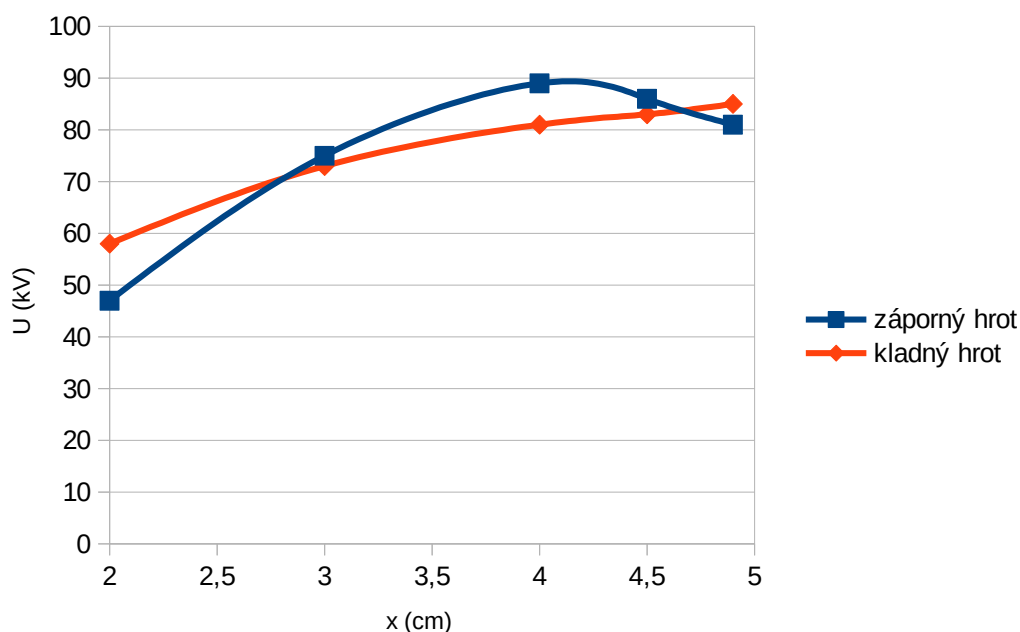
Vliv bariéry



Obr.4 Umístění bariéry

Tab.7

papír > deska		
x (cm)	U (kV), - hrot	U (kV), + hrot
2	47	58
3	75	73
4	89	81
4,5	86	83
4,9	81	85



Graf 10 Vliv bariéry

Závěr

Nejméně příznivé podmínky pro úspěšný přeskok je v uspořádání kladného hrotu a záporné desky. Prostorové náboje v případě záporného hrotu snižují intenzitu pole směrem k desce, čímž brání rozvinutí výboje v jiskru a tím zvyšují průrazné napětí celého uspořádání vůči obrácené polaritě. Vložení dielektrické bariéry pro znemožnění přeskoků je nejlepší možností při kladné desce a co nejbliž k ní, což potvrzuje předpoklad z teorie, že nejvýhodnější poloha bariéry je v určité malé vzdálenosti od elektrody s velkou křivostí.

3 Měření na modelech

Tato skupina měření má za cíl ověřit teorii vysokého napětí přímo na konkrétním modelu bez nutnosti stavby opravdového zařízení – ať už se jedná o model pro korónu, napěťové namáhání cívky nebo teoreticky těžko řešitelným vedením vysokého napětí s zemním lanem, vše nalezneme v praxi. Modelováním těchto jevů, obvykle nežádoucích, ověřujeme teoretickou část skutečností. Je snaha o co největší omezení či úplné potlačení, vše záleží na konkrétních podmínkách. Proto jsou zvlášť vytvořené modely, aby bylo vidět na konkrétním případě, jestli lze nepříznivému jevu zabránit nebo ne.

3.1 Měření ztrát korónou při namáhání stejnosměrným napětím

Zadání

1) Změřte počáteční napětí U_0 a voltampérovou charakteristiku koróny na rovinném uspořádání při obou polaritách pro vodiče s

$$d = 0,5 \text{ mm}$$

$$d = 1 \text{ mm}$$

$$d = 2 \text{ mm}$$

$$2 \cdot d = 1 \text{ mm (dvojsvazek)}$$

$$3 \cdot d = 1 \text{ mm, } D = 10 \text{ mm (trojsvazek)}$$

$$3 \cdot d = 1 \text{ mm, } D = 20 \text{ mm (trojsvazek)}$$

2) Voltampérové charakteristiky koróny $I_k = f(U)$, změřené pod 1), znázorněte graficky

3) Z naměřeného počátečního napětí U_0 vypočítejte kritickou intenzitu E_0 pro jednoduché vodiče

Naměřené a vypočítané hodnoty

Tab. 8

	jednoduché vodiče			dvojsvazek		trojsvazek		čtyřsvazek	
	d=0.5 mm	d=1 mm	d=2 mm	D=0.5 mm	D=1 mm	D=0.5 mm	D=1 mm	D=0.5 mm	D=1 mm
I_{k0} (μA)	$U_{0.5}$ (kV)	U_1 (kV)	U_2 (kV)	UD (kV)	UD (kV)	UD (kV)	UD (kV)	UD (kV)	UD (kV)
2	15,9	24,1	35,1	21,6	18,1	27,3	23,7	33,8	28,4
10	18,1	25,2	36	23,3	24,3	29,5	28,6	36,3	33,6
20	19,8	26,5	37	24,6	28,5	29,9	30,9	36,6	34,3
30	21,1	27,6	37,1	26,2	30,1	31,4	31,1	37,8	34,7
40	22,3	28,5	39,1	26,9	31	32,9	31,9	38,6	35,1
50	23,4	29,3	39,3	27,3	31,4	34	31,9	38,7	35,4

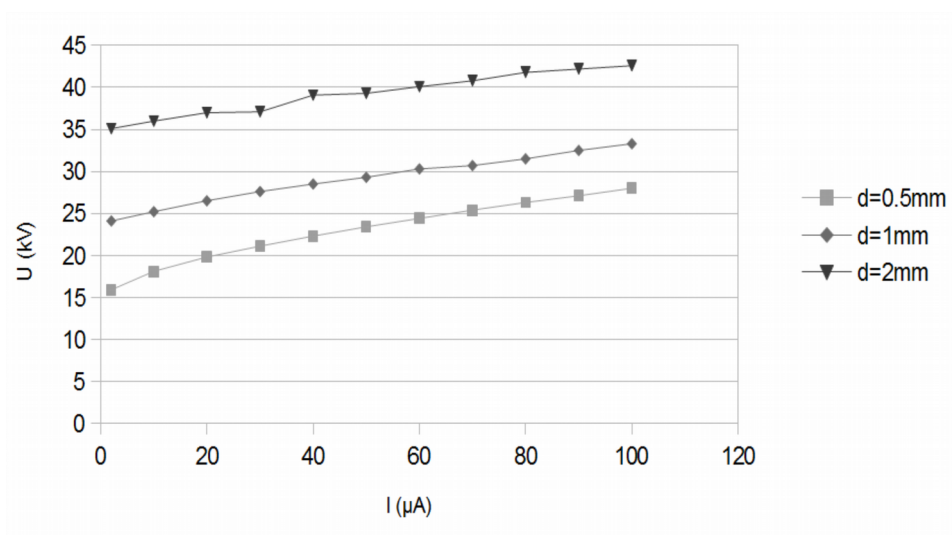
60	24,4	30,3	40,1	28,3	32,1	34,9	33	39,4	35,6
70	25,4	30,7	40,8	29	33	35,7	34,3	40,5	35,7
80	26,3	31,5	41,8	29,8	33,5	36,5	34,4	40,6	36,4
90	27,1	32,5	42,2	30,3	34,6	37,2	34,6	41	37,5
100	28	33,3	42,6	30,8	35,4	37,9	35,7	42,8	38,2

Spočítaná kritická intenzita elektrického pole pro jednoduché vodiče

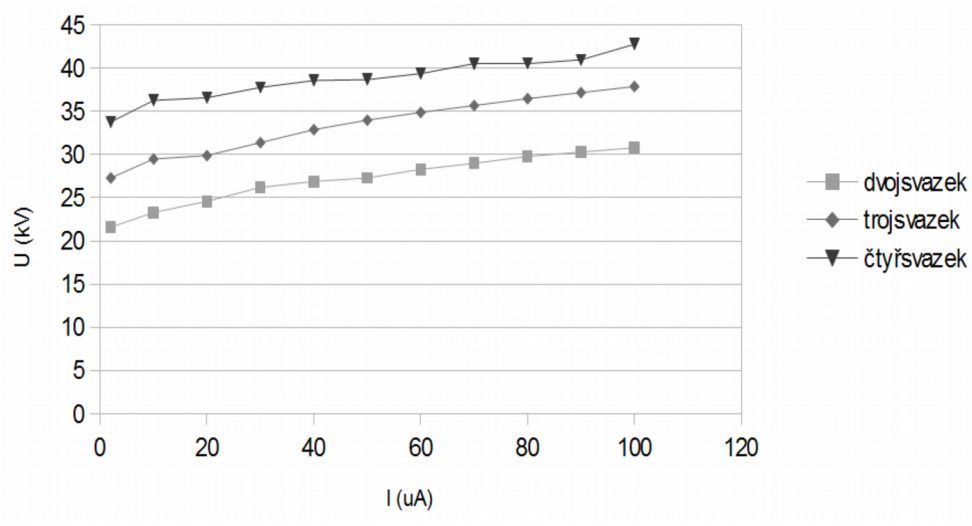
Tab. 9

$E_{0.5}$ (kV)	3,83	4,36	4,77	5,09	5,38	5,64	5,88	6,12	6,34	6,53	6,75
E_1 (kV)	5,81	6,08	6,39	6,66	6,87	7,07	7,31	7,40	7,60	7,84	8,03
E_2 (kV)	8,46	8,68	8,92	8,95	9,43	9,48	9,67	9,84	10,08	10,18	10,27

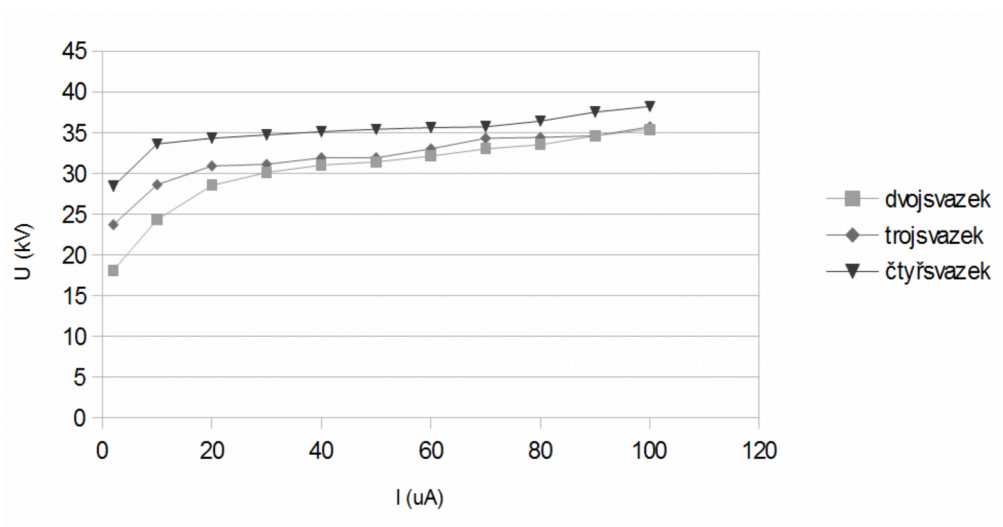
$$E_{0.5} = \frac{U_{0.5}}{d \cdot \ln\left(\frac{2h}{r}\right)} = \frac{15,9}{0,5 \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot 1}{0,0005}\right)} = 3,83 \text{ kV}$$



Graf II VA charakteristika pro jednoduché vodiče



Graf 12 VA charakteristika svazku vodičů (vzdálenost 5 cm)



Graf 13 VA charakteristika vodičů (vzdálenost 10 cm)

Závěr

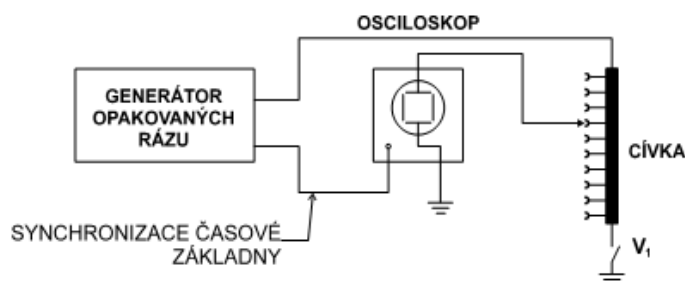
Z odchylek naměřených hodnot se zjistilo, že se objevovali spíše u vodičů větších průřezů, což mohlo být způsobeno větší necitlivostí při nastavování proudu, protože napětí dosahovalo vyšších hodnot. Čím větší byla vzdálenost mezi vodiči (d), tím více se průběhy blížily exponenciálnímu tvaru (křivky byly strmější)

3.2 Vyšetřování napěťových poměrů na jedno-polohové cívce při namáhání napěťovým impulzem (rázové namáhání)

Zadání

- 1) Na modelu vinutí transformátoru, na který je přiloženo impulzní napětí 1,2/50 z generátoru opakovaných rázů sejměte oscilograficky časové průběhy napětí na odbočkách vinutí $k=0$ (začátek vinutí) 2; 4; 6; 8; 10 (konec vinutí) pro plný impulz napětí a uzemněný konec vinutí a plný impulz napětí a izolovaný konec vinutí
- 2) dtto 1) pro useknutý napěťový impulz
- 3) Ze získaných časových průběhů $U_k = f(t)$ sestrojte pro všechny čtyři případy rozložení napětí podél vinutí $U = f(k)$ pro časové okamžiky $t=0$ (maximum napěťového impulzu na počátku vinutí); 1; 2; 3 atd. až 10 μs pro uzemněný konec vinutí a $t=0$; 2; 4; 6; až 20 μs pro izolovaný konec vinutí.
- 4) Určete místa maximálních gradientů (podél vinutí a proti zemi) a odhadněte frekvenci základní harmonické vlastních kmitů vinutí.

Schéma zapojení



Obr.5 Zapojení s cívkou

Tab.10 Uzemněný konec vinutí, plný impuls

K	U (V) v čase t											
	0 μs	1 μs	2 μs	3 μs	4 μs	5 μs	6 μs	7 μs	8 μs	9 μs	10 μs	
0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
2	1,44	8	10	10	9,46	8	4,74	4	10	12,32	6,94	
4	0,18	2,56	10,1	9,72	9,16	4,1	0	1,16	8,58	10,46	8,98	
6	0	0,58	4,76	10,88	6,16	1,84	-1,86	5,02	4,1	7,82	8,94	
8	-0,02	0,12	1,52	5,7	5,5	-3	0,58	0,66	1,16	4,7	4,7	
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tab.11 Uzemněný konec vinutí, useknutý impuls

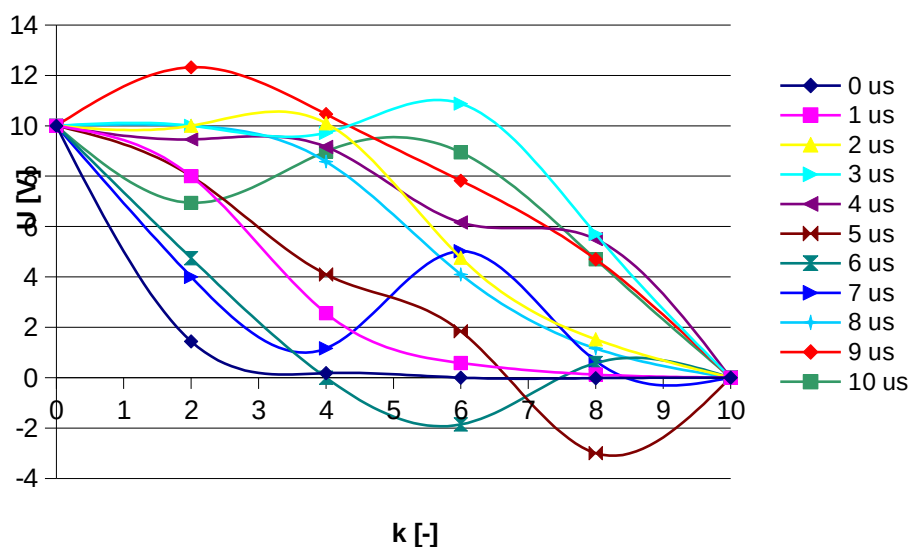
K	U (V) v čase t											
	0 μs	1 μs	2 μs	3 μs	4 μs	5 μs	6 μs	7 μs	8 μs	9 μs	10 μs	
0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
2	1,44	8	10	10	9,46	8	4,74	4	10	12,32	6,94	
4	0	0,58	4,76	10,88	6,16	1,84	-1,86	5,02	4,1	7,82	8,94	
6	0,18	2,56	10,1	9,72	9,16	4,1	0	1,16	8,58	10,46	8,98	
8	-0,02	0,12	1,52	5,7	5,5	-3	0,58	0,66	1,16	4,7	4,7	
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tab.12 Izolovaný konec vinutí, plný impuls

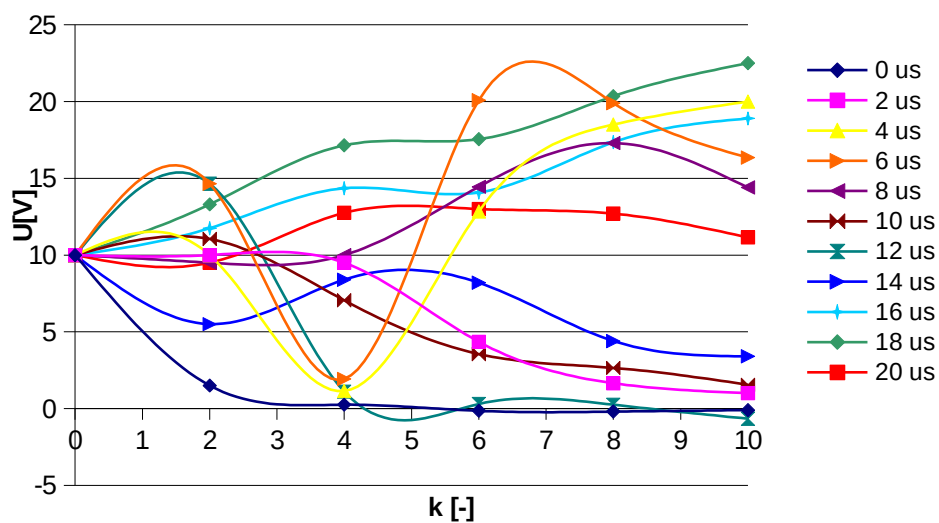
K	U (V) v čase t										
	0 μ s	2 μ s	4 μ s	6 μ s	8 μ s	10 μ s	12 μ s	14 μ s	16 μ s	18 μ s	20 μ s
0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
2	1,5	10	10	14,65	9,5	11,05	14,65	5,5	11,75	13,3	9,5
4	0,25	9,5	1,145	1,935	10	7,05	1,1	8,4	14,35	17,15	12,75
6	-0,15	4,35	12,85	20,09	14,45	3,55	0,3	8,2	14,08	17,55	13
8	-0,2	1,65	18,5	19,9	17,3	2,65	0,25	4,4	17,35	20,35	12,7
10	-0,1	1	20	16,35	14,4	1,55	-0,66	3,4	18,9	22,5	11,15

Tab.13 Izolovaný konec vinutí, useknutý impuls

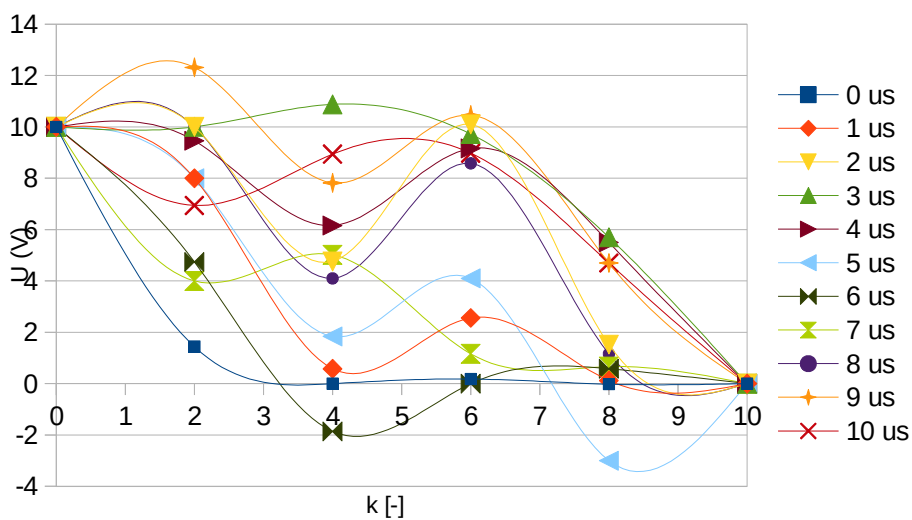
K	U (V) v čase t										
	0 μ s	2 μ s	4 μ s	6 μ s	8 μ s	10 μ s	12 μ s	14 μ s	16 μ s	18 μ s	20 μ s
0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
2	-0,1	18,9	16,35	1	-0,66	11,15	22,5	1,55	3,4	14,4	20
4	1,5	11,75	14,65	10	14,65	9,5	13,3	11,05	5,5	9,5	10
6	0,25	14,35	1,935	9,5	1,1	12,75	17,15	7,05	8,4	10	1,145
8	-0,15	14,08	20,09	4,35	0,3	13	17,55	3,55	8,2	14,45	12,85
10	-0,2	17,35	19,9	1,65	0,25	12,7	20,35	2,65	4,4	17,3	18,5



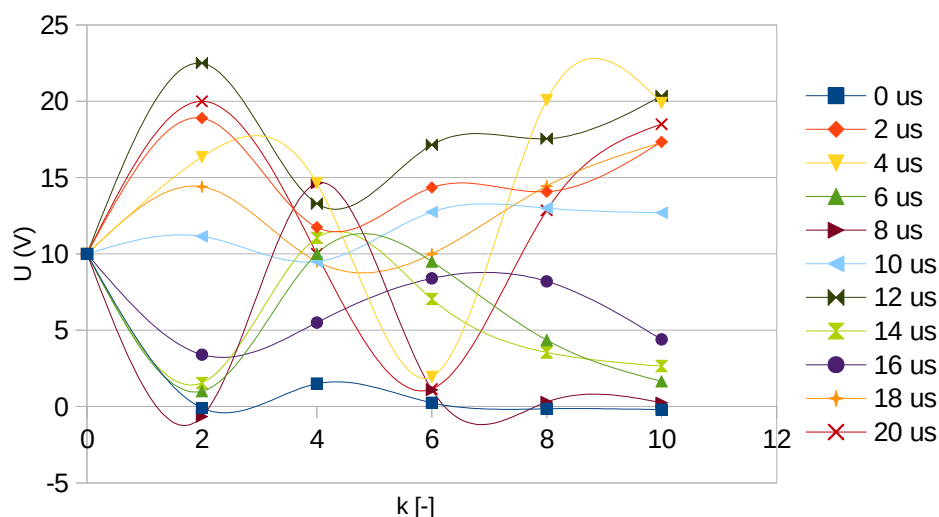
Graf 14 Cívka s uzemněným koncem, plný impuls



Graf 15 Cívka s otevřeným koncem, plný impuls



Graf 16 Cívka s uzemněným koncem, useknutý impuls



Graf 17 Cívka s otevřeným koncem, useknutý impuls

Závěr

Maximální gradient podél vinutí pro plný impuls a uzemněnou cívku vychází z grafu mezi předposlední a poslední odbočku, izolovaný konec vinutí mezi odbočky 4 a 6. Maximální velikost napětí vůči zemi je u uzemněného konce na odbočce 2, izolovaný konec 6.

Pro useknutý impuls a uzemněnou cívku je největší gradient podél vinutí opět mezi předposlední a poslední odbočkou, izolovaný konec mezi 6 a 8 odbočkou. Maximální velikost napětí vůči zemi je u uzemněného konce na odbočce 2, izolovaný konec 2.

Odhad frekvence základní harmonické vychází v jednotkách MHz.

3.3 Pohyb elektromagnetických vln po vedení

Zadání

- 1) Sledujte na osciloskopu průběh napětí na začátku a na konci vedení (kabelu) při různých zátěžích. Pro napájení kabelu použijte zdroj obdélníkového napětí.
- 2) Z průběhu napětí odhadněte dobu šíření signálu vedením (kabelem).
- 3) Pomocí metody popsané dále určete vlnovou impedanci kabelu a početně určete dobu šíření signálu po vedení (kabelu). Délka kabelu je 71 m. Výsledky porovnejte.

Všeobecně

Pro homogenní článkové vedení s podélnou indukčností L , odporem R , příčnou kapacitou C a svodem A platí rovnice

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = RA + (RC + LA) \frac{\partial u}{\partial x} + LC \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

Řešení v d'Alambertově tvaru je

$$u = e^{-\delta x} [f_1(\alpha x - \beta t) + f_2(\alpha x + \beta t)] \quad (2)$$

kde α, β jsou komplexní činitele a

$$\delta = \frac{1}{2} \left(\frac{R}{L} + \frac{A}{C} \right) \quad (3)$$

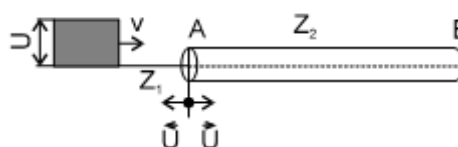
faktor útlumu.

Řešení představuje postupné vlny o rychlosti $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

Styk dvou vedení konečné délky různých vlnových impedancí Z_1 a Z_2 dává vznik odrazům postupných vln (obr. 6). Při jednoduchých poměrech podle obr. 6 platí pro postupnou a odraženou vlnu vztahy

kde ρ je činitel odrazu. Analogické vztahy nastávají i na začátku vedení

$$\begin{aligned} \bar{u} &= \bar{u}\rho \\ u &= \bar{u} + \bar{u} = \bar{u}(1 + \rho) \\ \rho &= \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \end{aligned}$$



Obr.6 Rozhraní vlnových impedancí

Naměřené hodnoty

pro $R_x = 250 \Omega$

$U_A = 1,03 \text{ V}$

$U_B = 1,45 \text{ V}$

$\Delta t = 346 \text{ ns}$

pro $R_x \rightarrow \infty$

$U_A = 1,05 \text{ V}$

$U_B = 1,95 \text{ V}$

změřená kapacita $C = 3,96 \text{ nF}$

Výpočet

$$P = \frac{U_B}{U_A} = \frac{1,45}{1,03} = 1,408$$

$$P_0 = 2 \cdot n = \frac{U_{B0}}{U_{A0}} = \frac{1,95}{1,05} = 1,857$$

$$Z = R_x \left(\frac{P_0}{P} - 1 \right) = 250 \left(\frac{1,857}{1,408} - 1 \right) = 79,72 \Omega$$

$$C_L = \frac{C}{l} = \frac{3,96 \cdot 10^{-9}}{71} = 55,775 \cdot 10^{-12} F$$

$$L_L = Z^2 \cdot C_L = 79,72^2 \cdot 55,775 \cdot 10^{-12} = 0,355 \cdot 10^{-6} H$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{0,355 \cdot 10^{-6} \cdot 55,775 \cdot 10^{-12}}} = 224733 m \cdot s^{-1}$$

$$t = \frac{l}{v} = \frac{71}{224733} = 315,9 ns$$

Závěr

Ze změřené impedance kabelu $Z = 79,72 \Omega/m$ (udávaná $75 \Omega /m$) je vidět, že zvoleným zakončovacím odporem jsme se téměř střetli do impedance měřeného kabelu.

Doba šíření po kabelu je $\Delta t = 346 ns$, odečteno při měření. Vypočtená doba šíření po kabelu je $\Delta t = 316 ns$. Z toho je vidět, že v měření jsou zanesené malé chyby, jinak proběhlo v pořádku.



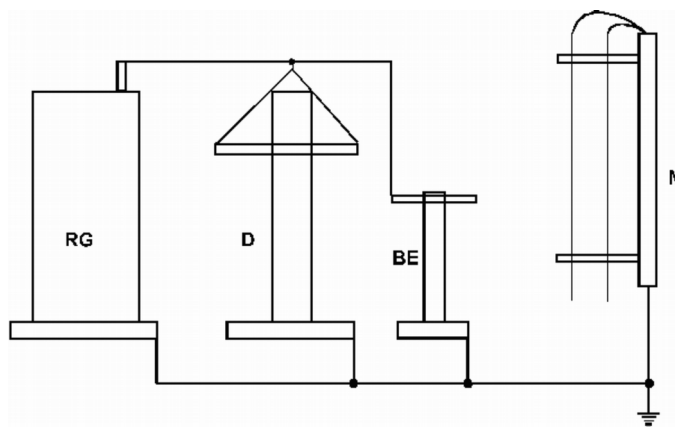
Obr.7 Skutečná měřicí úloha

3.4 Ochrana vedení zemním lanem

Zadání

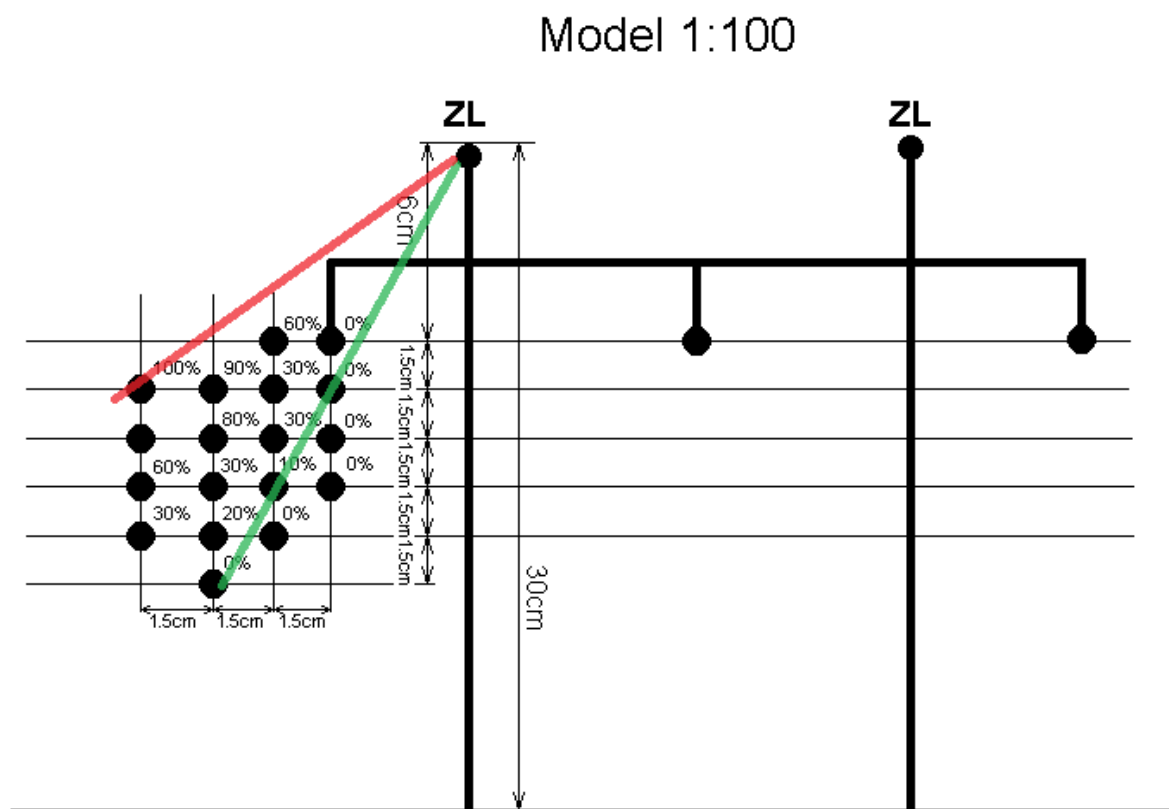
- 1) Měřením na modelu zjistěte ochranné pásmo zemnicího lana při uspořádání stožáru podle obr. 7 – portálový stožár vedení 400 kV se 2 zemnicími lany. Polohu bleskové elektrody volte tak, aby odpovídala poloze posledního stupně vůdčího blesku 50 m nad zemí. Boční odstup bleskové elektrody od osy vedení volte v mezích $A/h_s = (1-2)$, A je boční odstup bleskové elektrody od osy vedení, h_s je výška stožáru.
- 2) Vynést schematicky uspořádání stožáru a pásmo 0 až 100% pravděpodobnosti úderu do fázového vodiče.

Schéma měření



Obr.8 Schématické zapojení měřicího obvodu

Blesková elektroda (BE) je připojena k rázovému generátoru (RG). Modelové vodiče (M), znázorňující zemnicí lana a fázový vodič, jsou uzemněny na základovou desku modelu, která se pečlivě uzemní na společnou rázovou zem. Dělič (D) slouží k orientačnímu měření amplitudy rázového napětí pomocí rázového vrcholového voltmetru. Vodiči modelu nelze pohybovat spojitě, nýbrž pouze podle pravoúhlého rastru 15x15mm, který je dán otvory v závěsných gumoidových deskách. Výsledky měření mají pravděpodobnostní charakter, s rostoucím počtem rázů roste přesnost měření.



Parametry modelu

$U_{\text{nab}} = 38\text{V}$ umístění bleskové elektrody
 $1.5\text{cm} \sim 1.5\text{m}$ 50cm od osy modelu, 45cm boční vyložení od osy stožáru

Závěr

Změřená pravděpodobnost zásahu bleskem byla při pevně dané bleskové elektrodě a měnilo se uskupení fázového vodiče vůči zemnímu lanu a zemi. Zeleně vyznačená je oblast, kde zemnicí lano plně chrání fázový vodič před úderem blesku, červeně je nejhorší případ, tedy blesk vždy zasáhne vodič.

4 Aplikační úlohy

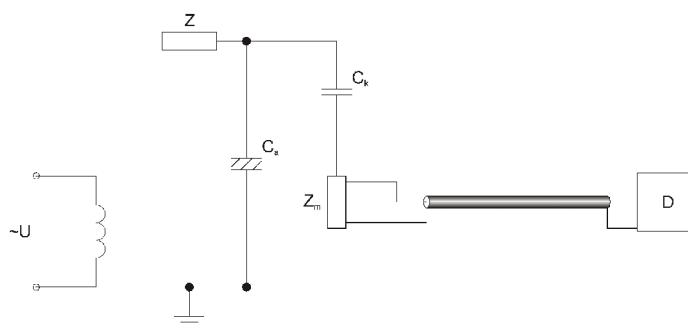
Následující úlohy už pocházejí přímo z praxe. Měří se na skutečných zařízeních, které se takto provozují. Záleží na jejich aktuálním stavu a co lze ještě zlepšit nebo s jakou chybou (nedokonalostí) je nutno zařízení provozovat. Velmi také závisí na výrobním procesu, způsobu přepravy a následným neopatrným zacházením při instalaci, např. pryskyřice a keramika jsou citlivé na otřesy, zato silikon snese skoro cokoliv.

4.1 Měření částečných výbojů (ČV)

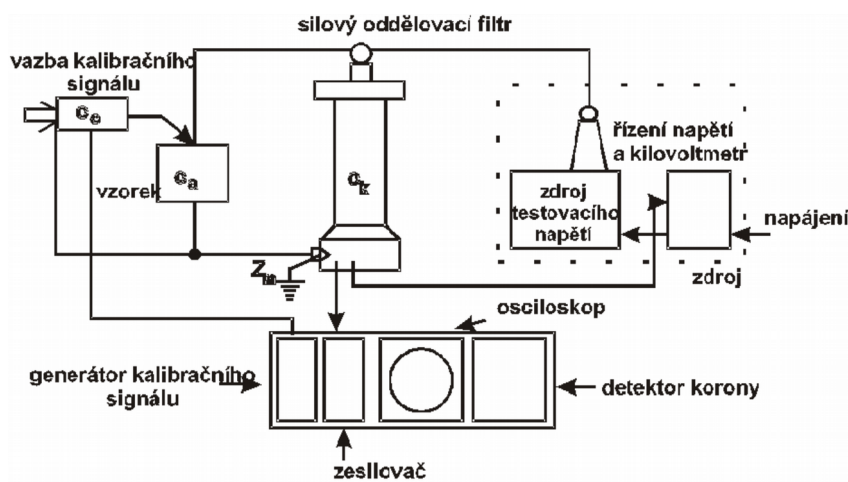
Zadání

- 1) Seznamte se s měřicím zařízením pro měření ČV a jeho vlastnostmi.
- 2) Sledujte projevy výbojů na typických uspořádáních.
- 3) Proveďte kalibraci zkušebního obvodu a změřte částečné výboje na transformátoru s litou izolací. Porovnejte jejich úroveň s požadavky normy

Schéma zapojení

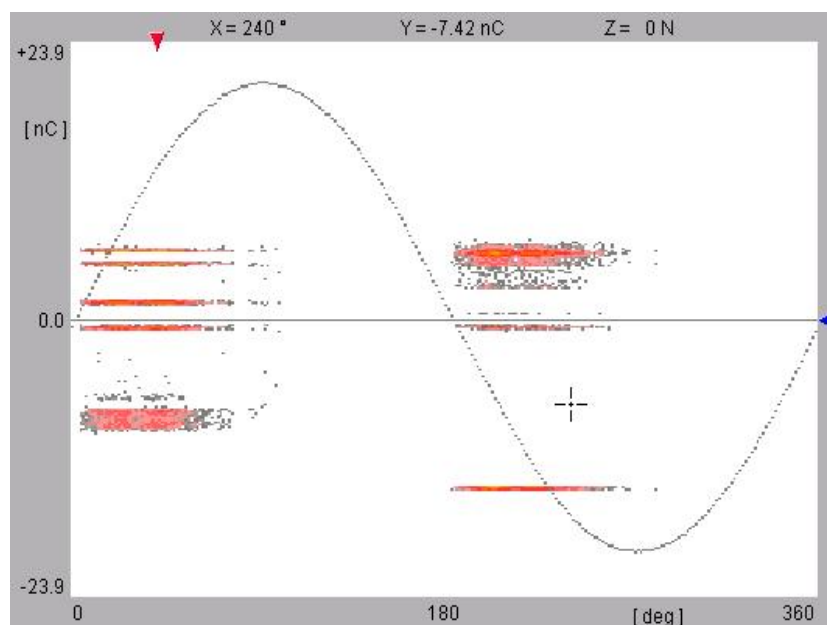


Obr.10 Základní zapojení pro měření částečných výbojů



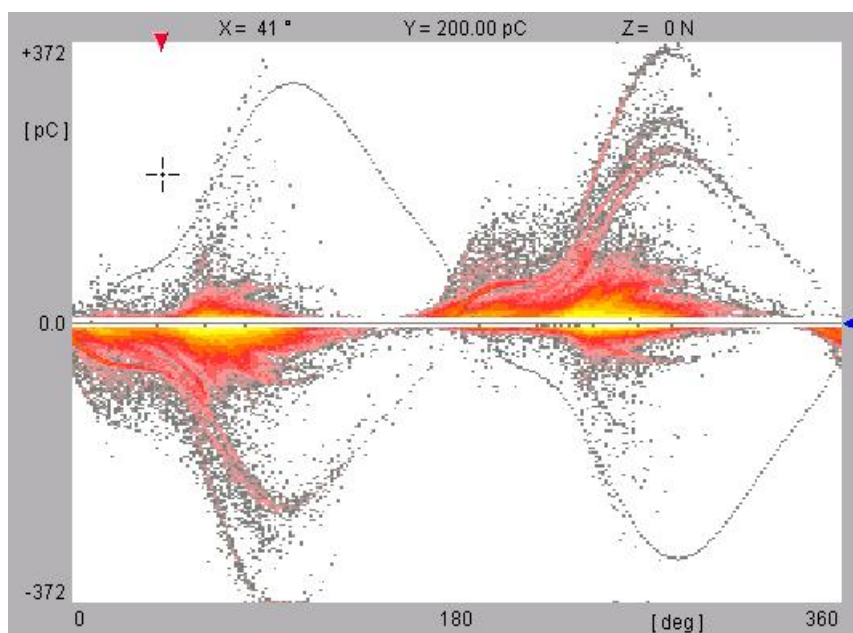
Obr.11 Přístrojové zapojení měřicího obvodu

Záznam z detektoru částečných výbojů při měření na průchodce po zapálení klouzavých výbojů. Klouzavé výboje při stejném napětí nemění svoji délku, mají tedy všechny stejný náboj a a záznamu jsou zobrazeny vodorovnými čarami.



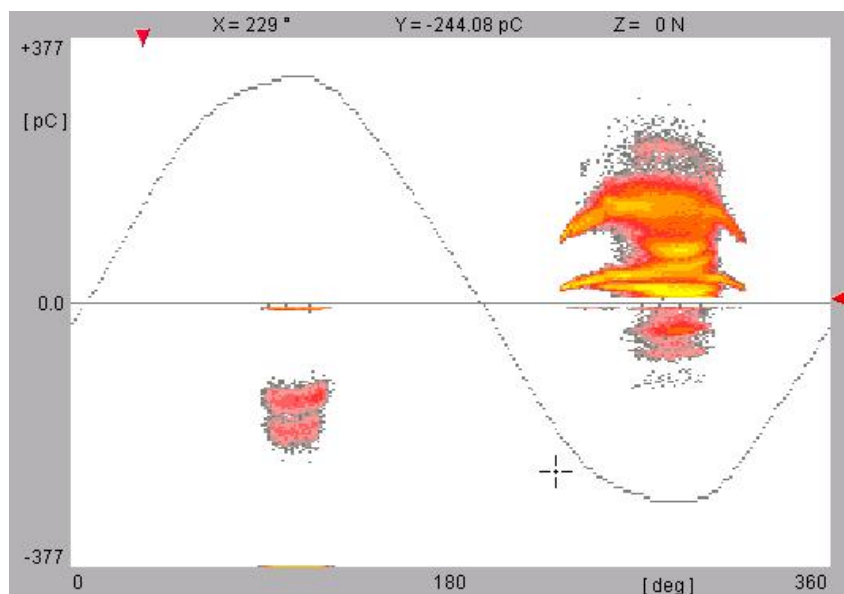
Obr.12 Záznam klouzavých výbojů

Částečné výboje v pryskyřicové izolaci transformátoru. Částečné výboje v dutinkách se projevují zejména v oblasti nárůstu napájecího napětí (0° až 90° a 180° až 270°). V celém transformátoru je velký počet mikrodutinek různých velikostí a s různým nábojem při přeskočení.



Obr.13 Záznam částečných výbojů

Záznam z měření koróny na hrotu. Koróna se nejsilněji projevuje v maximu záporné půlplny napájecího napětí. O něco slaběji v kladné půlplně.



Obr.14 Záznam koróny

Závěr

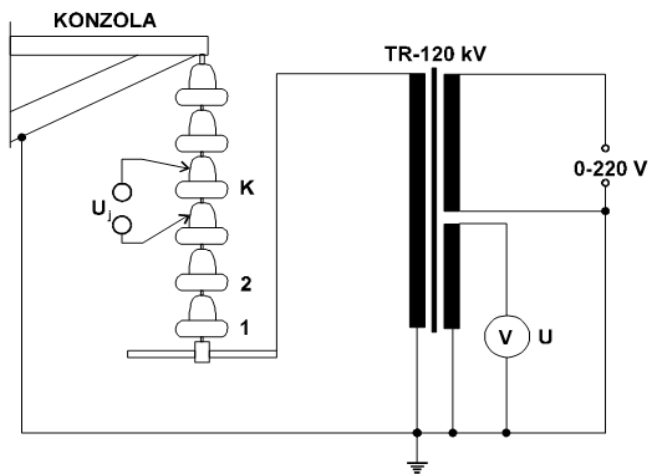
Téma částečných výbojů v elektrických přístrojích je stále aktuální a je velmi se musí dbát na fyzický stav zařízení, zejména v pevných látkách. Hlavní příčinou pro vznik těchto dutinek je výroba a transport na místo určení. Při zjištění závady v provozu, už s vnitřním „poškozením“ nelze dané zařízení opravit a musí se s takto provozovat. Jedná se zejména o pryskyřicové materiály, náchylné na otřesy při tuhnutí a přepravě, ušetřeny nejsou ani klasické izolační materiály, ale tam tohle není tak výrazné.

4.2 Rozložení napětí na řetězci izolátorů

Zadání

- 1) Na řetězci 6 izolátorů změřte a nakreslete rozložení napětí pro
 - a) řetězec bez kapacitního kruhu
 - b) řetězec s kapacitním kruhem
- 2) Určete přetížení prvního izolátoru v řetězci v závislosti na celkovém počtu izolátorů v řetězci a nakreslete zjištěnou funkci $\Delta U = f(N)$ pro $N = 2, 3, \dots, 10$

Schéma zapojení



Obr.15 Izolátorový řetězec

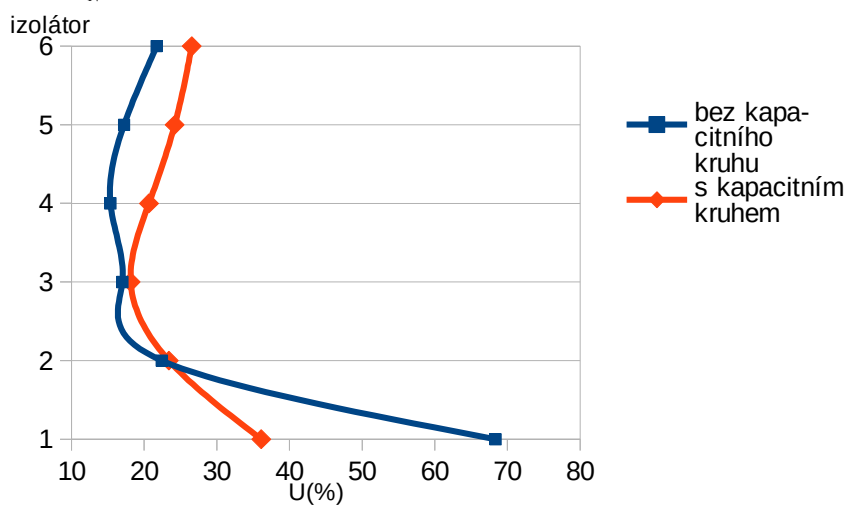
Naměřené a vypočítané hodnoty

Tab.14

izolátor	Un (kV)		bez kap. kruhu		kap. kruh	
	bez kapacitního kruhu	s kapacitním kruhem	ΔU bez	ΔU %	ΔU s	ΔU %
6	62,8	56,8	13,64	21,7	15,08	26,6
5	70,5	59,5	12,15	17,2	14,40	24,2
4	74,7	64,4	11,47	15,4	13,30	20,7
3	71	68,7	12,07	17,0	12,47	18,2
2	61,8	60,5	13,86	22,4	14,16	23,4
1	35,4	48,7	24,20	68,4	17,59	36,1
		Uj (kV)	8,5	8,5	8,7	8,57

Příklad výpočtu

$$\Delta U_{\%} = \frac{\Delta U}{U_N} \cdot 100 = \frac{13.64}{62.8} \cdot 100 = 21.7$$



Graf18 Rozložení napětí na řetězci

Závěr

Kapacitní kruh na řetězci izolátorů zrovnoměrně rozložení napětí. Proto stačí jednotlivé stupně dimenzovat na menší přeskokové napětí, což sebou přináší úsporu materiálu.

Bez kapacitního kruhu je napětí rozloženo nerovnoměrně a nejvíce zatěžuje talíř nejbližší k vodiči.

Nové úlohy

5 Měření frekvenčních vlastností koróny

Zadání

Ověřte rušení korónovými výboji dvěma různými metodami měření:

- 1) V bezodrazové místnosti pomocí širokopásmové antény
- 2) Sledování výbojů v laboratoři vysokého napětí.

V obou metodách použijte tyto čtyři zkoušence:

Model vodič-zem (průměr vodiče = 0,6mm)

Model vodič-zem (průměr vodiče = 1,6mm)

Uspořádání hrot-miska

Průchodka



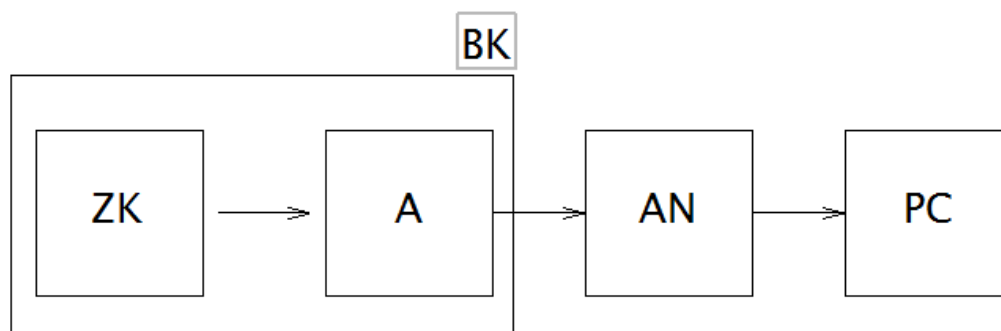
Obr.16 Model vodič-zem[3]



Obr.17 Uspořádání hrot-miska [3]



Obr.18 Průchodka [3]

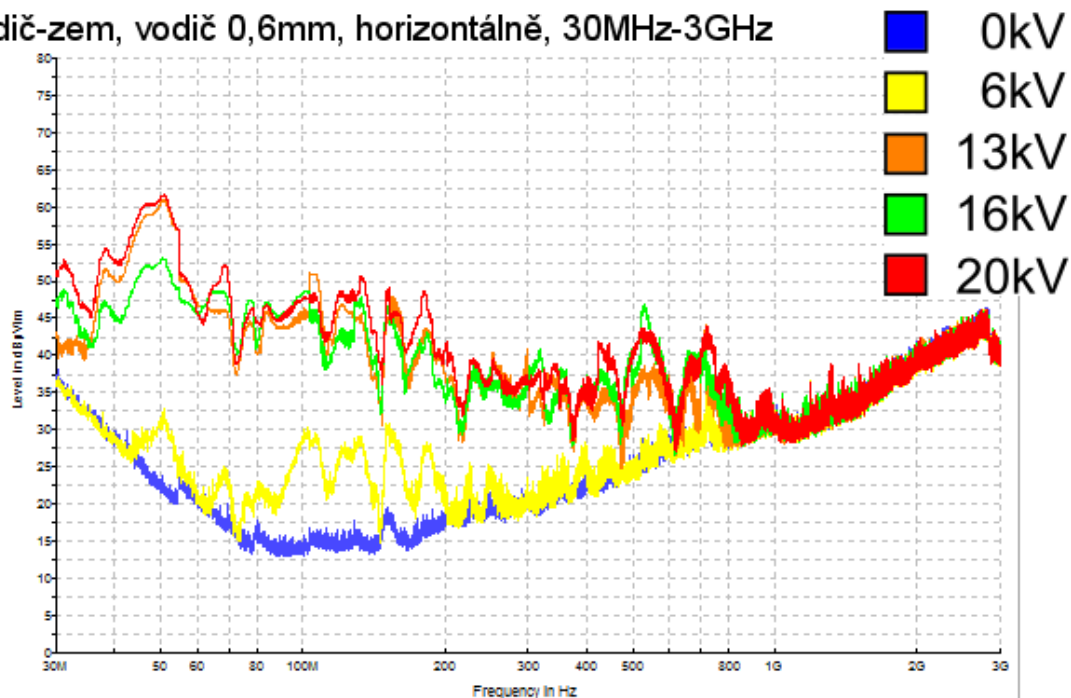


Obr.19 Blokové schéma měření v bezodrazové místnosti

Vyzařované rušení ze zkoušence (ZK) zapojeného v obvodu, ruší pole antény (A) v bezodrazové komoře BK. Signál z antény je pomocí analyzátoru (AN) přenesen do PC, kde je pomocí příslušného programu zobrazena charakteristika rušícího signálu (Obr. 18).

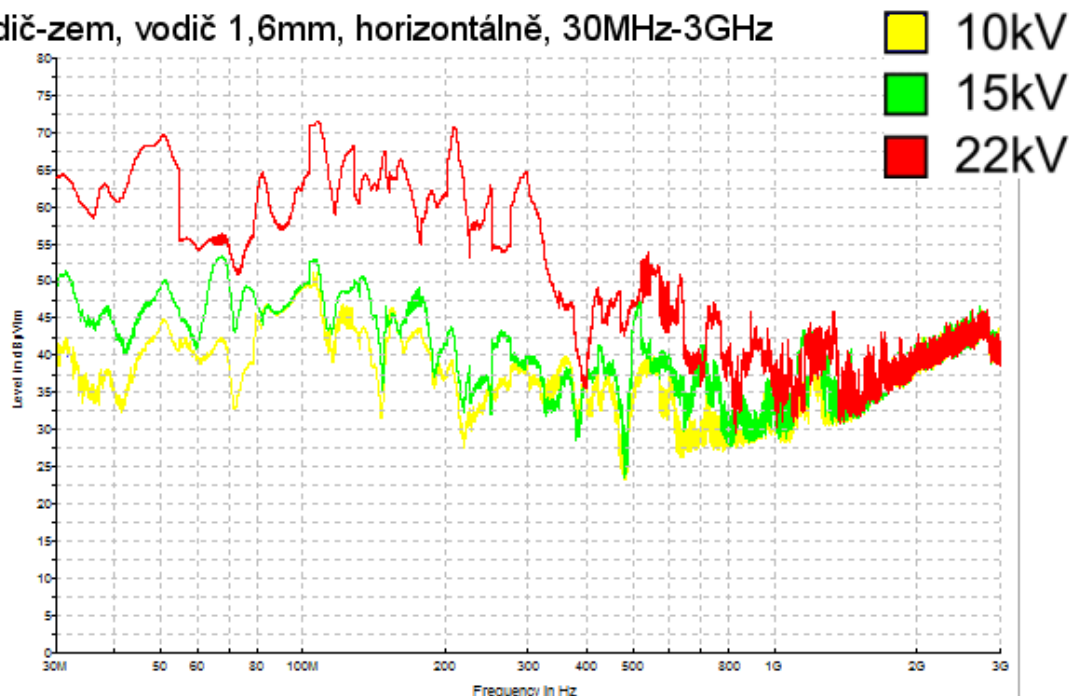
Výsledky měření

Vodič-zem, vodič 0,6mm, horizontálně, 30MHz-3GHz

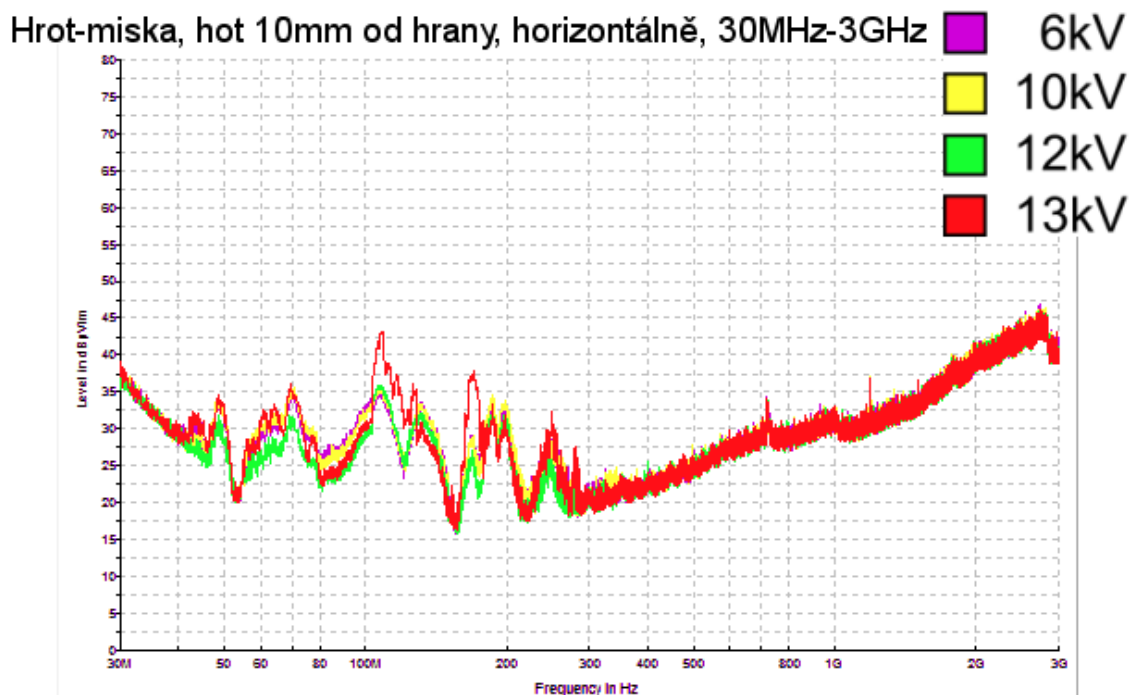


Graf 19 Výsledné hodnoty měření log-per anténou s bikonickým dipólem na vzdálenost 3m, vodič 0,6mm, vertikální poloha antény, měřící rozsah 30M-3GHz[3]

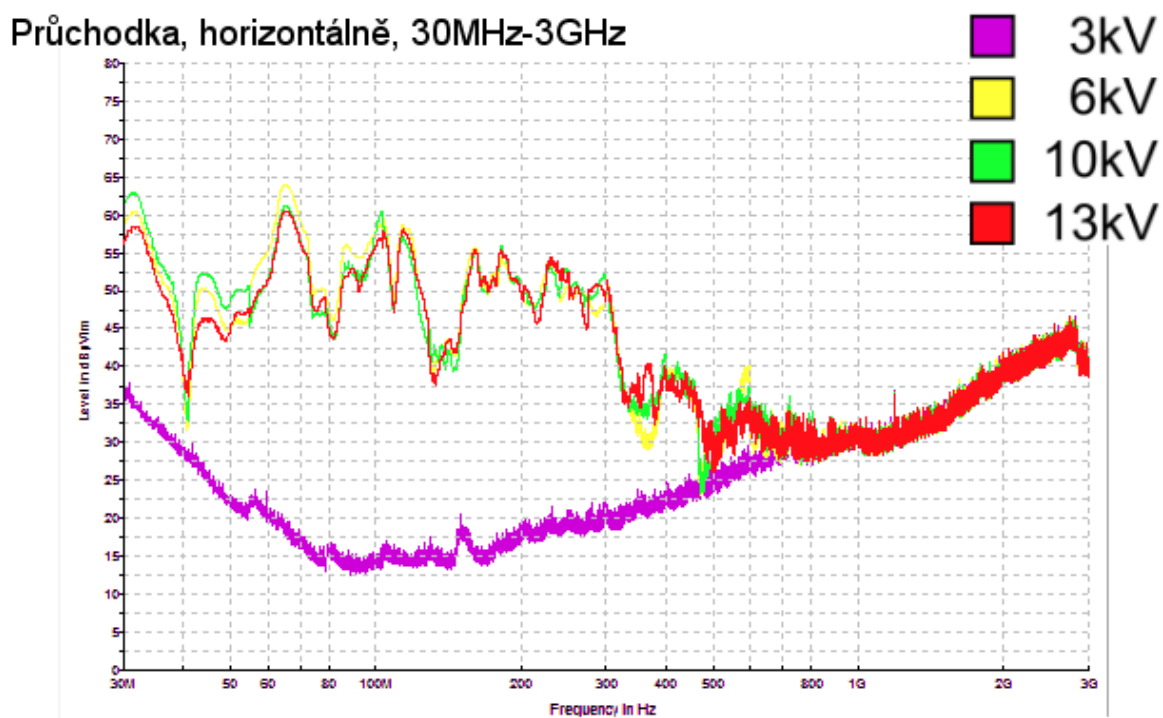
Vodič-zem, vodič 1,6mm, horizontálně, 30MHz-3GHz



Graf 20 Výsledné hodnoty měření log-per anténou s bikonickým dipólem na vzdálenost 3m, vodič 1,6mm, horizontální poloha antény, měřící rozsah 30M-3GHz[3]



Graf 21 Výsledné hodnoty měření log-per anténou s bikonickým dipólem na vzdálenost 3m, hrot-miska, hrot 10mm od hrany misky, horizontální poloha antény, měřící rozsah 30M-3GHz[3]



Graf 22 Výsledné hodnoty měření log-per anténou s bikonickým dipólem na vzdálenost 3m, průchodka, horizontální poloha antény, měřící rozsah 30M-3GHz[3]

Závěr

Z grafů měření je zřejmý rostoucí hladina rušení koróny do okolí spolu s zvyšujícím se napětím. Ze všech uspořádání nejvíce vyzařoval model vodič-zem, vodič 1,6 mm, maximum přes 70dB μ V/m. Nejméně vyzařoval model, a tudíž nejpříznivějším byl hrot-miska, ačkoliv byl předpoklad, že bude nejvíce vyzařovat do okolí.

6 Testování elektrické pevnosti vzduchu rázovým generátorem

Zadání

Změřte polovinové přeskokové napětí pro více hladin.

Postup měření

Na rázovém generátoru zadejte požadovanou velikost napětí, minimální počet pulzů je deset (pro přesnost zvolte 25)

Nastavte vzdálenost elektrod na 4 (6) cm a určete, při jaké hodnotě napětí dojde k 50% přeskoku na elektrodách

Opakujte měření pro zápornou polaritu

Změřené hodnoty vynesete do graficky.

Úvod

Rázovým generátorem se zkouší elektrická pevnost izolace. Ať už se jedná o indukční zařízení (motory, generátory, transformátory), tak i kabely a izolátory. Výsledkem zkoušky je zjištění stavu měřeného zařízení (zkoušence).

Schéma zapojení a měření

Zdrojem impulzního napětí je třístupňový rázový generátor 300 kV, 15 kJ. Impulzní napětí je vedeno na měřicí kulové jiskřiště a na rázový dělič. K děliči je připojen měřicí systém s vrcholovým voltmetrem (U_{VV}) a řídicí jednotka pro záznam tvaru impulzního napětí. Rázový generátor se spouští trigovacím zařízením po dosažení zapalovacího napětí RG, které je určeno doskokem jeho spouštěcích jiskřišť.[1]

Postup měření

Po zapojení podle schématu se sejme z RG zkratovací tyč, uzavře zkušebna a zapne zdroj napětí a měřicí obvody. Rázový generátor se nabíjí určitým nabíjecím napětím a opakovaně spouští. Amplituda impulzního napětí se měří vrcholovým voltmetrem a kulovým jiskřištěm (polovinovou metodou).[1]

Napětí je přiváděno na hrot, koule o průměru 8 cm je uzemněna.

Poznámka

→ Tabulky přeskokových napětí platí pro normální atmosférické podmínky, tj.:

- tlak p 101,3 kPa
- teplota T 20 °C
- absolutní vlhkost v 11 g/m³

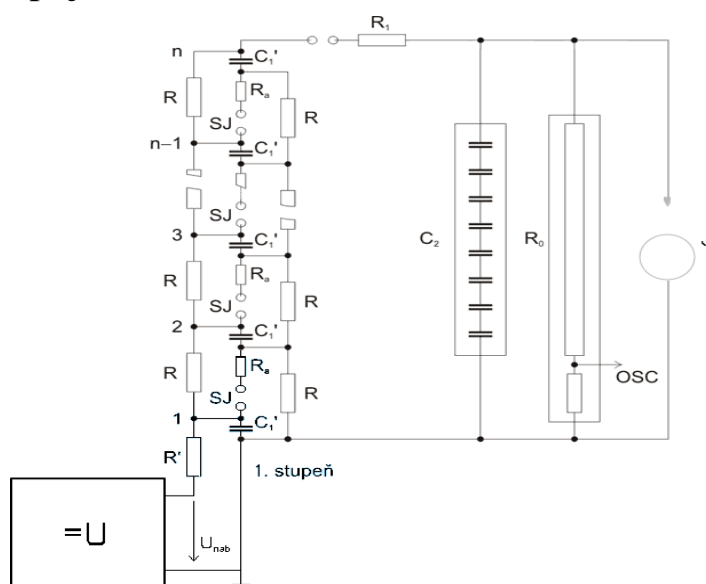
Jestliže jsou při zkoušce skutečné atmosférické podmínky odlišné od normálních je nutné tabulkové přeskokové napětí korigovat. Pro měření na kulovém jiskřišti (homogenní elektrické pole) se koriguje pouze na hustotu vzduchu.

Korekční činitel je v omezeném rozsahu roven poměrné hustotě vzduchu, která je definována: [1]

$$\delta = k_H = \frac{p \cdot (273 + 20)}{101,3 \cdot (273 + T)} = 2,89 \cdot \frac{p}{273 + T} \quad [1]$$

→ Další možností je zadat skutečné atmosférické podmínky při měření do přístroje a ten je sám přepočte na správné.

Schéma zapojení



Obr.20 Schéma zapojení s RG [1]

Změřená data

Tab.15

4 cm, kladná polarita

U(kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	P (%)
40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
42	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	10
44	-	-	x	x	-	-	-	-	-	x	30
46	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100
47	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	10
50	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100
55	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100

Tab.16

4 cm, záporná polarita

U(kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	P (%)
40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
80	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100
85	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100

Tab.17

6cm, kladná polarita

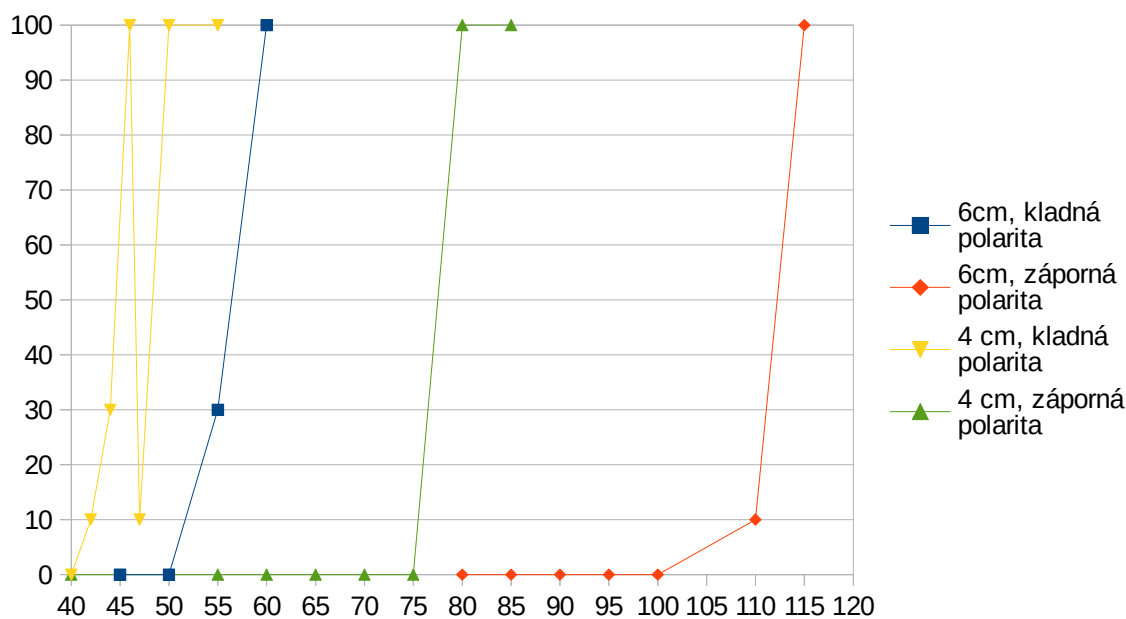
U(kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	P (%)
45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
55	-	-	-	x	x	-	x	-	-	-	30
60	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100

Tab. 18

6cm, záporná polarita

U(kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	P (%)
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
110	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	10
115	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	100

x: došlo k přeskočení
 -: nedošlo k přeskočení



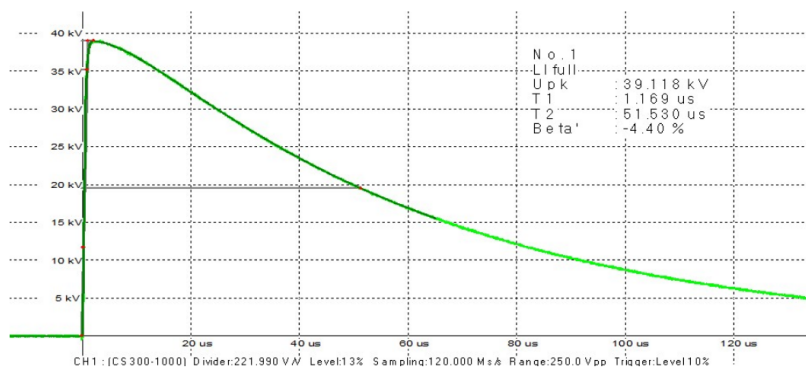
Obr.21 Pravděpodobnost přeskočení

Závěr

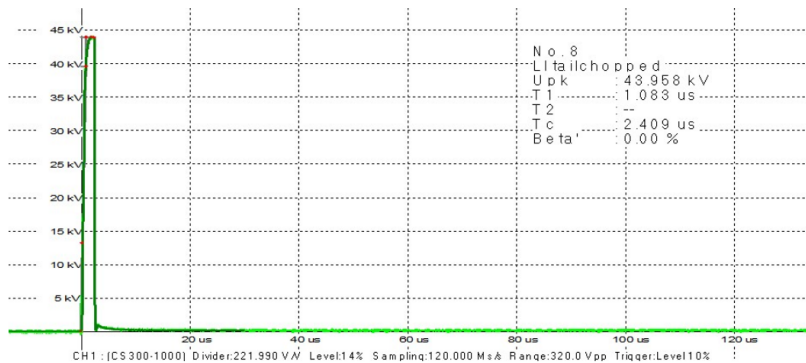
Pro měření je lepší sada 25 impulzů v řadě – zvyšuje přesnost pravděpodobnosti. Názorně je to vidět u žlutého průběhu (4cm, kladná polarita), kdy je zaznamenáno 100% pravděpodobnost přeskočení dříve, než se dosáhlo vyšší hladiny (u které se to očekává).

50% napětí pravděpodobnosti přeskočení vychází při uspořádání hrot - koule takto:

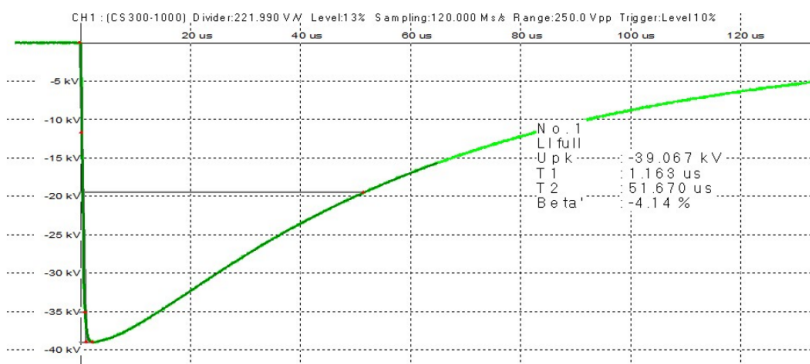
uspořádání	6cm, kladná	6cm, záporná	4cm, kladná	4cm, záporná
U_{50}	57,5 kV	112,5 kV	~ 45kV	77,5kV



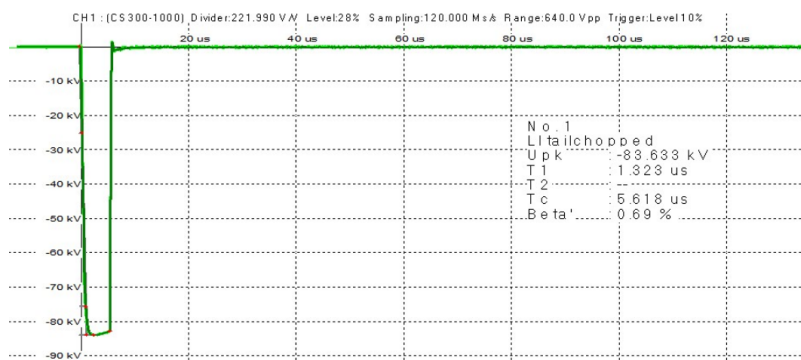
Obr.22 Příklad celé kladné rázové vlny



Obr.23 Příklad useknuté kladné rázové vlny



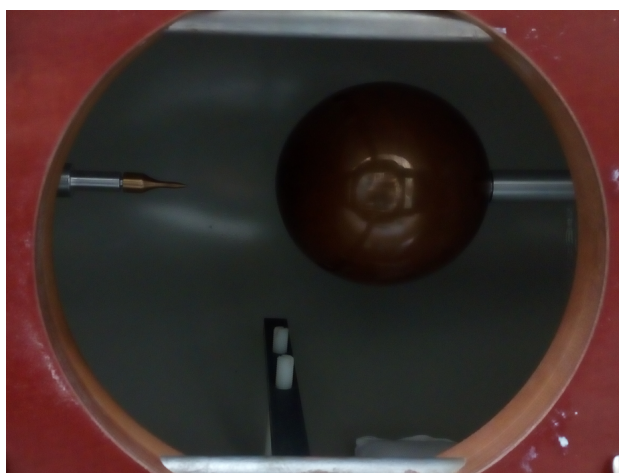
Obr.24 Příklad celé záporné rázové vlny



Obr.25 Příklad useknuté záporné rázové vlny



Obr.26 Celkový pohled



Obr.27 Uspořádání hrot - koule

7 Inovace úlohy rozložení napětí na izolátoru

Zadání

Změřte rozložení napětí v závislosti na přiloženém napětí a nakreslete zjištěnou funkci $\Delta U = f(N)$ pro $N = 1, 2, \dots, 7$

Naměřené a vypočítané hodnoty

Tab.19

měřící jiskřiště

U _i (kV)					U _j (kV)
8,34	8,24	8,66	8,43	8,55	8,444

Tab.20

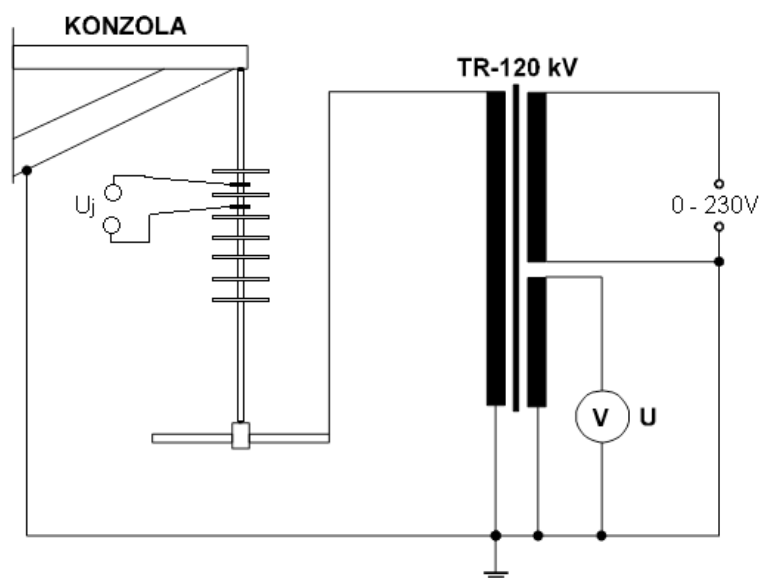
keramika, 5 talířů

n	U _i (kV)			U _{pr} (kV)	ΔU (%)
1	24,5	21,55	18,95	21,67	38,97
2	70	70,7	71,3	70,67	11,95
3	77	69,5	76,4	74,3	11,36
4	80	85	83,6	82,87	10,19
5	47	50,5	49,8	49,1	17,20

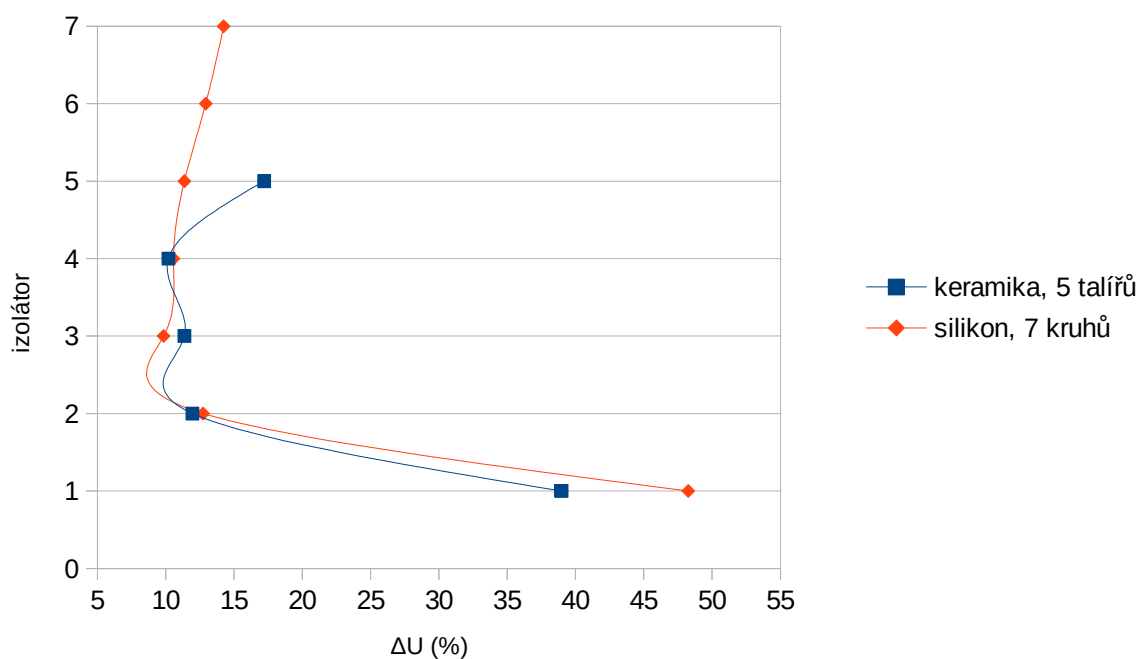
Tab.21

Silikon, 7 kruhů

n	U _i (kV)			U _{pr} (kV)	ΔU (%)
1	20,2	16,15	16,14	17,50	48,26
2	61,9	67	70	66,30	12,74
3	83,9	87,9	85,3	85,70	9,85
4	79,2	81,1	79,4	79,90	10,57
5	74,4	73,8	74,6	74,27	11,37
6	63	66	67	65,33	12,92
7	59	59,1	59,8	59,30	14,24



Obr.28 Schéma měření s izolátorem[1]



Obr.29 Graf rozložení napětí na izolátorech

Příklad výpočtu

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_j}{U_{pr}} \cdot 100 = \frac{8.444}{21.67} \cdot 100 = 38.97\%$$

Závěr

Oba měřené izolátory se měřily bez kapacitního kruhu. Rozložení napětí je přibližně stejné, pouze v uchycení na případný stožár (5. až 7. kruh) je vidět výrazné zlepšení rovnoměrnosti napětí při větším počtu kruhů, čili není tak napěťově namáhán.



Obr.30 Vlastní měření izolátory (levý silikonový, pravý keramický)



Obr.31 Vlastní měření (izolátor + měřicí jiskřiště)



Obr.32 Celkový pohled na měření

8 Závěr

Nová měřicí úloha s rázovým generátorem je nenáročná na obsluhu, v podstatě nás vede systém sám, zato je velmi náročná na čas. Jde o simulaci např. ochranného jiskřiště na izolátoru na vedení, kdy jsou dva hroty proti sobě a celé uspořádání chrání proti atmosférickým jevům.

Úloha s korónou je důležitou součástí oboru vysokých napětí, protože reálně ukazuje typické situace, kdy vzniká výboj a hlavně jeho intenzitu rušení do okolí. Má také demonstrovat, proč se tento jev snažíme co nejvíce potlačit.

Měření rozložení napětí na izolátoru (keramický a silikonový) bylo velmi omezeno starým zdrojem vysokého napětí (podle štítku na transformátoru z roku 1952). Udávané napětí mělo dosahovat až k 120 kV, reálný strop byl kolem 90kV, nikdy se nepřiblížilo ani k 100 kV. Za druhé, celé uspořádání je u stěny, která je kovová, jak je vidět z obrázku u příslušné úlohy, tudíž uzemněná, a docházelo k neplánovaným přeskokům na ni. Měření se tak muselo začít znova od nuly, protože zareagovala ochrana a shodila celé ovládání.

Velké plus je, že alespoň postupně se obnovuje vybavení laboratoře vysokého napětí. V úloze s rázovým generátorem je už měřeno na novém, dva roky starém přístroji (viz patřičný obrázek). Současné vybavení laboratoře je už na dnešní poměry zastaralé a investovat do nových přístrojů je více než žádoucí. Byla by velká škoda, kdyby fakulta přišla o vlastní laboratoř, zvláště, když úzce souvisí s výukou.

Rozšiřování měření by mohlo být v modelování izolační pevnosti izolátoru za deště, kdy vlastní izolátor stojí v nevodivé nádobě (např. sklo), na něj přiváděno napětí (simulace provozu) a z nádoby nad tím by danou intenzitou kapala voda a zjišťovala by se elektrická pevnost při různé intenzitě kapání.

9 Seznam zdrojů

- [1] Měřicí úlohy 1 až 4: Seznam laboratorních úloh z předmětu TVN. FEL-KEE, 2001
- [2] Technika zkoušek vysokým napětím - Část 2 Měřicí systémy, ČSN EN 60060-2,
(česká verze evropské normy EN 60060-2:2011)
- [3] Dyk, V. Diplomová práce Elektromagnetické emise vysokonapěťových zařízení, 2015