

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Přímé a nepřímé metody měření vysokého napětí

**vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Trnka, Ph.D.
autor: Bc. Jiří Mička**

2012

Anotace

V této diplomové práci se zabýváme problematikou měření vysokého napětí. První část je zaměřena na rozdělení metod měření vysokého napětí. V následující části je popsán princip kalibrace za použití kulového jiskřiště, podmínek při měření atd. Poté je rozebrán okruh přístrojů používaných pro měření vysokého napětí a poslední část je věnována teoretickému návrhu děliče napětí pro různá napětí.

Klíčová slova

Vysoké napětí, bezpečnost práce, metody měření, kulové jiskřiště, bod doskoku, napěťový dělič.

Abstract

In this thesis we deal with the issue of measuring the high voltage. The first part focuses on the use of methods for measuring high voltage. The following section describes the calibration of the principle of using a spherical spark gap, the measurement conditions, etc. Then are described devices used for measuring high voltage and the last part is aimed to the theoretical design of voltage divider for different voltages.

Key words

High voltage, safety, measurement methods, spherical spark gap, landing point, voltage divider.

Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne 22.5.2012

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Pavlovi Trnkovi, za odbornou pomoc, důležité profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce a také všem, kteří mi pomohli k jejímu vypracování.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	9
SEZNAM SYMBOLŮ	10
1. ÚVOD DO MĚŘENÍ VYSOKÉHO NAPĚTÍ	11
1.1 BEZPEČNOST PRÁCE	11
1.2 MĚŘÍCÍ METODY	12
2 KALIBRACE POMOCÍ KULOVÉHO JISKŘIŠTĚ	13
2.1 NORMALIZOVANÉ KULOVÉ JISKŘIŠTĚ	13
2.1.1 Vlastnosti povrchu koulí.....	13
2.2 ZPŮSOBY USPOŘÁDÁNÍ KULOVÉHO JISKŘIŠTĚ	14
2.2.1 Svislé jiskřiště	14
2.2.2 Vodorovné jiskřiště	15
2.2.3 Vzdálenost okolo koulí	17
2.3 PŘIPOJENÍ A UZEMNĚNÍ.....	17
2.3.1 Vodič s vysokým napětím	17
2.3.2 Ochranný rezistor pro měření stejnosměrných a střídavých napětí.....	18
2.3.3 Ochranný sériový rezistor pro měření impulzních napětí	18
2.4 OZAŘOVÁNÍ	18
2.5 MĚŘENÍ NAPĚTÍ.....	19
2.5.1 Měření maximální hodnoty střídavého napětí síťového kmitočtu	19
2.5.2 Měření maximální hodnoty napětí při plném atmosférickém a spínacím impulzu	20
2.5.3 Měření stejnosměrných napětí.....	20
2.6 NORMALIZOVANÉ JISKŘIŠTĚ TYČ-TYČ PRO MĚŘENÍ STEJNOSMĚRNÉHO NAPĚTÍ	25
2.6.1 Konečné uspořádání jiskřiště tyč-tyč	25
2.7 POUŽITÍ NORMALIZOVANÝCH VZDUCHOVÝCH JISKŘIŠŤ PRO KONTROLU FUNKČNOSTI SCHVÁLENÝCH MĚŘÍCÍCH SYSTÉMŮ	25
3 PŘÍSTROJE A METODY VHODNÉ PRO MĚŘENÍ VN	25
3.1 MĚŘENÍ NAPĚTÍ VVN A ZVN	26
3.2 MĚŘENÍ POMOCÍ KULOVÉHO JISKŘIŠTĚ	28
3.3 DĚLIČE NAPĚTÍ.....	28
4. NÁVRH DĚLIČE NAPĚTÍ PRO MĚŘENÍ VN	29
ZÁVĚR	30
POUŽITÁ LITERATURA	31

Úvod

Téma této diplomové práce je měření vysokého napětí. Práce s vysokým napětím a s tím spojené zvýšené nebezpečí úrazu elektrickým proudem vyžaduje při měření v laboratoři pracovat se zvýšenou opatrností.

V první části této diplomové práce se zabývám bezpečností práce při měření vysokého napětí a také stručným rozdělením metod pro měření vysokého napětí. Měření vysokého napětí včetně napěťových zkoušek nejčastěji probíhá v laboratořích pro vysoké napětí. Účelem vysokonapěťové laboratoře je provádění zkoušek vysokým napětím, jenž ověřují kvalitu a spolehlivost izolace elektrických přístrojů a zařízení vn, vvn a zvn. Vybavení laboratoře se skládá ze zdroje napětí tvořícího napětí o známé velikosti, tvaru a průběhu. Vysoké napětí můžeme měřit buď přímou, ale i nepřímou metodou.

Druhá část je zaměřena na popis kalibrace pomocí kulového jiskřiště. Kulová jiskřiště byla po mnoho let využívána pro měření vrcholových hodnot napětí v průmyslových zkušebnách. Tato metoda je jednou z nejčastějších metod pro měření přímo. Avšak tento druh měření je uskutečnitelný pouze v laboratoři.

V části třetí jsou popsány detailněji zařízení a metody, které se používají pro měření vysokého napětí. Jednak jsem už zmínil, že je možné měřit napětí pomocí přímé i nepřímé měřící metody. Dále se provádějí další tři typy prováděných prací. Zaprvé je to práce na vzdálenost, poté práce v dotyku a poslední je práce na potenciálu.

Na konec je v poslední části zdokumentován teoretický návrh děliče napětí pro měření různých napěťových hladin. Měření pomocí nepřímé metody, vyžadující buď odporové či kapacitní děliče apod., lze realizovat jednak v laboratoři, tak i na jiných místech.

Seznam symbolů

D [cm].....	průměr
S [cm].....	doskok
z [%].....	směrodatná odchylka
R [Ω].....	odpor rezistoru
L [μ H].....	indukčnost
U [kV].....	elektrické napětí
U _{ef} [V].....	efektivní napětí
U _{max} [V].....	vrcholové napětí
I [A].....	elektrický proud
t [s].....	čas
t ₀ [°C].....	atmosférická teplota
p ₀ [kPa].....	atmosférický tlak
ϕ [gm^{-3}].....	absolutní vlhkost
E _p [kV/cm].....	elektrická pevnost
U _p [kV].....	průrazné napětí
d [cm].....	vzdálenost mezi elektrodami
k [-].....	konstanta převodu
Z ₁ [Ω].....	impedance vysokonapěťové části
Z ₂ [Ω].....	impedance nízkonapěťové části
C [pF].....	kapacita

1. Úvod do měření vysokého napětí

1.1 Bezpečnost práce

Obyčejné síťové napětí v domácnosti je častou příčinou úrazu, který může skončit i smrtí. Důkazem jsou toho desítky tragických případů ročně. Práce vykonávaná pod napětím je určena jen pro zkušené elektromontéry s dlouhou praxí na zařízeních bez napětí. Tito pracovníci musí perfektně znát dané pracovní postupy a pečlivě se starat o své nářadí a pracovní i ochranné pomůcky. Kontrola před úplným začátkem práce je nutnou samozřejmostí. Ochranné rukavice musí být zcela nepoškozené, stejně jako ostatní ochranné nářadí a pomůcky.

Vysoké napětí se opravuje přímo za provozu z důvodu kvality dodávky elektrické energie. Při každém přerušení dodávky firma jednak přichází o zisk a jednak je přerušení vnímáno zákazníky negativně. Platí i skutečnost, že některé pracovní postupy je nemožné jinak než pod napětím ani provádět. Každá i sebemenší závada, musí být okamžitě bez váhání opravena. To neplatí, pokud je počasí velmi špatné. Např. když sněží nebo je silný déšť doprovázený bouřkou. Při těchto podmínkách se pod napětím pracovat nedá.

Existují tři metody práce pod napětím. První se nazývá práci na vzdálenost, při níž se pracovník přiblíží k vodičům pod napětím na tzv. bezpečnou vzdálenost. Dále pak pracuje v prostoru ohrožení s ochrannými pracovními pomůckami, které jsou opatřeny speciálními koncovkami určenými pro umístění pracovního nářadí. Druhou metodou je práce v dotyku, při které se pracovník dotýká zařízení vysokého napětí. K tomu používá dielektrické rukavice pro danou napěťovou hladinu. Třetí metoda se jmenuje práce na potenciálu. Při této metodě se pracovník dotýká vodičů holýma rukama. Všechny tyto metody se využívají v různých napěťových hladinách. [4, 5]



Obr. 1.1 Mezinárodní bezpečnostní symbol "Pozor, nebezpečí úrazu elektrickým proudem" (ISO3864), známý také jako symbol vysokého napětí. [5]

1.2 Měřicí metody

- **PŘÍMÁ MĚŘÍCÍ METODA**

– je měřicí metodou, kdy se hodnota neznámé měřené veličiny získá přímo, aniž by se doopravdy uskutečnilo naměření nějakých hodnot. Jako přímá měřicí metoda se považuje i to, když je stupnice přístroje opatřena alternativními hodnotami (např. dílky nebo %), které jsou vázané na příslušné hodnoty měřené veličiny pomocí tabulky nebo grafu. Typickým příkladem přímé měřicí metody je např. měření odporu rezistoru multimetrem apod.

- **NEPŘÍMÁ MĚŘÍCÍ HODNOTA**

– při použití této metody je hodnota měřené veličiny získávána měřením jiných veličin, které jsou vázané na měrnou veličinu pomocí známého vztahu. Klasickým vyjádřením nepřímé metody je měření elektrického odporu na základě měření proudu a napětí. [6]

2 Kalibrace pomocí kulového jiskřiště

2.1 Normalizované kulové jiskřiště

Kulová jiskřiště byla po mnoho let využívána pro měření vrcholových hodnot napětí v různých průmyslových zkušebnách. Nejbližší body, které jsou umístěné na obou koulích, se nazývají body doskoku. Dle provedení se rozlišují dvě uspořádání. První je vhodné pro kulová jiskřiště se svislou osou a druhé pro kulová jiskřiště s vodorovnou osou.

Normalizované kulové jiskřiště se skládá ze dvou kovových koulí o stejném průměru D , jejich dřiků, izolačních držáků, ovládacích zařízení, nosné konstrukce a přívodů sloužících pro připojení k bodu, na kterém se bude měřit napětí. Normalizované hodnoty D jsou následující: 2; 5; 6,25; 10; 12,5; 15; 25; 50; 75; 100; 150 a 200 cm. Doskok mezi oběma koulemi se označuje S . Kulové jiskřiště je považováno ze normalizované měřicí zařízení IEC, pokud je směrodatná odchylka z v době použití menší než 1 % pro střídavá napětí síťové frekvence a napětí při atmosférickém impulzu a menší než 1,5 % pro napětí při spínacím impulzu. Směrodatnou odchylku z ovlivňuje stav povrchu koulí, volné elektrony a dále prach vyskytující se ve vzduchu.

2.1.1 Vlastnosti povrchu koulí

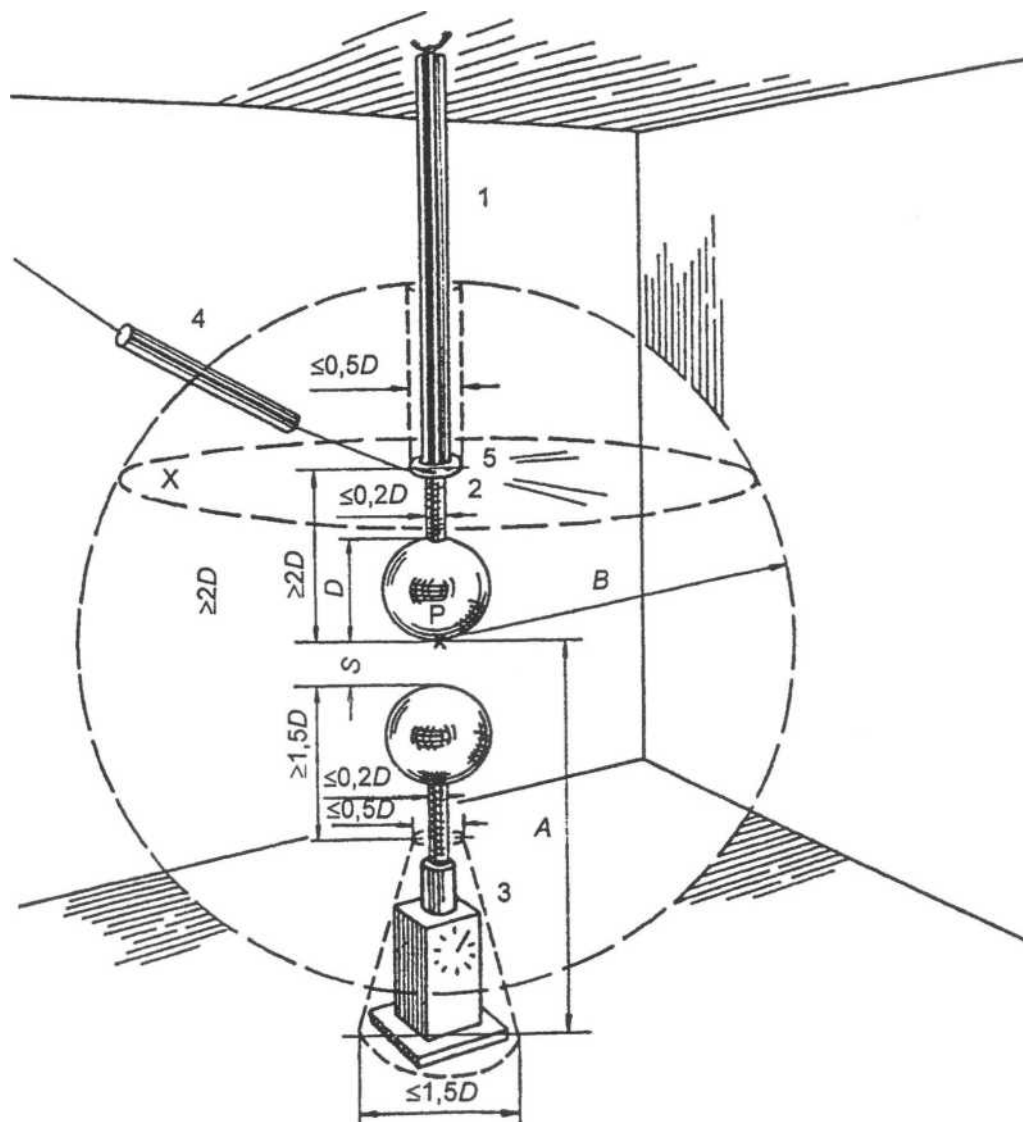
Koule musí být vyrobeny s důkladnou pečlivostí. Jednak kvůli tomu, aby jejich povrchy byly hladké, ale také proto, aby jejich zahřívání bylo co nejvíce rovnoměrné. Rozměry koulí se mohou kontrolovat vhodnými přístroji (např. sperometrem), přičemž platí, že průměry koulí se od jmenovité hodnoty mohou lišit maximálně 2%. Povrchy koulí se kontrolují vizuálně, ale i hmatem.

Povrchy koulí kolem doskokových bodů musí být čisté a suché, ale neměly by být vyleštěné. Během normálního provozu se povrchy koulí zdrsňují a vytváří se důlky. Povrchy koulí se mají ošetřit jemným brusným papírem a poté vytvořený prach odstranit hladkou tkaninou. Případné mastné nečistoty je nutno odstranit rozpouštědlem. Při vysoké hodnotě relativní vlhkosti může kondenzovat vlhkost na povrchu bodů doskoku, čímž bude zapříčiněno chybné měření. Mírné poškození povrchu koule mimo oblast bodu doskoku patrně nebude mít vliv na použité koule jako měřicího zařízení. [1]

2.2 Způsoby uspořádání kulového jiskřiště

2.2.1 Svislé jiskřiště

Koule mají svislé uspořádání, detailněji je tento typ jiskřiště zobrazen na *obr.2.1* níže uvedeném. Hlavním požadavkem je snížit vliv dřívku s vysokým napětím na přeskokové napětí. Menší vliv mají uzemněný dřík spolu s ovládacím zařízením, a z toho důvodu nejsou jejich rozměry tolik důležité. Dřívky koulí jsou umístěny vizuálně v jedné ose. [7]



Obr. 2.1 Svislé kulové jiskřiště [7]

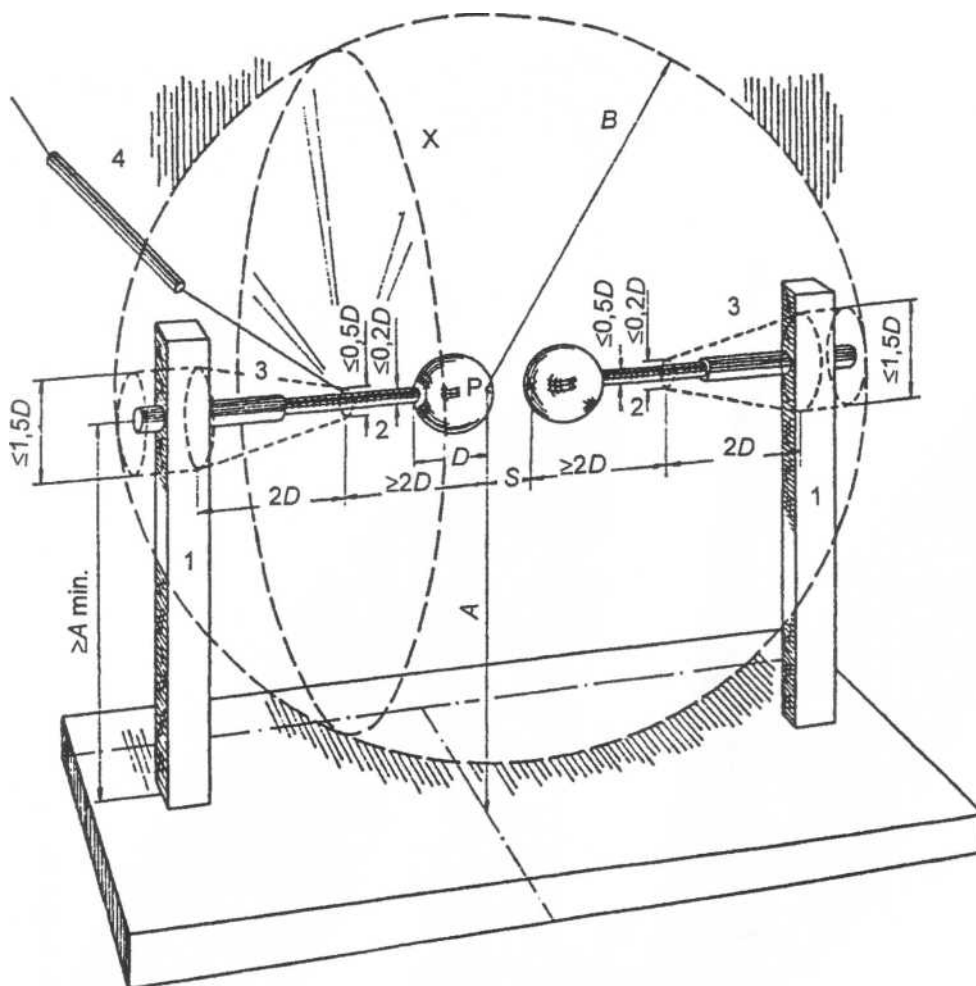
Legenda

- 1 Izolační držák
- 2 Dřík koule
- 3 Ovládací zařízení s maximálními rozměry
- 4 Přívod vysokého napětí se sériovým rezistorem
- 5 Elektroda na snížení gradientu s maximálními rozměry

POZNÁMKA. Obrázek je nakreslen v měřítku pro jiskřiště s koulemi o poloměru 100 cm a doskok rovný poloměru koulí.

2.2.2 Vodorovné jiskřiště

Při vodorovném uspořádání koulí jsou jednotlivé rozměry klasického kulového jiskřiště vyobrazeny na *obr.2.2*, přičemž jsou shodné pro obě strany jiskřiště. Díky koulím jsou vizuálně v jedné ose. [7]

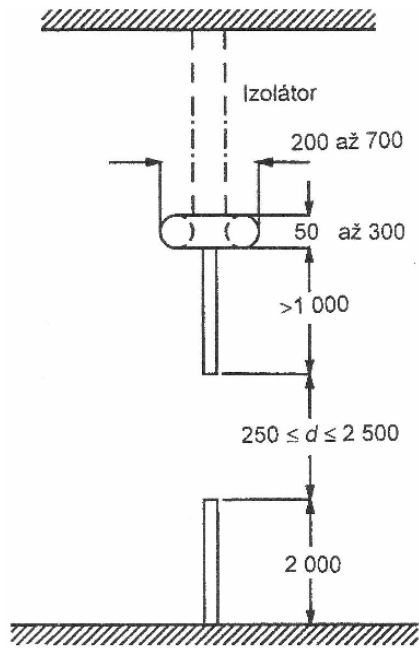


Obr. 2.2 Vodorovné kulové jiskřiště [7]

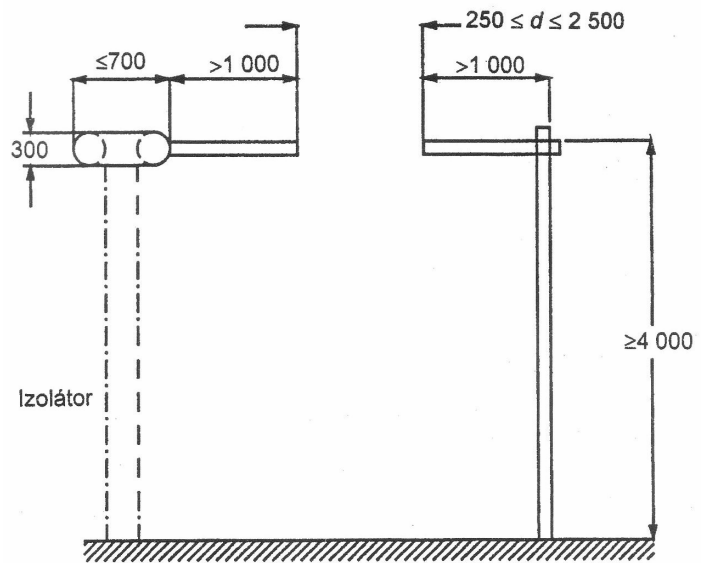
Legenda

- 1 Izolační držák
- 2 Dřík koule
- 3 Ovládací zařízení s maximálními rozměry
- 4 Přívod vysokého napětí se sériovým rezistorem

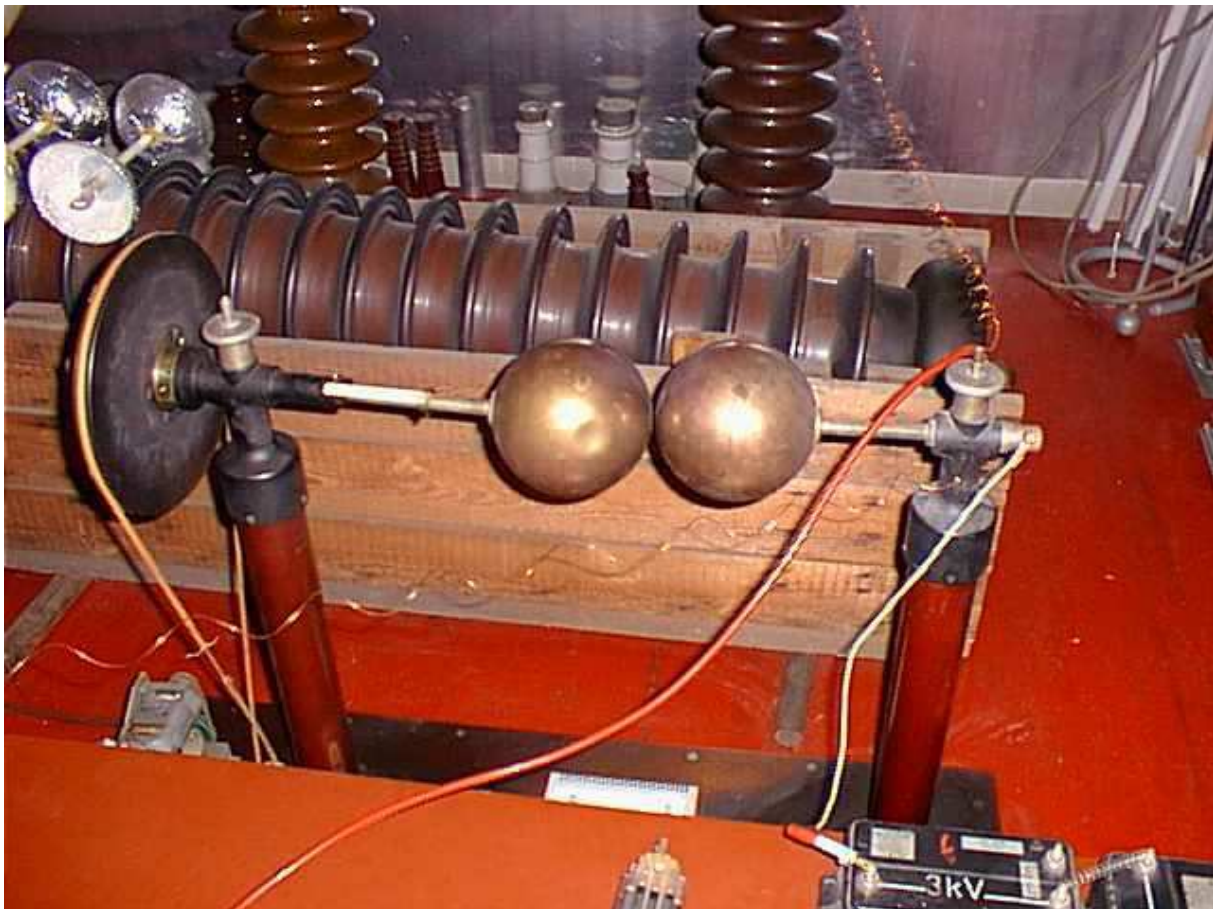
POZNÁMKA. Obrázek je nakreslen v měřítku pro jiskřiště s koulemi o průměru 25 cm a doskok rovný poloměru koulí.



Obr. 2.3 Svislé uspořádání jiskřiště tyč-tyč (Rozměry v milimetrech) [1]



Obr. 2.4 Vodorovné uspořádání jiskřiště tyč-tyč (Rozměry v milimetrech) [1]



Obr.2.5 Vzduchové kulové jiskřiště [9]

2.2.3 Vzdálenost okolo koulí

V níže uvedené tabulce jsou uvedeny meze, v kterých musí ležet výška A bodu doskoku koule s vysokým napětím nad rovinou země. Bod doskoku koule s vysokým napětím nesmí být vzdálen k vnějšímu předmětu (tím se myslí např. strop nebo stěna), ale i nosné konstrukci koulí (pokud je zhotovena z vodivého materiálu), o méně než o hodnotu vzdálenosti B , která je uvedena v *tabulce 2.1*. Bez níže uvedené výjimky nemůže být vzdálenost B menší než $2 D$ bez ohledu na hodnotu S .

Touto výjimkou jsou nosné konstrukce koulí vyrobené z izolačního materiálu v případě, že mají povrchy suché a čisté a dále, že se koule využívají jen pro měření impulzního nebo střídavého napětí. Poté může být vzdálenost B mezi bodem doskoku koule s vysokým napětím a nosnou konstrukcí menší než je uvedeno v *tabulce 2.1*, avšak nesmí být menší než $1,6 D$. [1]

Tab. 2.1 Meze vzdáleností [1]

Průměr koule D cm	Minimální hodnota výšky A	Maximální hodnota výšky A	Minimální hodnota vzdálenosti B
až do 6,25	7 D	9 D	14 S
10-15	6 D	8 D	12 S
25	5 D	7 D	10 S
50	4 D	6 D	8 S
75	4 D	6 D	8 S
100	3,5 D	5 D	7 S
150	3 D	4 D	6 S
200	3 D	4 D	6 S

2.3 Připojení a uzemnění

Připojení kulového jiskřiště musí odpovídat požadavkům uvedeným v IEC 60060-2. Uzemnění se provádí tak, že je jedna z koulí spojena se zemí. Při zvláštních účelech bývá zapojen nízkoohmický bočník mezi koulí a zemí.

2.3.1 Vodič s vysokým napětím

Vodič s vysokým napětím spolu se sériovým rezistorem neuloženém v dřívku, musí být připojen na dřívku k bodu vzdáleném nejméně $2 D$ od bodu doskoku koule s vysokým napětím. [1]

2.3.2 Ochranný rezistor pro měření stejnosměrných a střídavých napětí

Provádějí se opatření kvůli možnému vzniku důlků na koulích a pro potlačení superponovaných oscilací, které mohou zapříčinit chybné přeskoky. Mezi tyto opatření patří zapojení rezistoru R o velikosti $0,1 \text{ M}\Omega$ až $1 \text{ M}\Omega$ do série s kulovým jiskřištěm. Toto rozmezí platí pro měření stejnosměrných a střídavých napětí o síťové frekvenci, neboť tyto velikosti rezistoru způsobí pouze zanedbatelný úbytek napětí. Umístění ochranného rezistoru by mělo být co nejblíže k dřívku koule a zároveň by tento rezistor měl být k němu připojen.

Sériový rezistor je velmi důležitý, protože omezuje účinky průvodních přechodových přepětí na funkci kulového jiskřiště. Pokud tyto předvýboje nevznikají ve zkušebním obvodu nebo ve zkoušeném předmětu, tak lze velikost rezistoru snížit až na hodnotu zabraňující vypalování koulí při přeskokcích.

2.3.3 Ochranný sériový rezistor pro měření impulzních napětí

U koulí o velkém průměru je vyžadována nutnost sériového rezistoru z důvodu vyloučení kmitů v obvodu kulového jiskřiště. Tyto kmity mohou zapříčinit zvednutí napětí mezi koulemi a také na zkoušeném předmětu. Dalším důvodem pro zapojení sériového rezistoru může být zmenšení strmosti poklesu napětí, což by mohlo způsobit nechtěné namáhání zkoušeného předmětu. Rezistor je v bezinduktivním provedení (dovolená maximální indukčnost je $30 \mu\text{H}$) a velikost jeho odporu nemá být větší než 500Ω .

2.4 Ozařování

Volné elektrony vyskytující se v prostoru mezi koulemi jiskřiště v okamžiku přiložení napětí úzce souvisí s přeskokovým napětím kulového jiskřiště. Nejsou-li splněny požadavky na směrodatnou odchylku, pak je nutno učinit opatření. [1, 7]

Kulové jiskřiště se vystaví přímému ozáření světlem z jiskřišť z impulzního generátoru nebo koróně při záporné polaritě použitého odděleného zdroje by mělo stačit. Ozařování je nutné pro měření s napětím menším než 50 kV pro všechny průměry koulí a pro měření s koulemi o průměru 12,5 cm a menším pro všechny tvary napětí.

Jako zvláštní zdroj ozařování jiskřiště se používá výbojka se rtuťovými parami v křemenné trubici, jež má spektrum umístěné hluboko v ultrafialovém pásmu (UVC). Výbojky se rtuťovými parami, jež mají spektrum v ultrafialové oblasti UVA nebo UVB, se nedoporučují z důvodu nedostatečného ozařování. Účinnost ozařování je závislá na parametrech dané výbojky a dále na vzdálenosti od jiskřiště. Dalším typem zvláštního zdroje ozařování jsou předvýboje ze zdroje stejnosměrné záporné koróny.

2.5 Měření napětí

Při měření napětí za použití kulového jiskřiště potřebujeme získat poměr napětí zkušebního obvodu a údajem na voltmetru ovládacího obvodu nebo maximálním napětím změřeným měřicím zařízením připojeným na nízkonapětovou stranu měřícího systému. Při měření doskoku kulového jiskřiště musí být použita metoda odpovídající konečné nejistotě měření napětí.

2.5.1 Měření maximální hodnoty střídavého napětí síťového kmitočtu

Abychom se vyhnuli přeskoku napětí při zapnutí zdroje, tak se nejprve přiloží napětí s malou amplitudou a poté se zvyšuje dostatečně pomalu, aby bylo možné při měření spolehlivě pomalu odečítat hodnoty z přístrojů v okamžiku přeskoku na jiskřišti. Je nutno zaznamenat nejméně deset hodnot za sebou jdoucích přeskokových napětí. Poté se vyhodnotí směrodatná odchylka z a střední hodnota, přičemž musí být velikost směrodatné odchylky menší než 1 % střední hodnoty. Časové rozestupy mezi jednotlivými měřeními by neměly být kratší než 30 s.

[1]

2.5.2 Měření maximální hodnoty napětí při plném atmosférickém a spínacím impulzu

Nejdříve musíme stanovit hodnotu 50 % přeskokového napětí a směrodatnou odchylku z . Platí, že hodnota směrodatné odchylky z nesmí být větší než 1 % pro napětí při plném atmosférickém impulzu a ne větší než 1,5 % pro napětí při spínacím impulzu. Musí se změřit nejméně 10 napěťových impulzů pro každou z pěti hladin. Časové rozestupy mezi jednotlivými měřeními nesmí být kratší než 30 s.

2.5.3 Měření stejnosměrných napětí

Kulová jiskřiště nejsou příliš vodná pro měření stejnosměrných napětí, což je zapříčiněno chybnou funkcí jiskřišť způsobenou vláknitými částicemi vyskytujícími se ve vzduchu, které vedou k chybným přeskokům při nízkých napětích. Proto se pro měření stejnosměrných napětí doporučuje spíše jiskřiště tyč-tyč.

Přeskoková napětí pro různé doskoky koulí jsou uvedeny v *tabulce 2.2* a *tabulce 2.3* pro normalizované atmosférické podmínky teploty a tlaku:

teplota $t_0 = 20\text{ °C}$;

tlak $p_0 = 101,3\text{ kPa}$.

Hodnoty v tabulkách 2.2 a 2.3 platí pro absolutní vlhkosti od 5 gm^{-3} do 12 gm^{-3} s průměrem $8,5\text{ gm}^{-3}$. V *tabulce 2.2* jsou vrcholové hodnoty přeskokových napětí (hodnoty U_{50} při zkouškách impulzy) v kV pro:

- *střídavá napětí při síťovém kmitočtu;*
- *napětí při plném atmosférickém a spínacím impulzu záporné polarity*
- *stejnosměrná napětí obou polarit.*

V *tabulce 2.3* jsou vrcholové hodnoty přeskokových napětí (hodnoty U_{50}) v kV pro:

- *napětí při plném atmosférickém a spínacím impulzu kladné polarity podle definice v IEC 60060-1.*

Tabulky 2.2 a 2.3 neplatí pro měření impulzních napětí pod 10 kV. [1]

Tab. 2.2 Vrcholové hodnoty přeskokových napětí (hodnoty U_{50} při zkouškách impulzy) v kV pro střídavá napětí síťového kmitočtu, napětí při plném atmosférickém a spínacím impulzu záporné polaritě a stejnosměrná napětí obou polarit [1]

Doskok kulového jiskřiště cm	Průměr koulí cm											
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200
0,05	2,8											
0,10	4,7											
0,15	6,4											
0,20	8,0	8,0										
0,25	9,6	9,6										
0,30	11,2	11,2										
0,40	14,4	14,3	14,2									
0,50	17,4	17,4	17,2	16,8	16,8	16,8						
0,60	20,4	20,4	20,2	19,9	19,9	19,9						
0,70	23,2	23,4	23,2	23,0	23,0	23,0						
0,80	25,8	26,3	26,2	26,0	26,0	26,0						
0,90	28,3	29,2	29,1	28,9	28,9	28,9						
1,0	30,7	32,0	31,9	31,7	31,7	31,7	31,7					
1,2	(35,1)	37,6	37,5	37,4	37,4	37,4	37,4					
1,4	(38,5)	42,9	42,9	42,9	42,9	42,9	42,9					
1,5	(40,0)	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5					
1,6		48,1	48,1	48,1	48,1	48,1	48,1					
1,8		53,0	53,5	53,5	53,5	53,5	53,5					
2,0		57,5	58,5	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0			
2,2		61,5	63,0	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5			
2,4		65,5	67,5	69,5	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0			
2,6		(69,0)	72,0	74,5	75,0	75,5	75,5	75,5	75,5			
2,8		(72,5)	76,0	79,5	80,0	80,5	81,0	81,0	81,0			
3,0		(75,5)	79,5	84,0	85,0	85,5	86,0	86,0	86,0	86,0		
3,5		(82,5)	(87,5)	95,0	97,0	98,0	99,0	99,0	99,0	99,0		
4,0		(88,5)	(95,0)	105	108	110	112	112	112	112		
4,5			(101)	115	119	122	125	125	125	125		
5,0			(107)	123	129	133	137	138	138	138	138	
5,5				(131)	138	143	149	151	151	151	151	
6,0				(138)	146	152	161	164	164	164	164	
6,5				(144)	(154)	161	173	177	177	177	177	
7,0				(150)	(161)	169	184	189	190	190	190	
7,5				(155)	(168)	177	195	202	203	203	203	
8,0					(174)	(185)	206	214	215	215	215	
9,0					(185)	(198)	226	239	240	241	241	
10					(195)	(209)	244	263	265	266	266	266
11						(219)	261	286	290	292	292	292

Doskok kulového jiskřiště cm	Průměr koulí cm											
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200
12						(229)	275	309	315	318	318	318
13							(289)	331	339	342	342	342
14							(302)	353	363	366	366	366
15							(314)	373	387	390	390	390
16							(326)	392	410	414	414	414
17							(337)	411	432	438	438	438
18							(347)	429	453	462	462	462
19							(357)	445	473	486	486	486
20							(366)	460	492	510	510	510
22								489	530	555	560	560
24								515	565	595	610	610
26								(540)	600	635	655	660
28								(565)	635	675	700	705
30								(585)	665	710	745	750
32								(605)	695	745	790	795
34								(625)	725	780	835	840
36								(640)	750	815	875	885
38								(655)	(775)	845	915	930
40								(670)	(800)	875	955	975
45									(850)	945	1 050	1 080
50									(895)	1 010	1 130	1 180
55									(935)	(1 060)	1 210	1 260
60									(970)	(1 110)	1 280	1 340
65										(1 160)	1 340	1 410
70										(1 200)	1 390	1 480
75										(1 230)	1 440	1 540
80											(1 490)	1 600
85											(1 540)	1 660
90											(1 580)	1 720
100											(1 660)	1 840
110											(1 730)	(1 940)
120											(1 800)	(2 020)
130												(2 100)
140												(2 180)
150												(2 250)

POZNÁMKA 1 Hodnoty neplatí pro impulzní napětí pod 10 kV.

POZNÁMKA 2 Údaje v závorkách, které jsou uvedeny pro doskoky větší než 0,5 D, mají nejistotu větší.

Tab. 2.3 Vrcholové hodnoty přeskokových napětí (hodnoty U_{50} při zkouškách impulzy) v kV pro napětí při plném atmosférickém a spínacím impulzu kladné polarity [1]

Doskok kulového jiskřiště cm	Průměr koulí cm											
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200
0,05												
0,10												
0,15												
0,20												
0,25												
0,30	11,2	11,2										
0,40	14,4	14,3	14,2									
0,50	17,4	17,4	17,2	16,8	16,8	16,8						
0,60	20,4	20,4	20,2	19,9	19,9	19,9						
0,70	23,2	23,4	23,2	23,0	23,0	23,0						
0,80	25,8	26,3	26,2	26,0	26,0	26,0						
0,90	28,3	29,2	29,1	28,9	28,9	28,9						
1,0	30,7	32,0	31,9	31,7	31,7	31,7	31,7					
1,2	(35,1)	37,8	37,6	37,4	37,4	37,4	37,4					
1,4	(38,5)	43,3	43,2	42,9	42,9	42,9	42,9					
1,5	(40,0)	46,2	45,9	45,5	45,5	45,5	45,5					
1,6		49,0	48,6	48,1	48,1	48,1	48,1					
1,8		54,5	54,0	53,5	53,5	53,5	53,5					
2,0		59,5	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0			
2,2		64,0	64,0	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5			
2,4		69,0	69,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0			
2,6		(73,0)	73,5	75,5	75,5	75,5	75,5	75,5	75,5			
2,8		(77,0)	78,0	80,5	80,5	80,5	81,0	81,0	81,0			
3,0		(81,0)	82,05	85,5	85,5	85,5	86,0	86,0	86,0	86,0		
3,5		(90,0)	(91,5)	97,5	98,0	98,5	99,0	99,0	99,0	99,0		
4,0		(97,5)	(101)	109	110	111	112	112	112	112		
4,5			(108)	120	122	124	125	125	125	125		
5,0			(115)	130	134	136	138	138	138	138	138	
5,5				(139)	145	147	151	151	151	151	151	
6,0				(148)	155	158	163	164	164	164	164	
6,5				(156)	(164)	168	175	177	177	177	177	
7,0				(163)	(173)	178	187	189	190	190	190	
7,5				(170)	(181)	187	199	202	203	203	203	
8,0					(189)	(196)	211	214	215	215	215	
9,0					(203)	(212)	233	239	240	241	241	
10					(215)	(226)	254	263	265	266	266	266
11						(238)	273	287	290	292	292	292

Doskok kulového jiskřiště cm	Průměr koulí cm											
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100	150	200
12						(249)	291	311	315	318	318	318
13							(308)	334	339	342	342	342
14							(323)	357	363	366	366	366
15							(337)	380	387	390	390	390
16							(350)	402	411	414	414	414
17							(362)	422	435	438	438	438
18							(374)	442	458	462	462	462
19							(385)	461	482	486	486	486
20							(395)	480	505	510	510	510
22								510	545	555	560	560
24								540	585	600	610	610
26								570	620	645	655	660
28								(595)	660	685	700	705
30								(620)	695	725	745	750
32								(640)	725	760	790	795
34								(660)	755	795	835	840
36								(680)	785	830	880	885
38								(700)	(810)	865	925	935
40								(715)	(835)	900	965	980
45									(890)	980	1 060	1 090
50									(940)	1 040	1 150	1 190
55									(985)	(1 100)	1 240	1 290
60									(1 020)	(1 150)	1 310	1 380
65										(1 200)	1 380	1 470
70										(1 240)	1 430	1 550
75										P 280)	1 480	1 620
80											(1 530)	1 690
85											(1 580)	1 760
90											(1 630)	1 820
100											(1 720)	1 930
110											(1 790)	(2 030)
120											(1 860)	(2 120)
130												(2 200)
140												(2 280)
150												(2 350)

POZNÁMKA Údaje v závorkách, které jsou uvedeny pro doskoky větší než 0,5 D, mají nejistotu větší.

2.6 Normalizované jiskřiště tyč-tyč pro měření stejnosměrného napětí

2.6.1 Konečné uspořádání jiskřiště tyč-tyč

Tento typ uspořádání jiskřiště tyč-tyč musí být stejný jako na obrázku 2.1 (svislé jiskřiště) nebo obrázku 2.2 (vodorovné jiskřiště). Tyče musí být vyrobeny z oceli anebo mosazi s plným čtvercovým průřezem se stranami 10 mm až 25 mm se společnou osu. Vzdálenost konce tyče o vysokém napětí nesmí být menší nežli 5 m.

2.7 Použití normalizovaných vzduchových jiskřišť pro kontrolu funkčnosti schválených měřících systémů

Při použití normalizovaného vzduchového jiskřiště pro kontrolu funkčnosti měřícího systému s funkcí odpovídající požadavkům na schválený měřící systém platí, že každá z obou součástí kontrolního obvodu má nejistotu 3 %. Je možnost vzniku rozdílů převyšujících tento údaj při následném srovnání. [1]

3 Přístroje a metody vhodné pro měření VN

Velmi důležitým prvkem je přesnost měření. Musí se zajistit, aby zkušební obvod příliš mnoho nezatěžoval zdroj napětí nebo neovlivňoval měřenou veličinu. Elektromontéra zajímají maximální, efektivní a střední hodnoty napětí stejnosměrného, střídavého a impulsního, ale i celkový časový průběh měřené veličiny. Z tohoto důvodu jsou v praxi využívány nejrůznější principy měření.

Hlavním prvkem pro měření maximálních hodnot napětí je měřicí kulové jiskřiště, o němž nalezneme informace v předchozí kapitole. Pokud budeme měřit menší hodnoty stejnosměrného a střídavého napětí, tak nám dobře poslouží elektrostatické voltmetry, pokud větší, tak předřadné impedance a děliče napětí spolu s měřícím nebo zobrazovacím přístrojem. Zástupce měřícího přístroje může být např. elektrostatický voltmetr, vrcholový voltmetr atd. Do skupiny zobrazovacích přístrojů patří např. digitální osciloskop. K měření impulsních napětí a proudů jsou zobrazovací přístroje velmi užitečné. [7]

3.1 Měření napětí VVN a ZVN

Hodnotu velmi vysokých a zvláště vysokých napětí můžeme měřit vzduchovými jiskřišti. 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. [9, 7]

$$E_p = \frac{U_p}{d} \text{ (kV/cm, kV, cm)} \quad (3.1)$$

E_p ... elektrická pevnost

U_p ... průrazné napětí

d vzdálenost mezi elektrodami



Obr. 3.1 Kulové jiskřiště [8]

Tab. 3.1 Přehled nejčastěji používaných metod měření vysokých napětí a velkých proudů [7]

Metoda	Napětí						Impulsní proud I=I(t)	
	DC	AC			Impulsní			
	U	U _{ef}	U _{max}	U=U(t)	U _{max}	U=U(t)		
Kulové jiskřiště	X ¹⁾			X				
Elektrostatický voltmetr	X ²⁾	X						
Měřicí transformátor		o						o
μA-metr s předřadníkem	X ²⁾	o						
vrcholový voltmetr				X				
C dělič + elektrostat. voltmetr		X						
+ vrchol. voltmetr				X		o		
+ oscilograf					X		X	
R dělič + el.stat. voltmetr	X ²⁾	o						
+ vrchol. voltmetr				o		X		
+ oscilograf					o		X	
Rotační voltmetr	X ¹⁾			o	o			
R bočník + oscilograf								X

POZNÁMKA **X** - používá se více, o - používá se méně často, ¹⁾ U_{max}, ²⁾ U_{ef}

3.2 Měření pomocí kulového jiskřiště

Jiskřiště slouží k měření napětí či cejchování přístrojů a zařízení měřících napětí.

Jiskřištěm se měří tato napětí:

- vrcholová hodnota střídavého napětí,
- vrcholová hodnota impulsního napětí,
- nejvyšší hodnota stejnosměrného napětí.

3.3 Děliče napětí

Děliče napětí patří do skupiny vysokonapěťové techniky. Jejich funkcí je snížení napětí libovolného vysokonapěťového zdroje kvůli měření jeho napětí na požadovanou úroveň. Uplatnění najdou tam, kde nestačí elektrostatické nebo vrcholové voltmetry (pro hodnoty napětí přes 300 kV). Další možnost použití je pro rozšíření měřícího rozsahu různých elektronických přístrojů (voltmetrů, osciloskopů atd.). Jedná se o měření velmi vysokých napětí v řádu několika jednotek MV nebo stovek kV. Avšak platí skutečnost, že na vstup měřícího přístroje je možno přivádět pouze setiny nebo tisíce kV.

Mezi nároky kladené na děliče napětí patří dva základní požadavky:

- Po 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 totiž, že dělič má být frekvenčně nezávislý. Napětí různých frekvencí má tudíž být zmenšeno ve stejném poměru.

Rozeznáváme tyto druhy napěťových děličů:

- 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, 7]

4. Návrh děliče napětí pro měření VN

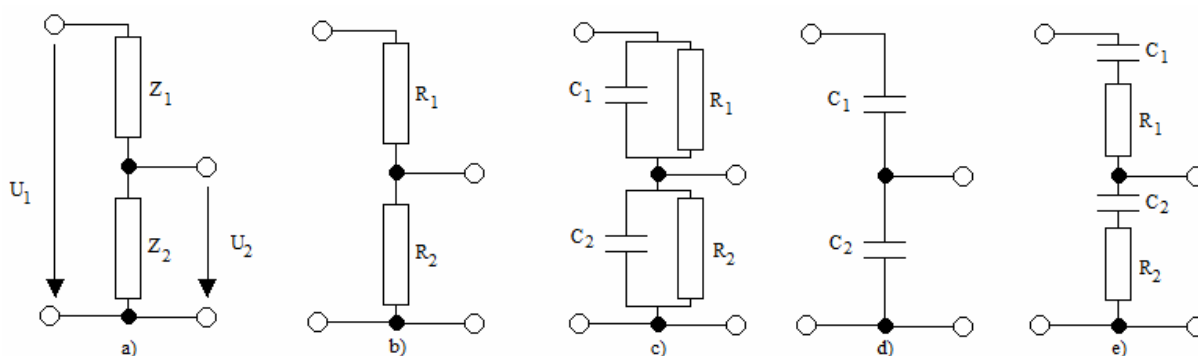
Napěťový dělič je složen ze dvou hlavních částí - vysokonapěťové a nízkonapěťové, které se skládají z rezistorů nebo kondenzátorů, popřípadě kombinací obou.

Napětí na vstupu je přiloženo na celém zařízení. Výstupní napětí je snímáno z části s nízkým napětím. Uplatňuje se zde vztah pro konstantu převodního zařízení. Tento vztah říká, že napětí na výstupu děliče souvisí s napětím vstupním. Touto konstantou se násobí výstupní hodnota kvůli získání hodnoty vstupní. Obecné schéma napěťového děliče je vyobrazeno na obrázku 4.1a. Konstanta je definována následujícím poměrem napětí a následně impedancí:

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2}, \quad (4.1)$$

přičemž Z_1 je impedance VN části a Z_2 impedance NN části děliče. [3]

Na níže uvedeném obrázku je znázorněno několik zapojení napěťových děličů. Existuje schéma složené pouze z rezistorů (obr. 4.1b), kondenzátorů (obr. 4.1c), paralelní kombinací rezistoru a kondenzátoru (obr. 4.1 d), která dosahuje vyšší šířky pásma oproti odporovému děliči atd. Kvůli omezení vzniku oscilací se využívá sériová kombinace rezistoru s kondenzátorem (obr. 4.1 e). [3, 2]



Závěr

V této diplomové práci byly popsány základní informace o měření vysokého napětí a technologických postupech. Nebylo zapomenuto ani na bezpečnost práce. Dále se v této práci nachází rozdělení měřících metod vysokého napětí. Jedna z kapitol byla detailněji zaměřena na princip kulového jiskřiště a jeho konstrukce včetně podmínek při měření. Tato metoda patří do skupiny přímých měření a je proveditelná pouze v laboratoři vysokého napětí.

Poslední část diplomové práce se zabývá děličem napětí a jeho teoretickým návrhem. Děliče napětí mohou být buď odporové, kapacitní nebo kombinace obou. Každý z těchto druhů se ale hodí pro různé podmínky měření. Záleží na dané situaci. Měření nepřímou metodou při použití odporového nebo kapacitního děliče lze realizovat jak v laboratoři, tak i mimo ni.

Použitá literatura

- [1] Měření napětí pomocí normalizovaných vzduchových jiskřišť, ČSN EN 60052, (česká verze evropské normy EN 60052:2002).
- [2] Technika zkoušek vysokým napětím - Část 2 Měřicí systémy, ČSN EN 60060-2, (česká verze evropské normy EN 60060-2:2011).
- [3] PRŮCHA, S.: *Návrh vysokonapětového děliče pro měření přepětových jevů*. Diplomová práce, ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI, Fakulta elektrotechnická.
- [4] Hrdinové pod vysokým napětím [online].
[cit. 2011-12-15]. Dostupný z WWW:
<<http://infinity.elfkam.net/index.php?dir=clanky&file=podnapetim&cr=0>>.
- [5] High voltage [online].
[cit. 2012-04-20]. Dostupný z WWW:
<http://translate.google.cz/translate?hl=cs&sl=en&u=http://en.wikipedia.org/wiki/High_voltage&ei=hLK4T7iJOIjK0QW9zr3kBw&sa=X&oi=translate&ct=result&resnum=1&ved=0CFkQ7gEwAA&prev=/search%3Fq%3Dhttp://en.wikipedia.org/wiki/High_Voltage%26hl%3Dcs%26biw%3D1920%26bih%3D1057%26prmd%3Dimvns>.
- [6] Přímé a nepřímé metody měření el. napětí, proudu a odporu [online].
[cit. 2012-02-16]. Dostupný z WWW:
<home.zcu.cz/~jvarga/TVN/17.Prime_a_neprime_metody_mereni.doc>.
- [7] BLAŽEK, V., SKALA, P.: *Skripta Vysoké napětí část I. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ* [online].
[cit. 2012-01-08]. Dostupný z WWW:
<<http://www.unium.cz/materialy/vut/fekt/skripta-vysoke-napeti-cast-i-m10824-p1.html>>.
- [8] Kulové jiskřiště [online].
[cit. 2012-03-25]. Dostupný z WWW:
<http://www.fel.zcu.cz/infoakce/dod_2007.aspx?pglang=en>.

- [9] Elektrická měření [online].
[cit. 2012-03-28]. Dostupný z WWW:
http://www2.outech-havirov.cz/skola/files/knihovna_eltech/me/me_vyb_kap_pe.pdf>.