

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

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Měřicí systémy pro zkoušky vysokým napětím

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Filip KOTÁB**
Osobní číslo: **E15N0105P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Měřicí systémy pro zkoušky vysokým napětím**
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. Zabývejte se obecně principy měření vysokého napětí.
2. Zpracujte přehled měřících systémů vn s ohledem na typ měřeného napětí a požadované vlastnosti.
3. Zpracujte postupy pro kvalifikaci a použití měřících systémů v souladu s ČSN EN 60060-2 a aplikujte je pro měřicí systém vn zkušební laboratoře.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

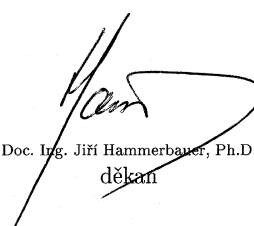
Seznam odborné literatury:

1. ČSN EN 60060-1
2. ČSN EN 60060-2
3. ČSN EN 60060-3
4. ČSN EN 60052

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Eva Müllerová, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2016**

Termín odevzdání diplomové práce: **19. května 2017**


Doc. Ing. Jiri Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

Abstrakt

Předkládaná práce je zaměřena na princip měřicích systémů pro zkoušky vysokým napětím. V práci je zahrnut popis měření vysokého napětí pomocí různých měřicích systémů. Dále se v práci objevují konkrétní měřicí techniky pro měření jednotlivých druhů napětí, tj. stejnosměrného, střídavého a impulzního. Vysvětlen je také princip napěťových děličů včetně jejich dynamického chování, na které je práce z velké části zaměřena. V poslední části je zpracována simulace pro odezvu napěťového děliče na jednotkový skok.

Klíčová slova

Kulové jiskřiště, stejnosměrné napětí, střídavé napětí, impulzní napětí, kalibrace, přiřazená konstanta, napěťový dělič, jednotkový skok, měřicí nejistota

Abstract

This thesis is focused on the principle of measuring systems for high voltage tests. There is description of the measuring high voltage by different measuring systems. In the next step are showed measuring techniques for individual types of voltage, DC voltage, AC voltage and LI voltage. There is an explanation of voltage dividers including their dynamic behavior, which is this thesis focused on with large part. In the last part is simulation of response voltage divider to step voltage.

Key words

Spark gaps, DC voltage, AC voltage, LI voltage, calibration, assigned constant, voltage divider, step voltage, measuring uncertainty

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 16.5.2017

Filip Kotáb

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí práce paní Doc. Ing. Evě Müllerové Ph.D. za pomoc a ochotu při řešení problémů vypracování této práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 TERMÍNY A DEFINICE PRO MĚŘENÍ VYSOKÉHO NAPĚTÍ	12
1.1 MĚŘICÍ SYSTÉMY	12
1.1.1 Měřicí systém.....	12
1.1.2 Zápis o vlastnostech.....	12
1.1.3 Osvědčený měřicí systém	12
1.1.4 Referenční měřicí systém	13
1.2 SOUČÁSTI MĚŘICÍHO SYSTÉMU.....	13
1.2.1 Převodní zařízení	13
1.2.2 Napěťový dělič.....	13
1.2.3 Napěťový transformátor	13
1.2.4 Převodní impedance napětí	13
1.2.5 Sonda pro elektrické pole	13
1.2.6 Přenosový systém.....	14
1.2.7 Měřicí přístroj	14
1.3 KONSTANTY	14
1.3.1 Konstanta měřicího systému.....	14
1.3.2 Konstanta převodního zařízení	14
1.3.3 Konstanta přenosového systému.....	14
1.3.4 Konstanta měřicího přístroje.....	14
1.3.5 Přiřazená konstanta.....	15
1.4 JMENOVITÉ HODNOTY.....	15
1.4.1 Provozní podmínky	15
1.4.2 Jmenovité provozní napětí	15
1.4.3 Přiřazený rozsah měření.....	15
1.4.4 Přiřazená provozní doba	15
1.4.5 Přiřazená četnost přiložení.....	15
1.5 DEFINICE VZTAHUJÍCÍ SE K DYNAMICKÉHO CHOVÁNÍ	16
1.5.1 Odezva měřicího systému	16
1.5.2 Amplitudově-kmitočtová odezva	16
1.5.3 Odezva na skok.....	16
1.5.4 Mezní kmitočty.....	16
1.6 DEFINICE VZTAHUJÍCÍ SE K NEJISTOTĚ	17
1.6.1 Tolerance	17
1.6.2 Chyba.....	17
1.6.3 Nejistota měření.....	17
1.7 DEFINICE VZTAHUJÍCÍ SE KE ZKOUŠKÁM MĚŘICÍCH SYSTÉMŮ	17
1.7.1 Kalibrace	17
1.7.2 Typová zkouška.....	17
1.7.3 Výrobní kusová zkouška.....	18
1.7.4 Provozní zkouška	18
1.8 PŘÍMÉ MĚŘICÍ METODY	18
1.9 NEPŘÍMÉ MĚŘICÍ METODY.....	18
2 KULOVÉ JISKŘIŠTĚ PRO MĚŘENÍ VYSOKÉHO NAPĚTÍ	19
2.1 SVISLÉ KULOVÉ JISKŘIŠTĚ	19
2.2 VODOROVNÉ KULOVÉ JISKŘIŠTĚ	20

3	MĚŘENÍ JEDNOTLIVÝCH TYPŮ VYSOKÉHO NAPĚTÍ.....	20
3.1	MĚŘENÍ STEJNOSMĚRNÉHO NAPĚTÍ	20
3.1.1	<i>Napětové děliče pro měření stejnosměrných napětí</i>	<i>21</i>
3.1.2	<i>Požadavek na převodní zařízení</i>	<i>21</i>
3.1.3	<i>Dynamické chování při měření změn napětí.....</i>	<i>23</i>
3.2	MĚŘENÍ STŘÍDAVÉHO NAPĚTÍ.....	24
3.2.1	<i>Všeobecně.....</i>	<i>24</i>
3.2.2	<i>Dynamické chování.....</i>	<i>24</i>
3.2.3	<i>Měření střídavého napětí pomocí testovacího transformátoru.....</i>	<i>27</i>
3.2.4	<i>Napětové děliče pro měření střídavého napětí</i>	<i>29</i>
3.3	MĚŘENÍ ATMOSFÉRICKÉHO IMPULZNÍHO NAPĚTÍ A SPÍNACÍHO IMPULZNÍHO NAPĚTÍ	36
3.3.1	<i>Dynamické chování napětových děličů</i>	<i>36</i>
3.3.2	<i>Odezva na jednotkový skok.....</i>	<i>36</i>
3.3.2.1	<i>Referenční úroveň (I_R)</i>	<i>36</i>
3.3.2.2	<i>Počátek odezvy na skok (O_1).....</i>	<i>37</i>
3.3.2.3	<i>Jednotková odezva na skok ($g(t)$).....</i>	<i>37</i>
3.3.2.4	<i>Experimentální doba odezvy.....</i>	<i>37</i>
3.3.2.5	<i>Dílčí doba odezvy (T_a).....</i>	<i>37</i>
3.3.2.6	<i>Zbytková doba odezvy ($T_R(t_i)$).....</i>	<i>38</i>
3.3.2.7	<i>Překmit normalizované jednotkové odezvy na skok (β_{rs}).....</i>	<i>38</i>
3.3.2.8	<i>Čas ustálení (t_s)</i>	<i>38</i>
3.3.3	<i>Obvody pro odezvu na jednotkový skok.....</i>	<i>39</i>
3.3.4	<i>Návrh napětového děliče</i>	<i>45</i>
3.3.5	<i>Odporové napětové děliče</i>	<i>45</i>
3.3.6	<i>Tlumené kapacitní děliče</i>	<i>48</i>
4	SIMULACE ODEZVY NA JEDNOTKOVÝ SKOK PRO IMPULZNÍ NAPĚTÍ.....	52
4.1	RC DĚLIČ PRO MĚŘENÍ ODEZVY NA JEDNOTKOVÝ SKOK	52
4.1.1	<i>Reálný RC dělič</i>	<i>53</i>
4.1.2	<i>Parametry konkrétního obvodu napětového děliče</i>	<i>53</i>
4.1.3	<i>Vypočítané a naměřené hodnoty.....</i>	<i>54</i>
4.2	TLUMENÝ KAPACITNÍ DĚLIČ PRO MĚŘENÍ ODEZVY NA JEDNOTKOVÝ SKOK.....	54
4.2.1	<i>Reálný tlumený kapacitní dělič</i>	<i>55</i>
4.2.2	<i>Parametry reálného tlumeného kapacitního děliče</i>	<i>56</i>
4.2.3	<i>Vypočítané a naměřené hodnoty.....</i>	<i>56</i>
	ZÁVĚR.....	58
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	59

Úvod

Práce se zabývá problematikou měřicích systémů pro zkoušky vysokým napětím, jejich popisem a předpoklady k jejich úspěšnému provedení. V práci je také řešena obecná problematika měření vysokého napětí, zejména přímou a nepřímou metodou. Dále jsou v práci zmíněny měřicí systémy, jako je například kulové jiskřiště, vrcholový voltmetr nebo testovací transformátor pro měření střídavého napětí. Hlavní náplní této práce jsou nepřímé měřicí metody, konkrétně problematika napěťových děličů a jejich dynamické chování. Nejdůležitějším předpisem pro provádění napěťových zkoušek je norma 60060-2, ve které jsou stanoveny přesné limity, které nelze překročit. Pokud některý z naměřených parametrů technické normě nevyhoví, nesmí se testovaný prvek použít v praxi.

Pro měření zkoušek vysokým napětím si vždy musíme stanovit, co chceme danou zkouškou ověřit a pro jaký typ napětí bude testované zařízení určeno. Principy testování na jednotlivých druzích napětí jsou rozdílné. Nicméně nejčastější nepřímou měřicí metodou vysokého napětí jsou právě napěťové děliče, na které je v této práci kladen zvláštní důraz. Nejen že je zde popsán princip a samotné fungování napěťových děličů, ale také je zde uveden návrh, jak by měl být daný napěťový dělič navržen. Důležitou částí je testování dynamického chování napěťových děličů a to konkrétně odezva napěťových děličů na jednotkový skok.

Práce je rozdělena do čtyř částí; první se zabývá teoretickými pojmy, které jsou používány v technice vysokého napětí. Druhá část představuje stručný úvod do měření kulovým jiskřištěm. Třetí část se zabývá měřením jednotlivých druhů napětí, tj. stejnosměrné, střídavé a impulzní. V této části je popsáno chování napěťových děličů, které jsou v současné době nejvíce používané. Ve čtvrté části je zpracována simulace odezvy napěťového děliče na jednotkový skok v programu DYNAST.

Seznam symbolů a zkratek

AC.....	Střídavé napětí/proud
DC.....	Stejnoseměrné napětí/proud
LI	Atmosférický impulz
SI.....	Spínací impulz
U	Napětí [V]
I.....	Proud [A]
P.....	Výkon [W]
R	Odpor [Ω]
L.....	Indukčnost [H]
C	Kapacita [F]
O ₁	Počátek odezvy na skok
G (t)	Jednotková odezva na skok v čase
T (t).....	Integrál odezvy na skok v čase
T _N	Experimentální doba odezvy [s]
T _{α}	Dílčí doba odezvy [s]
T _R	Zbytková doba odezvy [s]
β_{rs}	Překmit normalizované jednotkové odezvy na skok
t _s	Čas ustálení [s]
RMS.....	Referenční měřicí systém
h	Výška děliče [m]
d	Průměr děliče [m]

1 Termíny a definice pro měření vysokého napětí

1.1 Měřicí systémy

1.1.1 Měřicí systém

Měřicí systém je kompletní soubor zařízení vhodný k měření vysokého napětí. Software používaný pro získávání nebo výpočet naměřených výsledků je také považován za součást měřicího systému. Měřicí systém obvykle sestává z následujících komponentů:

- *Převodního zařízení s vodiči pro připojení tohoto zařízení ke zkoušenému objektu nebo do obvodu a připojení k zemi*
- *Přenosového systému spojujícího výstupní svorky převodního zařízení s měřicími přístroji včetně jejich tlumicích, zakončovacích a přízpusobovacích impedancí nebo sítí*
- *Měřicího přístroje společně s daným připojením ke zdroji napájení. Měřicí systémy, které obsahují pouze některé z výše uvedených součástí nebo které jsou založeny na nekonvenčních principech, jsou přijatelné, pokud splňují požadavky na nejistotu*

Prostředí, ve kterém měřicí systém pracuje, jeho vzdálenosti k živým a uzemněným konstrukcím a výskyt elektrického nebo magnetického pole, může významně ovlivnit výsledek měření a jeho nejistotu [2].

1.1.2 Zápis o vlastnostech

Podrobný zápis vytvořený uživatelem, který popisuje měřicí systém a obsahuje důkazy, že požadavky dané normou jsou splněny. Tyto důkazy zahrnují výsledky počáteční provozní zkoušky a program a výsledky každé následující provozní zkoušky a provozní kontroly [2].

1.1.3 Osvědčený měřicí systém

Měřicí systém, který prokáže shodu s jedním nebo více soubory požadavků stanovených v normě [2].

1.1.4 Referenční měřicí systém

Měřicí systém s odpovídající návazností kalibrací na příslušné národní anebo mezinárodní etalony, který má zároveň dostatečnou přesnost a stabilitu pro použití při osvědčování jiných systémů prováděním současných porovnávacích měření s předepsanými typy tvaru vlny a rozsahu napětí. Referenční měřicí systém se může použít jako osvědčený měřicí systém, ale opačně to neplatí [2].

1.2 Součásti měřicího systému

1.2.1 Převodní zařízení

Zařízení pro převádění veličiny, která má být měřena, na veličinu kompatibilní s měřicím přístrojem [2].

1.2.2 Napěťový dělič

Převodní zařízení, které se skládá z vysokonapěťové a nízkonapěťové části, přičemž vstupní napětí se přikládá na celé zařízení a výstupní napětí se snímá z nízkonapěťové části. Prvky obou částí jsou obvykle rezistory nebo kondenzátory nebo jejich kombinace. Zařízení je určeno typem a uspořádáním těchto prvků [2].

1.2.3 Napěťový transformátor

Převodní zařízení sestávající z transformátoru, u kterého je, za normálních provozních podmínek, sekundární napětí úměrné primárnímu napětí a liší se od něho ve fázi o úhel, který se při vhodném způsobu zapojení blíží k nule [2].

1.2.4 Převodní impedance napětí

Převodní zařízení, které vede elektrický proud úměrný přiloženému napětí měřeného přístrojem pro měření proudu [2].

1.2.5 Sonda pro elektrické pole

Převodní zařízení pro měření amplitudy a tvaru vlny elektrického pole. Sonda pro elektrické pole může být použita pro měření tvaru vlny napětí, které vytváří pole za předpokladu, že měření není ovlivněno korónou nebo prostorovým nábojem [2].

1.2.6 Přenosový systém

Soubor zařízení, která přenáší výstupní signál převodního zařízení k měřicímu přístroji. Přenosový systém se obvykle skládá z koaxiálního kabelu se zakončovací impedancí, ale může obsahovat útlumové články, zesilovače, nebo jiné zařízení připojené mezi převodní zařízení a měřicí přístroj. Například optické spojení zahrnuje vysílač, optický kabel a přijímač a rovněž příslušné zesilovače. Přenosový systém může být částečně nebo úplně zahrnut v převodním zařízení nebo v měřicím přístroji [2].

1.2.7 Měřicí přístroj

Zařízení zajišťující měření, buď samostatné, nebo ve spojení s přidavnými zařízeními [2].

1.3 Konstanty

1.3.1 Konstanta měřicího systému

Konstanta, kterou se násobí hodnota odečtu měřicího přístroje, aby se získala hodnota vstupní veličiny celého měřicího systému. Měřicí systém může mít více konstant pro různé přiřazené rozsahy měření, například kmitočtové rozsahy nebo tvary vln. U měřicích systémů, které zobrazují hodnotu vstupní veličiny přímo, je jmenovitá konstanta měřicího systému rovna jedné [2].

1.3.2 Konstanta převodního zařízení

Konstanta, kterou se násobí výstup převodního zařízení, aby se získala jeho vstupní veličina. Konstanta převodního zařízení může být bezrozměrná (například dělicí poměr děliče) nebo může mít rozměr (například impedance převodního zařízení) [2].

1.3.3 Konstanta přenosového systému

Konstanta, kterou se násobí výstup přenosového systému, aby se získala jeho vstupní veličina [2].

1.3.4 Konstanta měřicího přístroje

Konstanta, kterou se násobí hodnota odečtu přístroje, aby se získala hodnota jeho vstupní veličiny [2].

1.3.5 Přiřazená konstanta

Konstanta měřicího systému stanovená při poslední provozní zkoušce. Měřicí systém může mít více než jednu přiřazenou konstantu. Může mít například několik rozsahů anebo jmenovitých časových pásem, každý s jinou konstantou [2].

1.4 Jmenovité hodnoty

1.4.1 Provozní podmínky

Stanovené rozsahy podmínek provozu měřicího systému při stanovených mezích nejistot [2].

1.4.2 Jmenovité provozní napětí

Maximální hladina napětí o stanoveném kmitočtu nebo tvaru vlny, pro který je měřicí systém navržen [2].

1.4.3 Přiřazený rozsah měření

Rozsah napětí stanoveného kmitočtu nebo tvaru vlny, při kterém může být měřicí systém použit, charakterizovaný jedinou konstantou. Meze přiřazeného rozsahu měření jsou vybrány uživatelem a ověřeny provozními zkouškami předepsanými v normě. Měřicí systém může mít více než jeden přiřazený měřicí rozsah s různými konstantami [2].

1.4.4 Přiřazená provozní doba

Nejdelší časový úsek, po který může být měřicí systém provozován při horní mezi přiřazeného rozsahu měření pro stejnosměrná nebo střídavá napětí [2].

1.4.5 Přiřazená četnost přiložení

Nejvyšší počet stanovených impulzů napětí pro daný časový interval, ve kterém může měřicí systém pracovat v horní mezi přiřazeného rozsahu měření. Obvykle je vyjádřen jako počet aplikací za minutu a časový interval v minutách nebo hodinách [2].

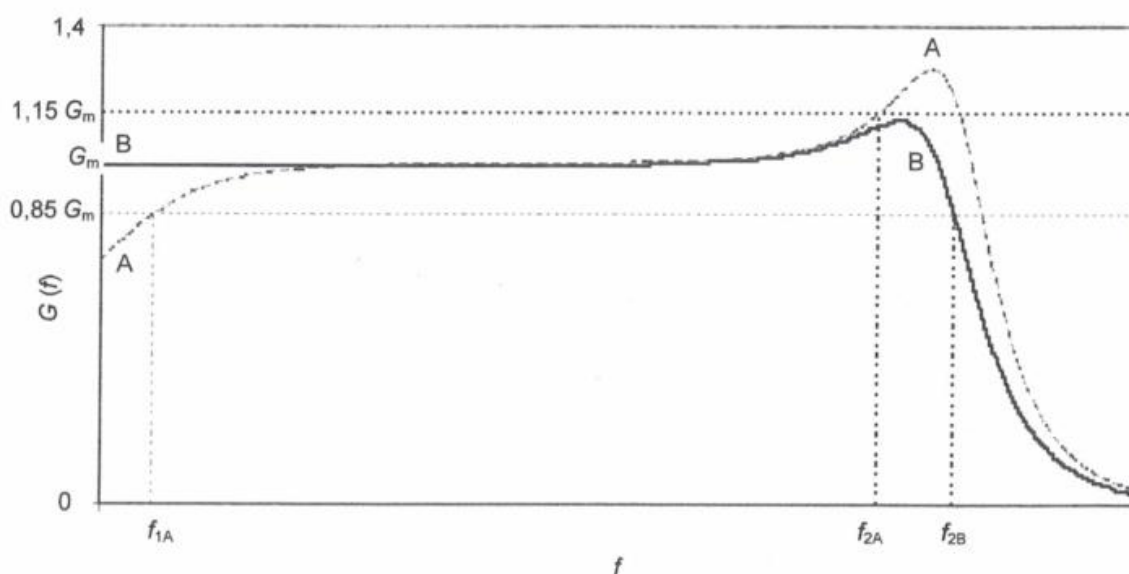
1.5 Definice vztahující se k dynamickému chování

1.5.1 Odezva měřicího systému

Výstup jako funkce času nebo kmitočtu, když se na vstup systému přiloží předepsané napětí [2].

1.5.2 Amplitudově-kmitočtová odezva

Poměr výstupu ke vstupu měřicího systému jako funkce kmitočtu f , když je vstup sinusový [2].



Obr. 1.1 Amplitudově-kmitočtová odezva [2]

Na Obr 1.1 je možno vidět dolní a horní meze kmitočtů, které jsou zobrazeny na křivce A. Křivka B ukazuje odezvu na stejnosměrné napětí [2].

1.5.3 Odezva na skok

Výstup měřicího systému jako funkce času, když se na vstup přivede skoková funkce [2].

1.5.4 Mezní kmitočty

Spodní a horní meze rozsahu, ve kterých je kmitočtová odezva téměř konstantní. Tyto meze jsou v místě, kde se odezva poprvé odchýlí o určitou hodnotu (například $\pm 15\%$) od

konstantní hodnoty. Dovolena odchylka by měla být vztažena k přípustným nejistotám měřicího systému [2].

1.6 Definice vztahující se k nejistotě

1.6.1 Tolerance

Povolený rozdíl mezi měřenou hodnotou a stanovenou hodnotou. Požadavkem je, aby měřené napětí spadalo do stanovené tolerance jeho předepsané zkušební hladiny [2].

1.6.2 Chyba

Hodnota měřené veličiny mínus hodnota referenční veličiny [2].

1.6.3 Nejistota měření

Parametr přidružený k výsledku měření, který charakterizuje rozptyl hodnot, které by mohly být důvodně přisuzovány k měřené veličině [2].

- *Nejistota je kladná a udávána bez znaménka*
- *Nejistota měření napětí by neměla být zaměňována s tolerancí předepsaného zkušebního napětí*

1.7 Definice vztahující se ke zkouškám měřicích systémů

1.7.1 Kalibrace

Soubor operací, jimiž se pomocí etalonů stanoví vztah, který za specifických podmínek existuje mezi údajem a výsledkem měření. Určení konstant je zahrnuto v kalibraci [2].

1.7.2 Typová zkouška

Zkouška shody provedená na jedné nebo více jednotkách reprezentujících výrobu. Pro měřicí systém je touto zkouškou rozuměna zkouška provedená na jedné části nebo na úplném měřicím systému za účelem stanovení jeho charakteristiky za provozních podmínek [2].

1.7.3 Výrobní kusová zkouška

Zkouška shody provedená na každém jednotlivém kusu během výroby nebo po vyrobení. Touto zkouškou je rozuměna zkouška provedená na každé části nebo na každém úplném měřicím systému za účelem stanovení jeho charakteristiky za provozních podmínek [2].

1.7.4 Provozní zkouška

Zkouška úplného měřicího systému za účelem stanovení jeho charakteristiky za provozních podmínek [2].

1.8 Přímé měřicí metody

Mezi přímé měřicí metody řadíme ty metody, kdy napětí měříme přímo, bez převodního zařízení. To znamená, že pro vyhodnocení veličiny nepoužíváme matematické vztahy jiných veličin k dosažení výsledku, ale měřenou veličinu změříme konkrétním měřicím zařízením. Mezi přímé měřicí metody můžeme zařadit kulové jiskřiště nebo elektrostatický voltmetr.

1.9 Nepřímé měřicí metody

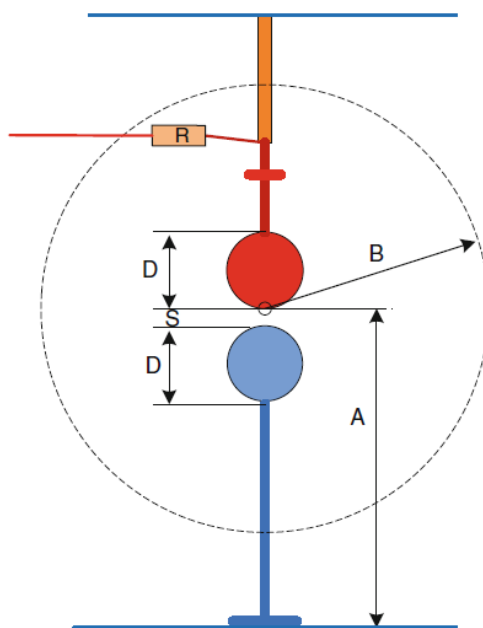
Mezi nepřímé měřicí metody řadíme ty metody, kde měřenou veličinu neodečítáme přímo z měřicího systému, ale výslednou hodnotu spočítáme přes vztah, kde dosazujeme veličiny jiné. Příkladem měření nepřímé měřicí metody může být například Ohmův zákon. Je to metoda, kde počítáme napětí jako součin odporu a proudu, takže používáme dvě rozdílné veličiny pro dosažení hledané veličiny. Nejčastější nepřímou měřicí metodou vysokého napětí je napěťový dělič.

2 Kulové jiskřiště pro měření vysokého napětí

Kulovým jiskřištěm jsme schopni měřit vrcholové hodnoty napětí. Kulové jiskřiště se skládá ze dvou stejně velkých koulí o průměru D , které mají mezi sebou vzduchovou mezeru. Hodnoty průměru D jsou dány normou a jsou jimi 2 – 5 – 6,25 – 10 – 12,5 – 15 – 25 – 50 – 100 – 150 – 200 cm. Žádaný povrch na obou koulích je hladký, bez jakýchkoliv nečistot, které by měly na měření významný vliv ve smyslu nepřesnosti měření. Zahřívání obou koulí by mělo být rozprostřeno co nejvíce rovnoměrně do prostoru. Na obou koulích jsou takzvané body doskoku. Ty musejí být čisté a suché. V případě větší vlhkosti vzduchu usazené na koulích může měření skončit nepřesně. Kulové jiskřiště buď měří napětí přímo a výsledkem je změřená hodnota v kV, nebo se může použít pro ověření, že se nezměnila přiřazená konstanta měřicího systému voltmetru připojeného k děliči, kde se porovnává údaj kulového jiskřiště z tabulek s údajem voltmetru. Pro přesné měření nesmí být měněn daný obvod, protože by se jinak změnil poměr. Jsou možné dva typy uspořádání kulových jiskřišť. První z nich je svislé uspořádání a druhý způsob je vodorovné uspořádání.

2.1 Svislé kulové jiskřiště

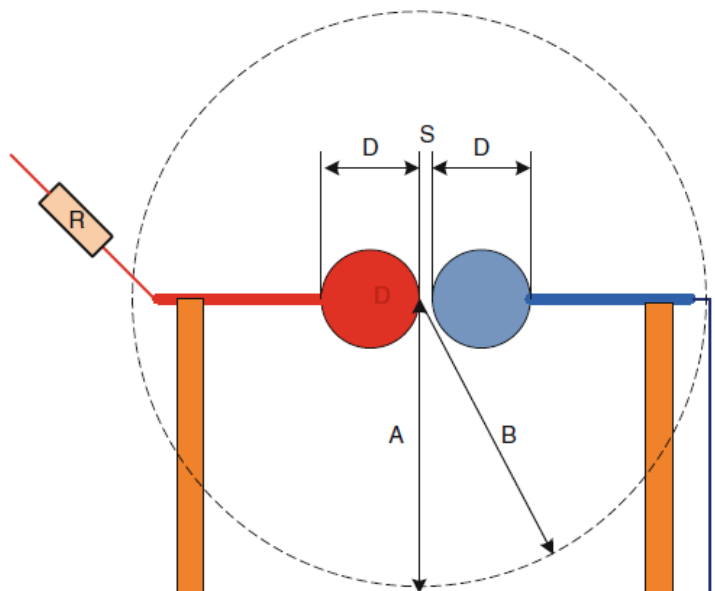
U svislého kulového jiskřiště jsou drůčky neboli úchyty koulí v jedné ose. Drůček s vyšším napětím je rozměrově větší z důvodu snížení vlivu na přeskové napětí. Drůček, který drží druhou kouli a je na části která je uzemněna je rozměrově menší.



Obr 1.2 Svislé kulové jiskřiště [1]

2.2 Vodorovné kulové jiskřiště

U vodorovného kulového jiskřiště jsou rozměry pro dřívky obou koulí stejné. Dřívky jsou taktéž ve stejné ose.



Obr 1.3 Vodorovné kulové jiskřiště [1]

3 Měření jednotlivých typů vysokého napětí

3.1 Měření stejnosměrného napětí

Pro měření stejnosměrného napětí sloužilo původně kulové jiskřiště. Kulové jiskřiště je normalizované zařízení IEC, které se dnes používá hlavně ke kalibraci a ověření přiřazené konstanty. Patří mezi přímé měřicí metody. Kulové jiskřiště lze také použít pro měření vrcholových hodnot ostatních druhů napětí pro VN zkoušky, jako AC (střídavé napětí), LI (atmosférický impuls) a SI (spínací impuls). Vzhledem k experimentálnímu vyhodnocení v čistých laboratorních podmínkách (Schumann 1923) byla měřicí nejistota okolo 3 % dosažitelná pro testy vysokým napětím v rozmezí mezi 20 a 2000 kV. Měřená hodnota průrazného napětí kulového jiskřiště nezávisí pouze na blízkých uzemněných předmětech, ale také závisí na čistotě a drsnosti povrchu elektrod. Dále také pak na vlhkosti a hustotě vzduchu. Měření pomocí kulového jiskřiště se nedoporučuje pro měření napětí nad 200 kV. Podle schválené verze dle normy IEC 60052:2002 je dokázáno, že stejnosměrné zkušební napětí může být měřeno za pomoci tyč-tyč. S přihlédnutím se zřetelem na korekční faktory pro vlhkost a hustotu vzduchu je měřicí nejistota 2 %

dosažitelná pro napětí v rozmezí mezi 20 a 1300 kV.

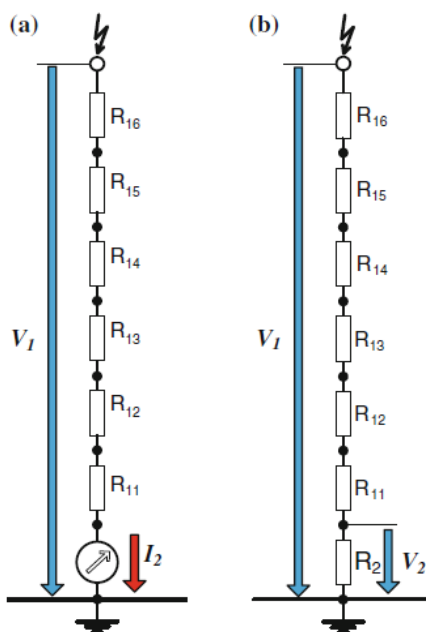
Hlavní nevýhoda kulového jiskřiště je nekontinuální měřicí procedura, která je extrémně časově náročná. Od roku 1920 bylo kulové jiskřiště nahrazeno kontinuální měřicí metodou, kterou je měření pomocí elektrostatického voltmetru [1].

3.1.1 Napěťové děliče pro měření stejnosměrných napětí

Měřicí systémy, které využívají vysoko-odporové převodní zařízení, byly představeny v roce 1930, kde vysoké napětí bylo zaznamenáno buď proudovými, nebo napěťovými měřiči. V dnešní době se pro měření stejnosměrného napětí využívají odporové napěťové děliče. Někdy se používají odporové děliče v paralelní kombinaci s kapacitními děliči. To proto, že tato kombinace je schopna zaznamenat časově závislé napětí, jako je zvlnění stejnosměrného napětí nebo změna polarity [1].

3.1.2 Požadavek na převodní zařízení

Důležitým parametrem odporového napěťového děliče pro stejnosměrné aplikace je proud, který by neměl být větší, než 0,5 mA. Je to z důvodu minimalizace měřicí nejistoty vzhledem k parazitním proudům, které by mohly být způsobeny zaprášeným prostředím na povrchu sloupce děliče, což může ovlivnit poměr děliče, zvláště pokud by byla vysoká vlhkost vzduchu. V tomto ohledu by mělo být zdůrazněno, že nabitě částice prachu jsou vždy přitahovány ve směru zvyšujícího se elektrického pole, což má za následek usazování nánosu prachu na povrchu sloupce děliče. Abychom snížili množství prachu a znečištění, odpor vysokonapěťové části by měl být co nejnižší. To není limitováno pouze dodatečnou zátěží přijatelnou pro vysokonapěťový test, ale také přípustnou operační teplotou, která se zvyšuje se ztrátovým výkonem na sloupci děliče [1].

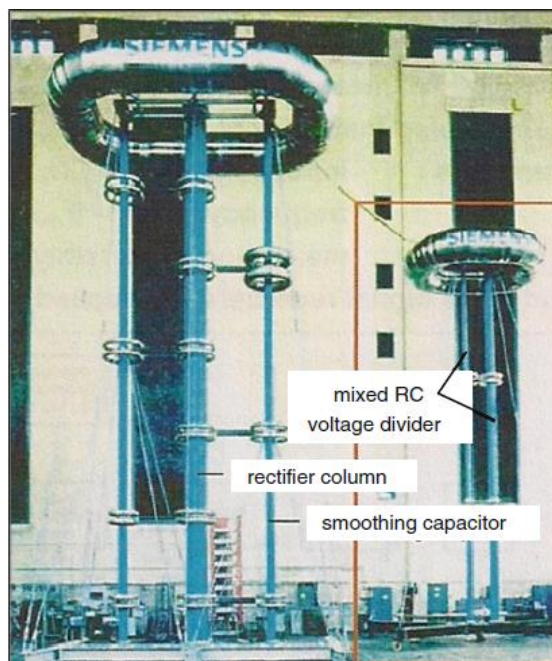


Obr. 1.4 Základní principy měření stejnosměrného napětí a proudu za pomoci ampérmetru nebo voltmetru [1]

Abychom předešli vysokému působení pole, umístí se vysokonapěťový rezistor ve tvaru spirály, která je navinuta na izolačním válci. Vysokonapěťová část je uspořádána z 2 M Ω rezistorů, kde jich je 300 spojeno do série. Dolní 2 M Ω rezistory zajišťují nízkonapěťovou část, takže je dělicí poměr 1:300. Stoupání spirály se mění, takže rozložení potenciálu podél spirály bývá srovnatelné s elektrostatickým polem, způsobeném horní elektrodou bez válce děliče. Rezistor je umístěn v olejem naplněném válci z důvodu lepšího přenosu ztrátového výkonu, což je pouze 150 W při jmenovitém napětí. Zapojení v tomto stylu snižuje dopad prachu a znečištění na napěťovém děliči.

Tento dělič, zmíněný výše, je od německého výrobce (PTB Braunschweig) a i přes jeho dosažené vynikající parametry nemůže být aplikován pro měření stejnosměrného napětí v průmyslových prostorech, ale pro referenční měření v kalibrovaných laboratořích. To proto, že v případě průrazu testovaného objektu může rychlé transienční napětí způsobit přetížení rezistorů vzhledem k porovnatelné vysoké vlastní indukčnosti. Ke zlepšení využití energie mohou být jako alternativa použity uhlíkové rezistory. Hlavní nedostatek takových rezistorů je vysoký teplotní koeficient, kdy může být zvýšena měřicí nejistota s rostoucí teplotou během doby testování. I přes to, že tento efekt může být minimalizován použitím dlouhodobého teplotního zatěžování, jsou takové podmínky extrémně časově náročné a aplikované použití se používá jen ve zvláštních případech. Nejlepší metodou, jak se vyhnout poškození odporových děličů z důvodu napěťových průrazů, je použití

odporově-kapacitního zapojení děliče [1].



Obr. 1.5 DC generátor a odporově kapacitní dělič navrhnut pro měření statického a dynamického napětí [1]

Optimální výkon je získán tak, že jsou kapacity umístěny na specifické body sloupu odporového děliče. Pravidlem je, že velikost kapacity odporově-kapacitního děliče by měla být řádově 200 pF. Navíc by měly být ochranné elektrody v porovnání s tak velkým povrchem aplikovány tak, aby nedošlo k zapálení částečných výbojů, což může ovlivnit poměr děliče [1].

3.1.3 Dynamické chování při měření změn napětí

Pro měření stejnosměrného napětí mohou být použity analogové nástroje, které jsou schopny měřit aritmetický průměr. Lepší metodou je ale použití osciloskopu nebo v dnešní době digitálního měřiče. To proto, že při skutečných testovacích podmínkách, ne pouze při statickém stejnosměrném napětí, ale také typické dynamické napětí, například vlnění nebo pokles napětí musí být měřeno jako parametry charakterizující změnu polarity. Požadavky schválené pro měření stejnosměrného napětí jsou uvedeny v normě IEC 60060-2: 2010. Aritmetický průměr musí být měřen s nejistotou $U_M \leq 3\%$, což odpovídá pokrytí 95%. Nejistota se řídí rozdělením pravděpodobnosti a to je pokrytí. K vyšetření dynamického chování měřicího systému slouží přivedení sinusového napětí na vstup. Změna frekvence mezi 0,5 – 7 krát velikosti základní frekvence vlnění f_r způsobí zvlnění okolo 3 dB. Již zadané limitující hodnoty nejistoty by neměly být překročeny v přítomnosti maximálního

vlnění, které je uvedené v normě IEC 60060-1. Velikost vlnění musí být měřeno s nejistotou $\leq 1\%$ z hodnoty aritmetického průměru testovaného stejnosměrného napětí nebo $\leq 10\%$ z velikosti vlnění.

K měření průměrné hodnoty stejnosměrného napětí a k velikosti vlnění mohou být použity buď jednotlivé měřicí systémy, nebo stejné převodní zařízení v zapojení dvou oddělených měřicích módů pro stejnosměrné a střídavé napětí. Přiřazená konstanta pro systém, který měří hodnotu vlnění, může být stanovena na základní frekvenci vlnění f_r s nejistotou $\leq 3\%$. Tato přiřazená konstanta může být také stanovena z ostatních faktorů zahrnutých komponent. Při měření napěťové a frekvenční odezvy měřicího systému vlnění v rozsahu frekvence mezi 0,5 – 5-ti násobek f_r by amplituda neměla být nižší než 85 % hodnoty vyskytující se na základní frekvenci vlnění f_r .

K měření testů zvyšujícího a snižujícího stejnosměrného napětí, stejně tak jako k měření vlnění či napěťového tvaru při změně polarity, by měla být charakteristická časová konstanta stejnosměrného měřicího systému $\leq 0,25$ s. V důsledku umělého znečištění, které je záměrné z důvodu testování přiblížit reálným provozním podmínkám, by měla být časová konstanta $\leq 1/3$ z rostoucího času. To je typické pro přechodové jevy, což může být například pokles napětí. Výsledky typových napěťových zkoušek stejnosměrného napětí mohou být zjištěny z testovacího protokolu výrobce, kde jsou běžné testy prováděny na každé z komponent, které jsou součástí měřicího systému. Provozní zkouška by měla zahrnovat vyhodnocení přiřazené konstanty při kalibraci, ale také chování při zvlnění napětí. Tento proces by měl být proveden každý rok, ale tato podmínka není zcela nutná. Když vše funguje bez problémů, stačí, když se kontrola provede alespoň jednou za pět let. Kontrola výkonu pokrývá kontrolu přiřazené konstanty a tato kontrola by podle doporučení měla být provedena také každý rok. Pokud je ale měřicí systém dlouhodobě stabilní, není to nutná podmínka [1].

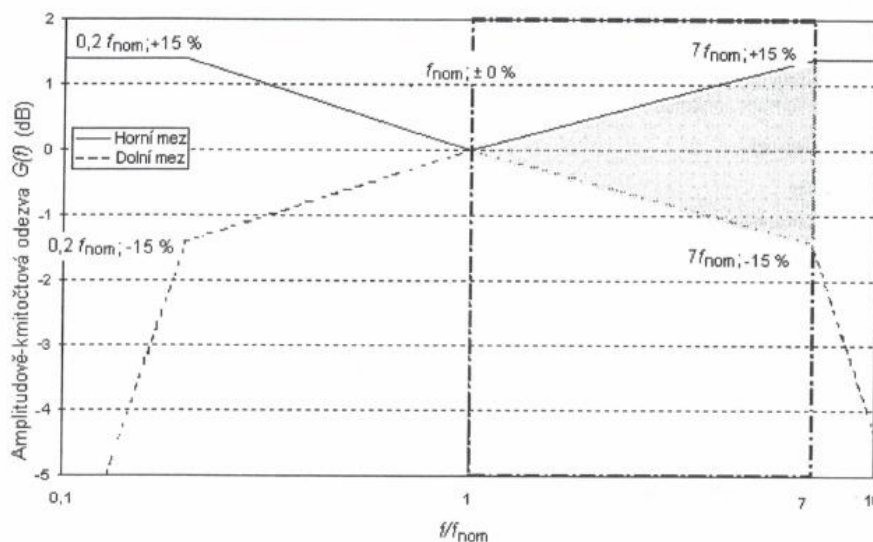
3.2 Měření střídavého napětí

3.2.1 Všeobecně

Obecný požadavek je měřit hodnotu zkušebnímu napětí v souladu s IEC60060-1 (vrcholová hodnota / $\sqrt{2}$ nebo efektivní hodnota) při jeho jmenovitém kmitočtu s rozšířenou nejistotou $U_M \leq 3\%$ [2].

3.2.2 Dynamické chování

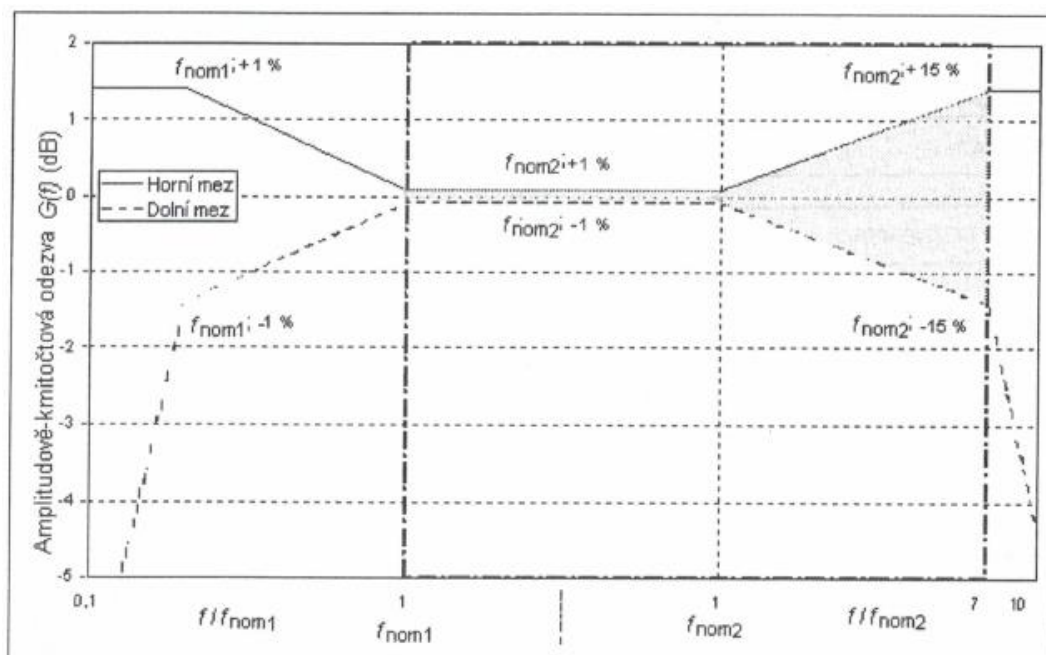
Amplitudově-kmitočtová odezva měřicího systému, který je určen pro činnost na jednom základním kmitočtu f_{nom} , musí být v oblasti označené na Obr. 1.6, která je odvozena z požadavků na nejistotu [2].



Obr. 1.6 Vystínovaná oblast pro přijatelné normalizované amplitudově-kmitočtové odezvy měřících systémů stanovených k jednotlivým základním kmitočtům f_{nom} [2]

Čísla ve dvojicích uvedená v diagramu ukazují normalizovaný kmitočet (logaritmická stupnice) a odpovídající odchylku v krajních bodech mezních čar. Chování v oblasti od f_{nom} do $7 f_{nom}$ musí být prokázáno zkouškami nebo analýzou obvodu. Amplitudově-kmitočtová odezva mimo tuto oblast je uvedena pouze informativně.

Měřicí systém může být také osvědčen pro rozsah základních kmitočtů (například 45 Hz až 65 Hz v souladu s IEC 60060-1). Konstanta musí být v takovém případě konstantní v rozmezí 1 % od nejnižšího základního kmitočtu f_{nom1} až do nejvyššího základního kmitočtu f_{nom2} . Amplitudově-kmitočtová odezva uvnitř intervalu f_{nom1} až $7 f_{nom2}$, musí být v oblasti označené na Obr 1.7 [2].



Obr. 1.7 Vystínovaná oblast pro přijatelné normalizované amplitudově-kmitočtové odezvy měřicích systémů stanovených k jednotlivým základním kmitočtům f_{nom1} až f_{nom2} [2]

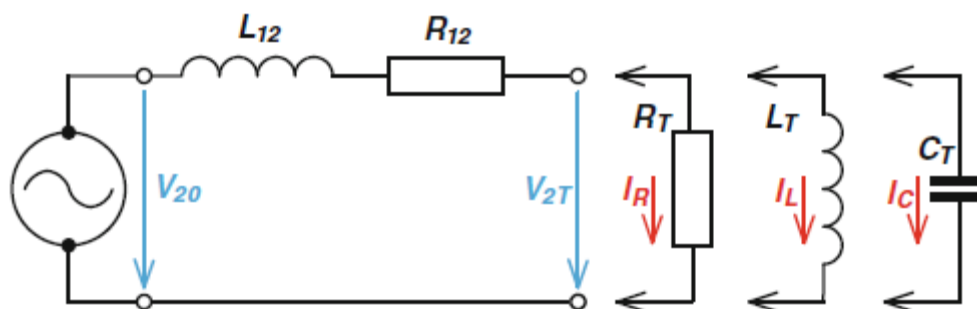
Čísla ve dvojicích uvedená v diagramu ukazují normalizovaný kmitočet a odpovídající povolenou odchylku od ideální odezvy v krajních bodech mezních čar. Chování v oblasti od f_{nom1} do $7 f_{nom2}$ musí být prokázáno zkouškami nebo analýzou obvodu. Amplitudově-kmitočtová odezva mimo tuto oblast je uvedena pouze informativně. Speciální požadavky na dynamické chování mohou být specifikovány příslušnou technickou komisí [2].

- *Měřicí systémy odpovídající těmto požadavkům mají kmitočtovou odezvu vyhovující pro měření činitele harmonického zkreslení (THD) zkušebního napětí [2]*
- *Sledování kmitočtové odezvy mimo vyznačenou oblast, ačkoliv to není vyžadováno, představuje vhodnou metodu [2]*
- *Měření amplitudově-kmitočtové odezvy se nemusí používat pro měřicí systémy používané u zdrojů střídavého napětí (například sériové rezonanční systémy), pokud lze prokázat, že poměr vrcholové efektivní hodnoty zkušebního napětí se rovná $\sqrt{2} \pm 1\%$ pro všechny očekávané provozní podmínky [2]*

3.2.3 Měření střídavého napětí pomocí testovacího transformátoru

Pro měření vysokého střídavého napětí se dříve používala kulová jiskřiště. Při používání

této metody přímého měření vysokých napětí byla procedura velice časově náročná. Další velkou nevýhodou metody je, že při průrazném napětí testovaného objektu není možné realizovat přeskok současně na jiskřišti a na měřeném objektu. Abychom předešly tyto problémy, je jednou z možností odvodit měřenou veličinu z primárního napětí V_1 testovacího transformátoru. To bylo běžnou praxí na začátku roku 1900, kdy začalo být vysoké střídavé napětí důležité pro technické aplikace. Jedná se sice o jednoduchý postup, avšak může způsobit několik měřicích chyb vzhledem k nevyhnutelnému poklesu napětí přes vnitřní impedanci testovacího transformátoru, jak je vidět na Obr. 1.8 [1].

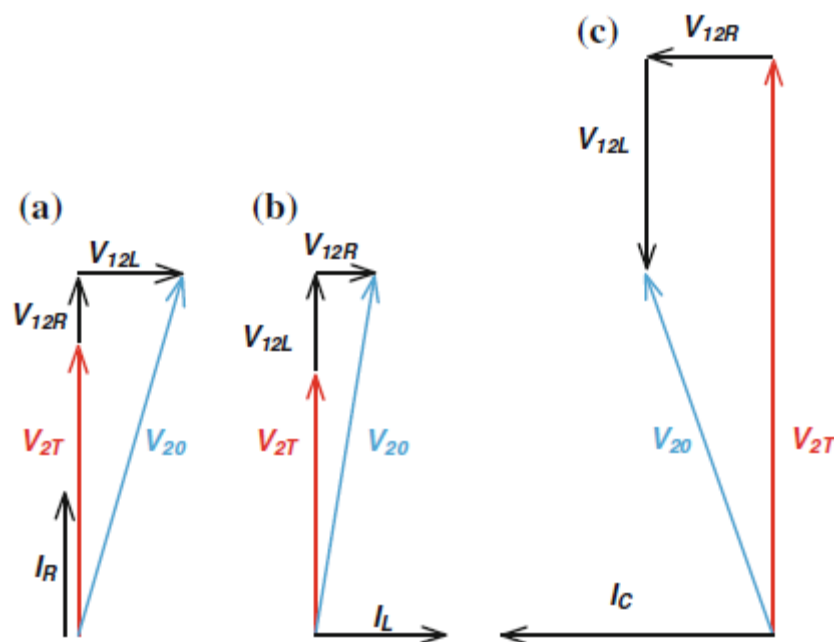


Obr. 1.8 Obvod vysokonapěťového testovacího transformátoru [1]

Na Obr. 1.8 je možno vidět zapojení vysokonapěťového testovacího transformátoru. Napětí V_{20} je připojeno k sériové kombinaci indukčnosti L_{12} a odporu R_{12} , reprezentující skutečnou impedanci transformovanou na vysokonapěťovou stranu. V tomto stavu je sekundární napětí bez zátěže rovno napětí V_{20} , což může být odvozeno z primárního napětí V_1 , pokud je násobeno poměrem:

$$V_{20} = V_1 \cdot \frac{w_2}{w_1} \quad (1.1)$$

kde w_1 a w_2 je počet primárních a sekundárních závitů. [1]



Obr. 1.9 Diagramy napětí

Na Obr. 1.9 jsou zobrazeny diagramy napětí. Tyto diagramy ukazují, že testované napětí o hodnotě V_{2T} , objevující se na testovaném objektu je velmi odlišné, než je tomu na zdroji napětí V_{20} bez zátěže a silně závisí na druhu zátěže, dokonce i na velikosti proudu. Při těchto podmínkách by mělo být zdůrazněno, že poměr mezi sekundárním a primárním napětím není závislý pouze na velikosti a fázi proudu, ale také na vyšších harmonických vzhledem k nelineární hysterese a saturace jádra. Proto není doporučeno odvozovat velikosti vysokého střídavého napětí z primárního napětí, protože je zde velká měřicí nepřesnost.

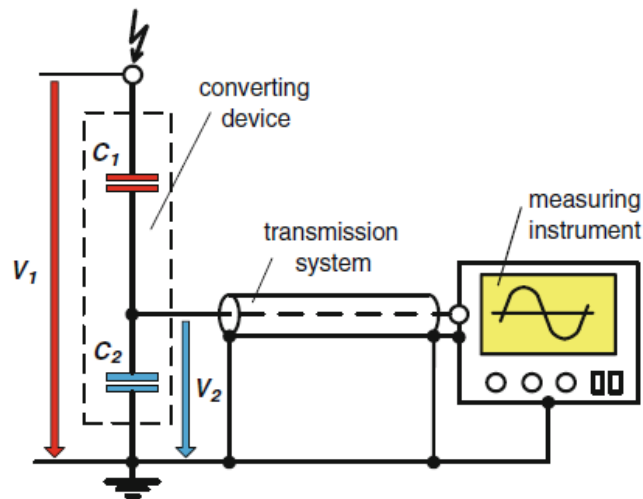
Další možnou metodu měření vysokého střídavého napětí představují elektrostatické voltmetry. Takové přístroje se mohou s přiměřenými náklady vyrábět pro jmenovitá napětí přibližně 100 kV. V dnešní době se nepřímé měřicí metody používají tak, že je hodnota vysokého napětí snížena na velikost, která dokáže být změřena klasickými nízkonapěťovými voltmetry. Tento způsob je běžnou praktickou metodou od let 1930. Systémy aplikované pro nepřímé měření vysokého napětí jsou zobrazeny na Obr. 2.1 [1]. Jsou jimi:

- *Převáděcí zařízení (napěťový dělič nebo přístrojový transformátor)*
- *Přenosový systém (koaxiální měřicí kabel nebo optická vlákna)*
- *Měřicí zařízení (vrcholový voltmetr nebo digitální měřič)*

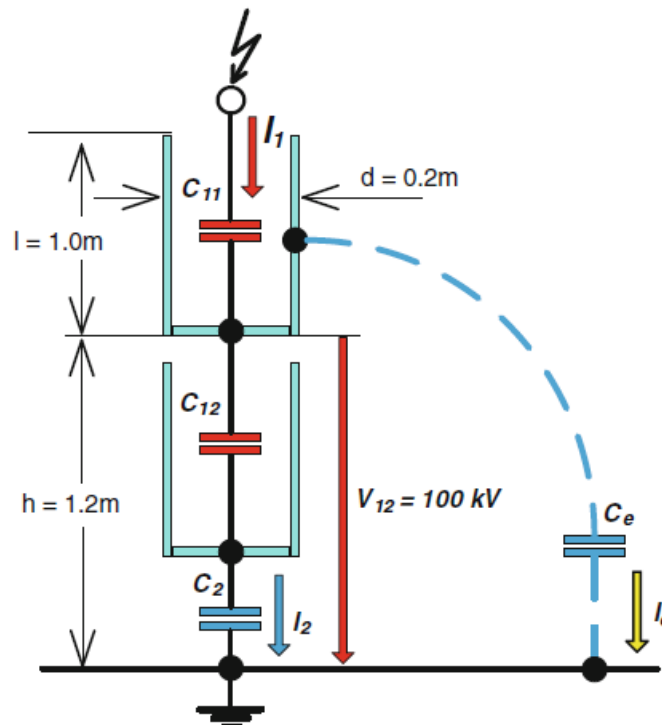
3.2.4 Napěťové děliče pro měření střídavého napětí

Ke snížení střídavého napětí na měřitelnou hodnotu se používají především odporové, kapacitní nebo induktivní prvky. Nicméně induktivní prvky, například přístrojové transformátory, jsou doporučeny používat pouze pro kalibrační důvody. To proto, že jsou velmi drahé, zvláště pokud jsou určeny pro měření HVAC (High Voltage Alternating Current) nad 500 kV. Proto jsou ve vysokonapěťových testech používány kapacitní, odporové nebo kapacitně-odporové prvky. Abychom se vyhnuli chybnému měření, horní elektroda a zkušební elektrody musejí být čisté, respektive sloupy děliče nemohou být znečištěny, například od prachu. To se může stát v důsledku velké vlhkosti vzduchu. Abychom drželi zátěž vysokonapěťového zařízení na nejnižší možné hladině, proud procházející přes dělič by měl být menší, než 10 mA jako ekvivalent pro impedančně/napěťový poměr 1 M Ω /10 kV. Tento požadavek může být těžko splněn pro odporové děliče nad 100 kV vzhledem k dopadu zemních kapacit. Kapacitní děliče představují nejlepší možné řešení pro měření střídavého napětí. Jednotlivé vysokonapěťové kapacitory nemohou být navrhovány pro napětí vyšší nad 300 kV, proto je vysokonapěťová část osazena několika kapacitami. Pro uvažování kapacitního děliče zobrazeného na Obr. 2.1, musí být vysoké napětí V_1 odvozeno z měřitelného nízkého napětí V_2 [1]:

$$V_1 = V_2 \cdot \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) \approx V_2 \cdot \frac{C_2}{C_1} \quad (1.2)$$



Obr 2.1 Prvky kapacitního děliče [1]

Obr 2.2 Kapacitní dělič se zemní kapacitou C_e [1]

$$C_e = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot l}{\ln\left(\frac{2 \cdot l}{d} \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot h + l}{4 \cdot h + 3 \cdot l}}\right)} \quad (1.3)$$

Na Obr 2.2 je zobrazen dělič se zemní kapacitou C_e . Je složen ze dvou vysokonapěťových kapacitorů C_{11} a C_{12} . Pro celkový odhad vezměme v potaz, že jsou kapacitory tvořeny kovovými válci délky l o průměru d kde je válec spojen s dolní částí kapacitoru. V takovém stavu je rozdělení proudu, který protéká děličem, ovlivněno pouze zemní kapacitou C_e umístěnou u horního okraje kapacitoru C_{11} ve výšce h nad zemí. Dle

užití formule (Kupfmüller 1932), jsou následující hodnoty použity pro vertikální válece s uvažováním, že je $l \gg d$: $\varepsilon = 8,86 \text{ pF/m}$ – dielektrická permitivita okolního vzduchu. Další hodnoty zvolíme následovně: $C_{11} = C_{12} = 200 \text{ pF}$, $d = 0,2 \text{ m}$, $l = 1 \text{ m}$, $h = 1,2 \text{ m}$. Pokud použijeme tyto parametry do rovnice 1.3, zemní kapacita horního vysokonapěťového kapacitoru C_{11} bude přibližně 26 pF . To je okolo 13-ti % hodnoty kapacitoru C_{11} . S uvažováním napájecí frekvence 50 Hz a napětí $V_{12} = 100 \text{ kV}$, může být proud I_{12} protékající přes kapacitor C_{12} a následně přes C_2 následující:

$$I_{12} = I_2 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_{12} \cdot C_{12} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 200 \cdot 10^{-12} = 0,00628 \text{ A} \quad (1.4)$$

$$= 6,28 \text{ mA}$$

Proud, který by tekł přes zemní kapacitu C_e mezi elektrodou C_{11} a zemí by pro napětí 100 kV byl:

$$I_e = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_{12} \cdot C_e = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 100 \cdot 10^3 \cdot 26 \cdot 10^{-12} = 0,81 \text{ mA} \quad (1.5)$$

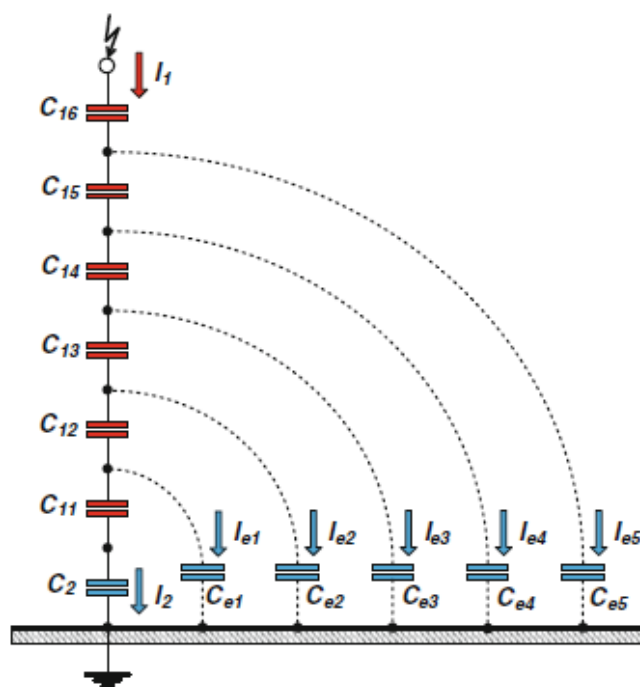
Celkový proud protékající přes kapacitor C_{12} je:

$$I_{11} = I_{12} + I_e = 6,28 + 0,81 = 7,09 \text{ mA} \quad (1.6)$$

Napětí, které se objevuje na kapacitoru C_{12} činí:

$$V_{11} = \frac{I_{11}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_{11}} = 113 \text{ kV} \quad (1.7)$$

Pak napětí objevující se na vysokonapěťové části je dáno $V_1 = V_{11} + V_{12} = 113 \text{ kV} + 100 \text{ kV} = 213 \text{ kV}$, což je 6,5% nad teoretickou hodnotu $2 \cdot 100 \text{ kV} = 200 \text{ kV}$ [1].



Obr 2.3 Kapacitní dělič se šesti vysokonapětovými kapacitami [1]

Zemní kapacity způsobují fiktivní snížení hodnoty kapacity vysokonapětové části. Čím větší počet kapacitorů v napětovém děliči, tím více se projevuje snížení hodnoty kapacity. K odhadnutí napětí rozloženého po celé délce vysokonapětového děliče a také ke stanovení skutečné hodnoty kapacity vysokonapětového děliče, vyznačeného na Obr 2.3, se použije rovnice [1]:

$$C_1 \approx \frac{C_{1n}}{n} - \frac{n \cdot C_e}{6} \quad (1.8)$$

Teoretické a experimentální studie odhalily, že zemní kapacita C_e každého kapacitoru závisí nepatrně na výšce nad zemí, proto je na základě toho rovnice zjednodušena.

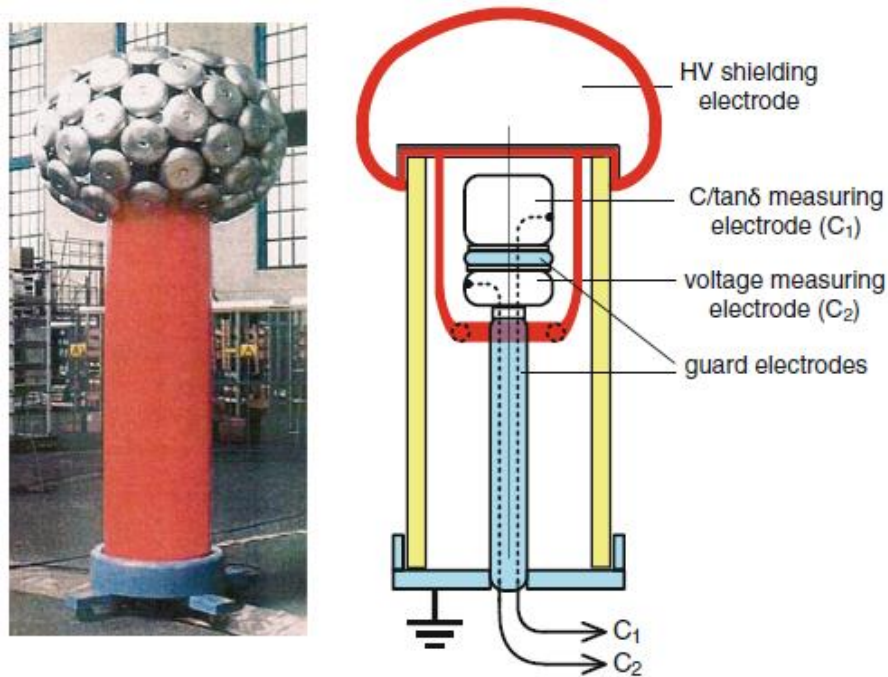
I když skutečná hodnota kapacity C_1 je jen nepatrně ovlivněna rozptylovými kapacitami mezi sloupem děliče a horní elektrodou, musí být vzato v potaz, že kapacita C_1 nemůže být určena s naprostou přesností. Jedinou metodou, kdy jsme schopni určit kapacitu C_1 je ověření aktuálního poměru napětového děliče a přiřazenou konstantu experimentální metodou. Možným způsobem jak toto experimentální ověření provést je za pomoci Scheringova můstku. Více je ale užíváno ověření za pomoci srovnávacích měření, používající metodu RMS (referenční měřicí systém) [1].



Obr 2.4 Napěťový dělič během kalibrace [1]

Typické uspořádání pro měření RMS je zobrazeno na Obr 2.4. Zde tvoří kapacitní normál referenční dělič, který je umístěn vlevo (oranžová barva) a kalibrovaný dělič je umístěn uprostřed (modrá barva). 1000 kV zkušební transformátorová kaskáda je umístěna vpravo (modrá barva) [1].

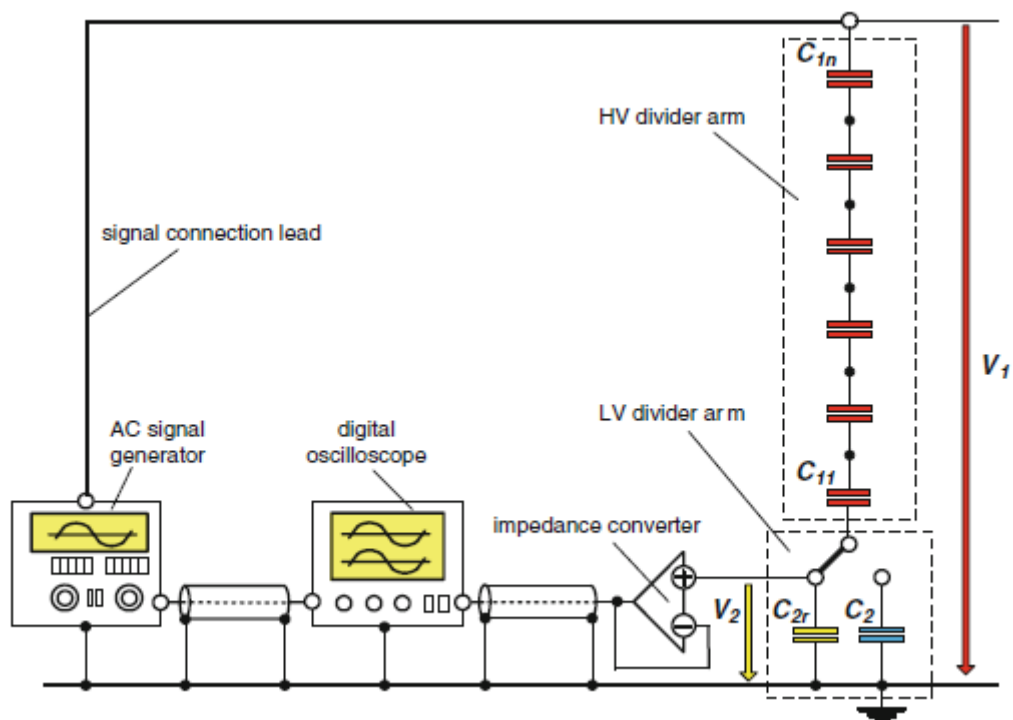
Kapacitní normály jsou utvořeny koaxiálními válcovými elektrodami s ochrannými kruhy na nízkonapěťové straně, jak bylo navrženo panem Scheringem a panem Viewegem v roce 1928. K dosažení vysokého průrazného napětí při malé mezeře se používá plyn SF₆, kterým je naplněn kapacitor z důvodu výborné stability při změnách teploty. Konstrukční princip je zobrazen na Obr 2.5 [1].



Obr 2.5 Kapacitor plněný plynem SF₆[1]

Tento princip odhaluje, že kapacita mezi koaxiálními elektrodami není ovlivněna zemními kapacitami, takže efekt blízkosti kapacit zařazených za sebou nemusí být brán v potaz.

K vyšetření dynamického chování vysokonapěťových děličů je běžnou praxí přivést na horní elektrodu sinusové napětí o naladitelné frekvenci a známou amplitudou, kde výstupní napětí na nízkonapěťové části je zaznamenáno jako funkce frekvence pomocí zkalibrovaného digitálního osciloskopu nebo spektrálního analyzátoru. Názorné zapojení je zobrazeno na Obr 2.6 [1].



Obr. 2.6 Zapojení pro měření skutečné kapacity C_1 napěťového děliče [1]

K minimalizaci dopadu okolního rušení a také pro zlepšení měřicí citlivosti při extrémně vysokých poměrech děliče je výhodné nahradit původní nízkonapěťovou kapacitu C_2 referenčním kapacitorem C_{2r} , který bude podstatně menší, než kapacitor C_2 . Tento krok nezmění dynamické chování děliče, protože toto zapojení je řízeno pouze pomocí vysokonapěťové části, nikoliv nízkonapěťové části. Za těchto podmínek signál o rozsahu několika stovek voltů přivedený na horní elektrodu způsobí napětí o několika stovkách milivoltů na nízkonapěťové části, které může být s velkou přesností měřeno digitálními osciloskopy. Abychom se vyhnuli zvýšení horního limitu frekvence vzhledem ke vstupní impedanci osciloskopu, která je obvykle $1\text{ M}\Omega$, napětí přes kapacitor C_r by mělo být zaznamenáno přes impedanční konvertor, který by měl mít minimální vstupní impedanci o hodnotě $10\text{ M}\Omega$. V tomto kontextu je nutno si uvědomit, že kapacitor C_1 je silně ovlivňován vzdáleností mezi sloupem děliče, obklopujícími zdmi a i také díky ostatním obklopujícím předmětům. Takže by geometrické uspořádání nemělo být měněno po tom, co je pevně stanovena kapacita C_1 . Navíc musí být vzato v potaz, že kapacita C_1 může být také ovlivněna teplotou dielektrického materiálu použitého pro vysokonapěťové kapacitory, který je například olejem impregnovaný papír. Vzhledem k dielektrickým ztrátám se teplota může zvyšovat po delším testovacím čase a tím také nejistota měřicího systému, zejména u vyššího napětí [1].

3.3 Měření atmosférického impulzního napětí a spínacího impulzního napětí

Pro měření vrcholové hodnoty vysokého impulzního napětí byly původně použity již zmiňovaná kulová jiskřiště. Tato přímá měřicí metoda je dnes doporučena pro provozní zkoušky. Pro měření těchto druhů napětí se dnes využívá nepřímých měřicích metod, používajících převodní zařízení a měřicí nástroj, které jsou spojeny přes přenosový systém. Nejvíce náročnou částí je návrh převodního zařízení, které je použito pro měření atmosférického impulzního napětí. Tato kapitola se bude převážně věnovat tomuto tématu, čili návrhu převodního zařízení, což tvoří napěťové děliče [1].

3.3.1 Dynamické chování napěťových děličů

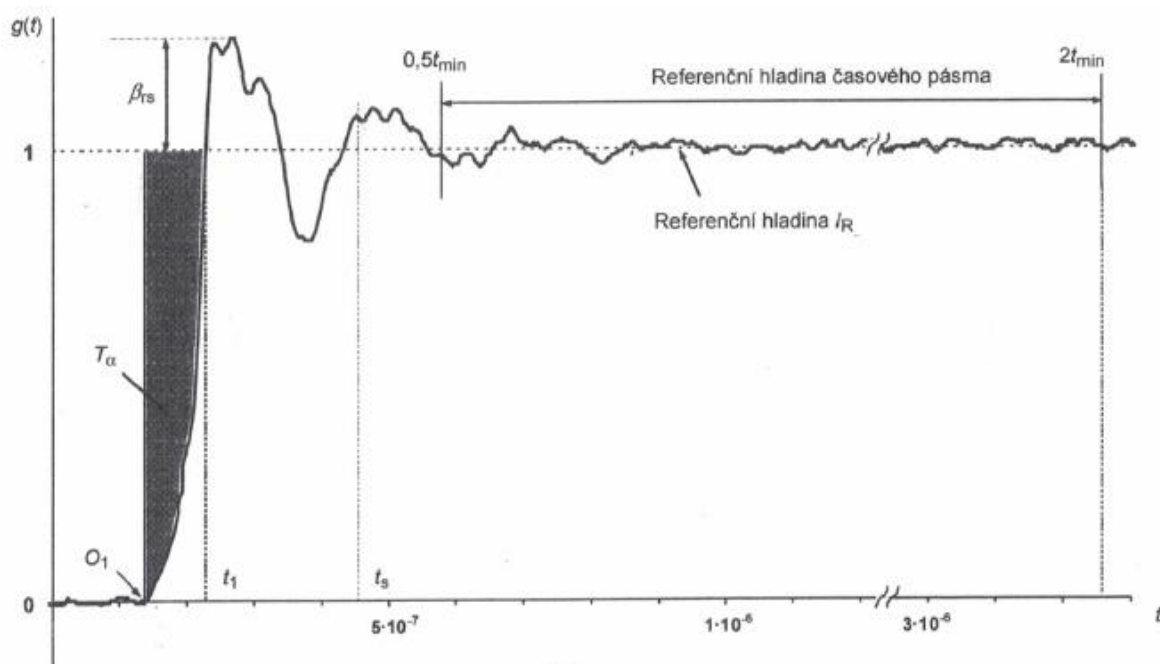
Atmosférické impulzní napětí je pokryto frekvenčním spektrem větším než 10 MHz. Abychom prokázali, zdali přiřazená konstanta děliče zůstává konstantní v tak širokém frekvenčním pásmu, musí být známo dynamické chování měřicích systémů, které se pro dané zkoušení používají. Protože přenosová funkce je z hlavní části určována napěťovým děličem, musíme se zaměřit na chování děliče. Přenosová funkce může být určena buď ve frekvenční, nebo v časové doméně [1].

3.3.2 Odezva na jednotkový skok

Měření odezvy na skok představuje tradiční metodu pro stanovení charakteristiky impulzního děliče napětí, osciloskopu nebo číslicového zapisovače. Protože neexistuje přímá korelace mezi parametry doby odezvy na skok a správným měřením impulzních napětí, toto měření není relevantní pro potřeby normy 60060-2, ale zůstává důležitým prvkem charakterizujícím dynamické chování v souvislosti se srovnávacími měřeními pro potřeby vývoje děličů a přístrojů. Kromě toho je toto měření použitelné pro provozní kontroly dynamického chování [2].

3.3.2.1 Referenční úroveň (I_R)

Střední hodnota, I_R doby odezvy na skok stanovená v rozsahu jmenovitého časového pásma (Obr 2.7), tzn. v rozsahu $0,5t_{\min}$ až $2t_{\max}$ [2].



Obr 2.7 Definice parametrů jednotkové odezvy na skok $g(t)$ [2]

3.3.2.2 Počátek odezvy na skok (O_1)

Okamžik, kdy křivka průběhu odezvy poprvé vykazuje monotónní nárůst nad hodnotu amplitudy hladiny šumu při nulové hladině (jednotkové) odezvy na skok (viz obrázek 2.7) [2].

3.3.2.3 Jednotková odezva na skok ($g(t)$)

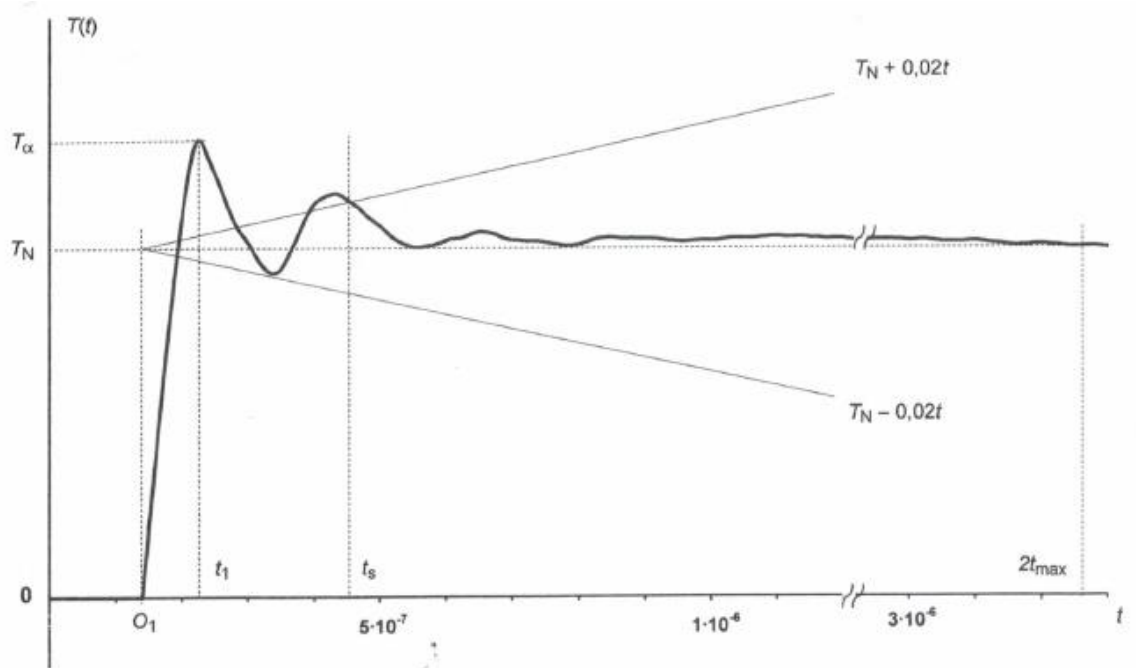
Odezva na skok normalizovaná tím způsobem, že referenční hladina je rovna jedné a nulová hladina je rovna nule (2.7). Měřicí systém vykazuje jednotkovou odezvu na skok pro každou referenční hladinu. Počátek O_1 odezvy na skok je identický s počátkem normalizované jednotkové odezvy na skok [2].

3.3.2.4 Experimentální doba odezvy

Hodnota integrálu na skok při $2 \times t_{\max}$ [2].

3.3.2.5 Dílčí doba odezvy (T_α)

Maximální hodnota integrálu odezvy na skok pro $t \leq 2 \times t_{\max}$ (viz obrázek 2.8) shodná s vyšrafovanou oblastí v obrázku 2.7) [2].



Obr 2.8 Definice parametrů integrálu odezvy na skok $T(t)$ [2]

3.3.2.6 Zbytková doba odezvy ($T_R(t_i)$)

Rozdíl mezi experimentální dobou odezvy T_N a hodnotou integrálu odezvy na skok v daném čase t_i , kde $t_i < 2 \times t_{\max}$ [2].

3.3.2.7 Překmit normalizované jednotkové odezvy na skok (β_{rs})

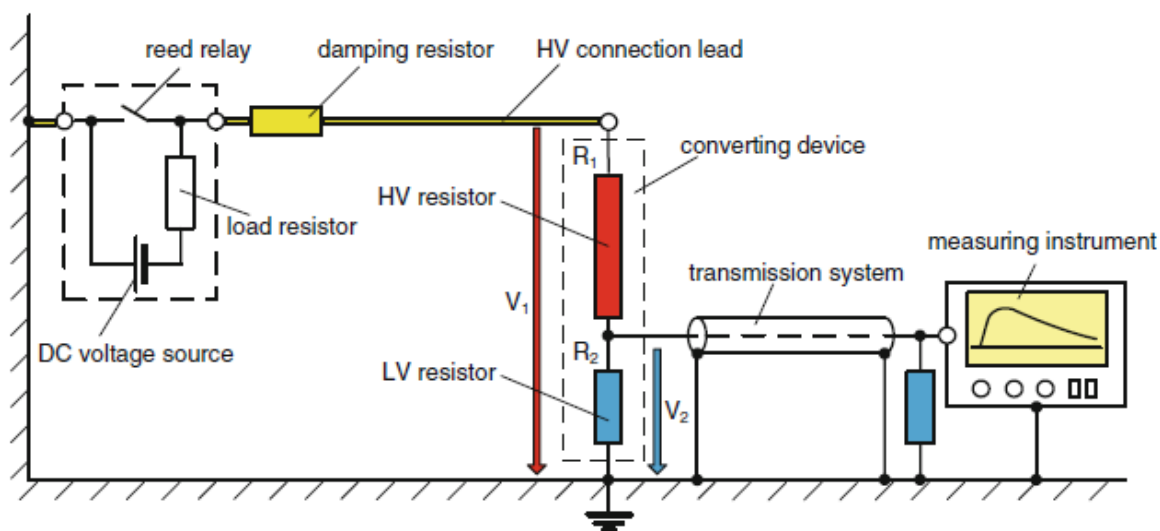
Rozdíl mezi maximem $g_{\max}(t)$ a jednotkou jako procentní hodnotou dané jednotky (obrázek 2.7) [2].

3.3.2.8 Čas ustálení (t_s)

Nejkratší čas, za který se zbytková doba odezvy $T_R(t)$ stane a zůstává menší než 2 % z t pro všechny hodnoty t v pásmu od O_1 do nejdelší doby do poloviny hodnoty $T_{2\max}$ měřeného impulzního napětí [2].

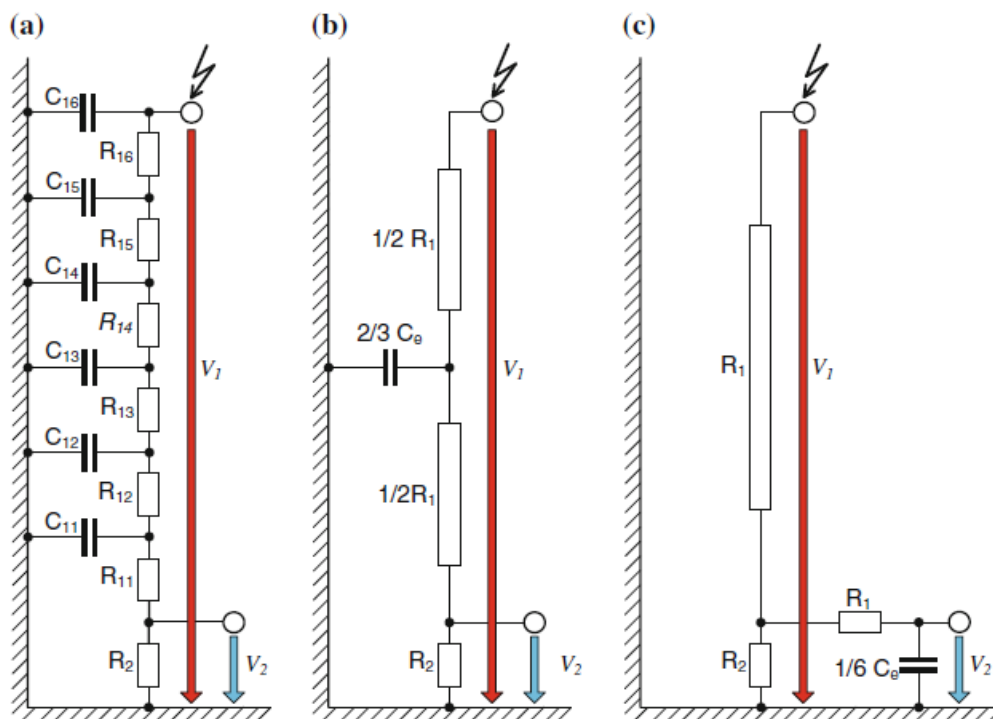
3.3.3 Obvody pro odezvu na jednotkový skok

Obvykle je přiložen jednotkový skok o hodnotě několika set voltů s náběžnou hranou v řádu několika nanosekund. Tato velice krátká doba náběžné hrany je dosažena za použití rtuťového relé. Pokud je frekvence spínání relé ve frekvenčním rozmezí okolo 100 Hz, nepříznivé rušení v okolí může být efektivně odstraněno, pokud je zařízení vybaveno funkcí pro průměrování signálu. Vzhledem k možnému vlivu blízkých předmětů je nutné vzít v potaz to, že je napěťový dělič uspořádán tak, jak je tomu v reálné situaci s vysokonapěťovými testovacími podmínkami, kde by nemělo být ani přívodní vedení, ani měřicí kabel odpojeny nebo by s nimi nemělo být manipulováno do té doby, dokud se kontrola dynamického systému neprovede do konce [1].



Obr 2.9 Nastavení zapojení pro měření odezvy na jednotkový skok pomocí LV napěťového děliče [1]

Dynamické chování napěťového děliče je také ovlivněno rozptylovými kapacitami mezi sloupem děliče a zemí, stejně tak jako objekty umístěné v okolí. Pro lepší pochopení věci je pohled na ekvivalentní obvod odporového děliče na Obr. 3.1 [1].

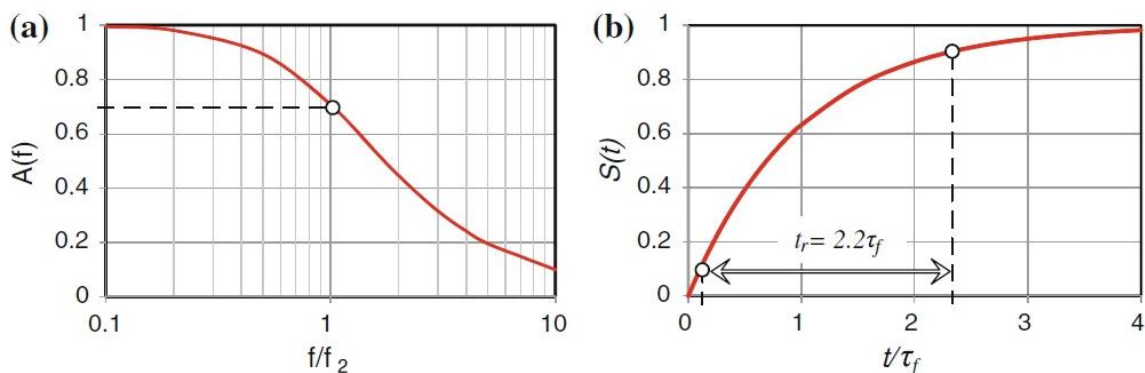


Obr 3.1 Ekvivalentní obvody nestíněných odporových napěťových děličů [1]

Zde je vysokonapěťová část rozdělena na n stejných elementů, kde jsou dílčí odpory a kapacity k zemi lineárně rozděleny. Pro takovou síť je potenciální rozložení napětí podél děliče dáno hyperbolickou funkcí. Odpor R_1 , tvořící vysokonapěťovou část, má o mnoho vyšší hodnotu, než odpor R_2 tvořící nízkonapěťovou část, což je základní předpoklad pro správné fungování děliče. Za tohoto stavu může být napětí V_2 , objevující se na odporu R_2 , odvozeno z napětí V_1 , které je aplikováno na horní elektrodu za použití Laplaceovy transformace:

$$F(j\omega) = \frac{V_2(j\omega)}{V_1(j\omega)} \approx \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{\sin h(\gamma)}{\sin h(n \cdot \gamma)} \quad (1.9)$$

Zapojení napěťového děliče na Obr. 3.1a může být nahrazeno zjednodušeným ekvivalentním obvodem, který zahrnuje pouze jednu soustředěnou kapacitu, jak je zobrazeno na Obr. 3.1b. I přes to, že je toto zapojení běžně používáno, existuje ještě jedna možnost zapojení a ta je zobrazena na Obr 3.1c. Zde je sériový odpor R_s filtru s dolní propustí roven odporu R_1 vysokonapěťové části a velikost paralelní kapacity C_p je rovna $1/6$ celkové zemní kapacity C_e vysokonapěťové části děliče [1].



Obr 3.2 Amplitudově-frekvenční odezva (a) a odezva na jednotkový skok v časové doméně (b)

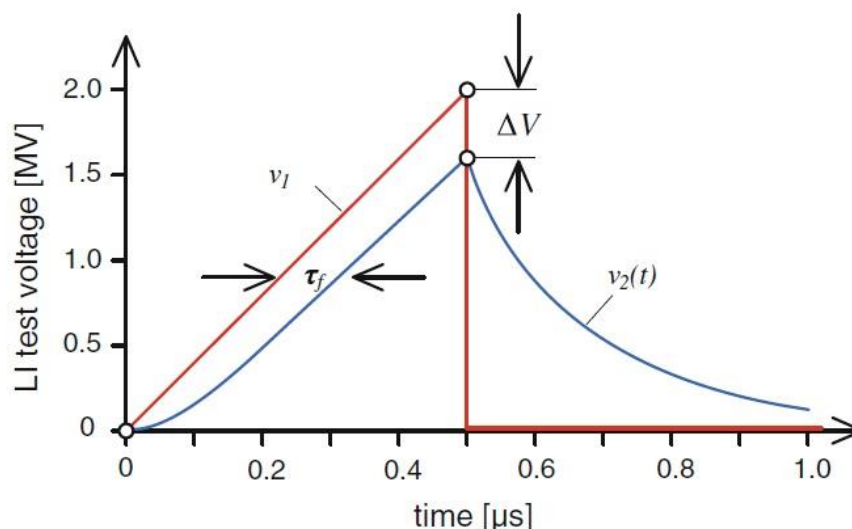
[1]

Rovnice pro Obr 3.2b může být vyjádřena:

$$g(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_f}\right) \quad (2.1)$$

Jako příklad můžeme vzít dělič pro atmosférické impulzní napětí s odporem $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ pro vysokonapěťovou část a parazitní kapacity $C_e = 30 \text{ pF}$ mezi vysokonapěťovou částí děliče a zemí. Pro tento případ dostaneme pro ekvivalentní dolní propust odkazující se na zapojení 3.1c hodnoty $R_s = R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ a $C_p = C_e/6 = 5 \text{ pF}$. Na základě těchto hodnot můžeme odhadnout velikost charakteristické časové konstanty, dobu náběhu a horní frekvenční limit následujícím způsobem [1]:

- **Charakteristická časová konstanta:** $\tau_f = R_1 \cdot \frac{C_e}{6} = 50 \text{ ns}$
- **Doba náběhu:** $t_r = 2.2 \cdot \tau_f = 110 \text{ ns}$
- **Horní frekvenční limit:** $f_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \tau_f} = 3.2 \text{ MHz}$



Obr 3.3 Napěťová náběžná hrana useknutá v čase $T_c = 500 \text{ ns}$ a výstupní signál $v_2(t)$ procházející dolní propustí prvního řádu [1]

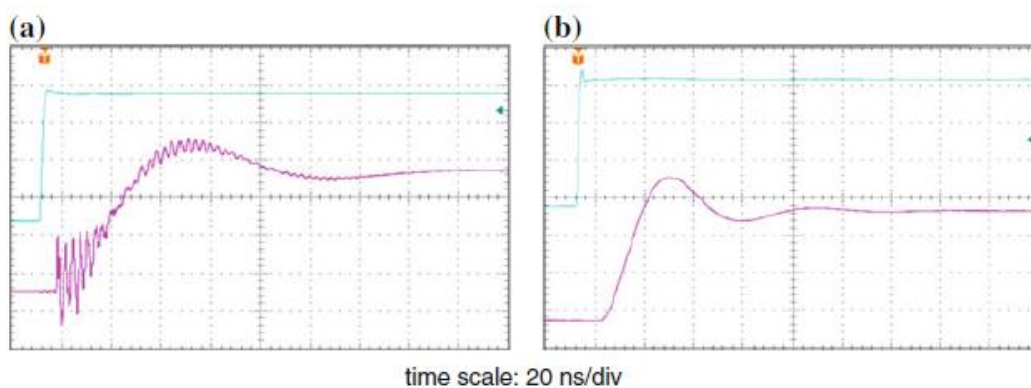
Pro odhad měřicí odchyvky useknutého atmosférického impulzního napětí je možné impulz aproximovat lineárně rostoucí funkcí, jak je zobrazeno na Obr. 3.3. Za tohoto stavu zaznamenávané napětí sleduje téměř přiložené napětí, ale je zpožděno o časovou konstantu τ_f . Při takto useknuté hodnotě musí být vrcholové napětí rovno [1]:

$$V_p = V_c \cdot \left(1 - \frac{\tau_f}{T_c}\right) \quad (2.2)$$

V případě, že se atmosférické impulzní napětí usekne po $T_c = 500 \text{ ns}$, se dostane za výše uvedené časové konstanty $\tau_f = 50 \text{ ns}$ následující relativní odchyvky výstupního napětí od skutečné hodnoty aplikovaného atmosférického impulzního napětí, která je rovna [1]:

$$\frac{V_c - V_p}{V_c} = \frac{\Delta V}{V_c} = \frac{\tau_f}{T_c} = \frac{50 \text{ ns}}{500 \text{ ns}} = 0,1 = 10 \% \quad (2.3)$$

V této souvislosti je třeba zmínit, že odezva na useknutý jednotkový skok za reálných podmínek osciluje, jak je znázorněno na Obr 3.4 [1].



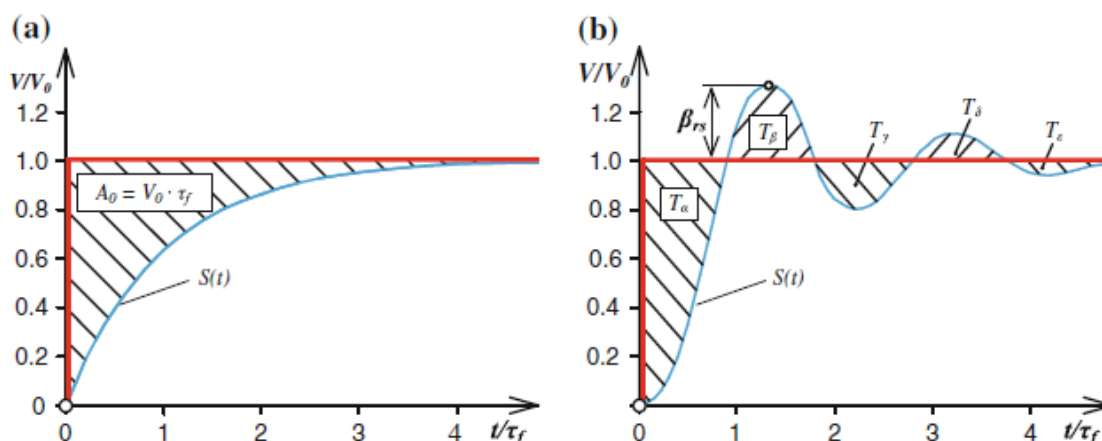
Obr 3.4 Experimentální odezva (fialová křivka) kapacitního (a) a odporového (b) děliče na jednotkový skok (modrá křivka) [1]

To je způsobeno především interakcí mezi indukčností sloupu děliče a zemní kapacitou. Pro porovnávací účely byla zavedena konstanta vyjadřující časovou oblast, která se označuje τ_a . Tato konstanta má jednotku času, ale vyjadřuje plochu, kterou se odezva díky oscilacím liší od jednotkového ideálního skoku. Amplituda skoku je rovná jedné, takže se s ní nepočítá. Proto je plocha vyjádřena v časových jednotkách [1].

$$\tau_a = \int_0^{\infty} \{1 - [g(t)]\} dt = \tau_f \quad (2.4)$$

Nejdůležitější parametry odezvy jednotkového skoku doporučené v normě IEC 60060-2 jsou zobrazeny na Obr. 3.5, která jsou definovány jako [1]:

- **Experimentální doba odezvy:** $T_N = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma - T_\delta + T_\varepsilon$
- **Dílčí doba odezvy:** T_α
- **Zbytková doba odezvy:** $T_R = T_\beta - T_\gamma + T_\delta - T_\varepsilon \dots$
- **Překmit normalizované jednotkové odezvy na skok:** β_{rs}



Obr 3.5 Odezva na jednotkový skok napěťových děličů. RC obvod (a), RLC obvod (b) [1]

V minulosti bylo běžnou praxí pro odhad měřicí nejistoty napěťových děličů zjišťovat daný problém pomocí konvoluční metody na základě charakteristických parametrů jednotkového skoku. Mezinárodní srovnávací měření však odhalilo, že tato metoda není schopna určit měřicí nejistotu v rámci mezních hodnot, specifikovaných v příslušných normách IEC. To proto, že zaznamenávaná křivka označená jako O_1 v normě IEC 60060-2: 2000 je zpožděna ve srovnání s okamžitým časem $t = 0$, kdy je aplikován krok napětí, jak je vidět na Obr. 3.5. Toto zpoždění je řízeno rychlostí cestování vlny, která se rovná přibližně 30 cm/ns jak pro připojovací vedení VN, tak i pro sloupec děliče. Pro měřicí kabel je rychlost vlny přibližně 20 cm/ns. V důsledku počátečního zkreslení odezvy, které se může v obvodu objevit, není možné tento počátek přesně určit, a to vede k nepřesnému definování parametrů odezvy.

Navzdory výše probíraných problémů je určení odezvy parametrů na jednotkový skok široce používáno pro optimalizaci dynamického chování napěťových děličů. Ke kalibraci přiřazené konstanty a ke stanovení dynamického chování doporučuje norma IEC 60060-2: 2000 srovnání s referenčními měřicími systémy, které musí být schopny určit měřicí nejistotu v rámci následujících mezních hodnot [1]:

- $\leq 1 \%$ pro vrcholové hodnoty pro plné LI a SI napětí stejně tak jako pro v týlu useknuté LI napětí
- $\leq 3 \%$ pro vrcholové hodnoty pro v čele useknuté LI napětí
- $\leq 5 \%$ pro časové parametry LI a SI napětí v jejich používaném rozmezí

K prokázání správných vlastností měřicího systému musí být kalibrace založena na porovnání s RMS. Jeho kalibrace musí být navázána na standardy národního metrologického institutu. Srovnání s RMS by se mělo provést pro impulzy s různou dobou čela, ale je alternativně možné použít pouze jeden tvar impulzu. Vzhledem k tomu, že měřicí nejistota vysokonapěťového měřicího systému je závislá především na napěťovém děliči, mohou být výše uvedená doporučení v principu přijata pro samotné reference děliče napětí, schváleny mezinárodním metrologickým institutem nebo pomocí kalibrační laboratoře schválené mezinárodním metrologickým institutem [1].

3.3.4 Návrh napěťového děliče

Pro měření vysokého napětí jsou použitelné odporové, kapacitní nebo odporově-kapacitní napěťové děliče. Návrh LI napěťového děliče je náročný úkol. Musí být vzato v úvahu, že dělič by měl být vždy umístěn „za“ testovaným objektem a nikdy „mezi“ generátorem napětí a testovaným objektem. Proud tekoucí přes testovací objekt způsobuje pokles napětí na impedanci vysokonapěťové části, takže měřené napětí může být vyšší, než napětí, které je aplikované na testovací objekt [1].

Parametry odezvy doporučené pro LI a SI napětí referenčních měřicích systémů			
Parametr	Plné a v týlu useknuté LI napětí (ns)	V čele useknuté LI napětí (ns)	SI napětí (μs)
Experimentální doba odezvy T_N	≤ 15	≤ 10	-
Dílčí doba odezvy T_α	≤ 30	≤ 20	-
Čas ustálení t_s	≤ 200	≤ 150	≤ 10

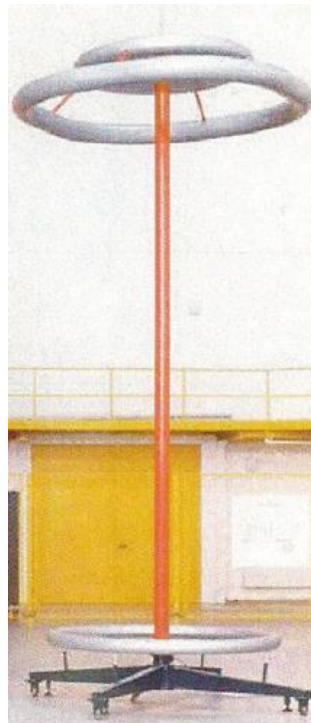
Obr 3.6 Parametry odezvy doporučené pro LI a SI napětí referenčních měřicích systémů [1]

3.3.5 Odporové napěťové děliče

Pro měření vysokých přechodných napětí v rozmezí μ s a níže jsou odporové děliče používané již od počátku minulého století. Jak již bylo řečeno v předchozí části, dynamické chování a tedy i nejistota měření takových děličů jsou řízeny především rozptylovými kapacitami C_e mezi sloupem děliče a zemí. Nahrazení sloupce děliče vertikální kovovou válcovou tyčí o výšce h a průměrem d , kde $d \ll h$, je možno následujícím způsobem:

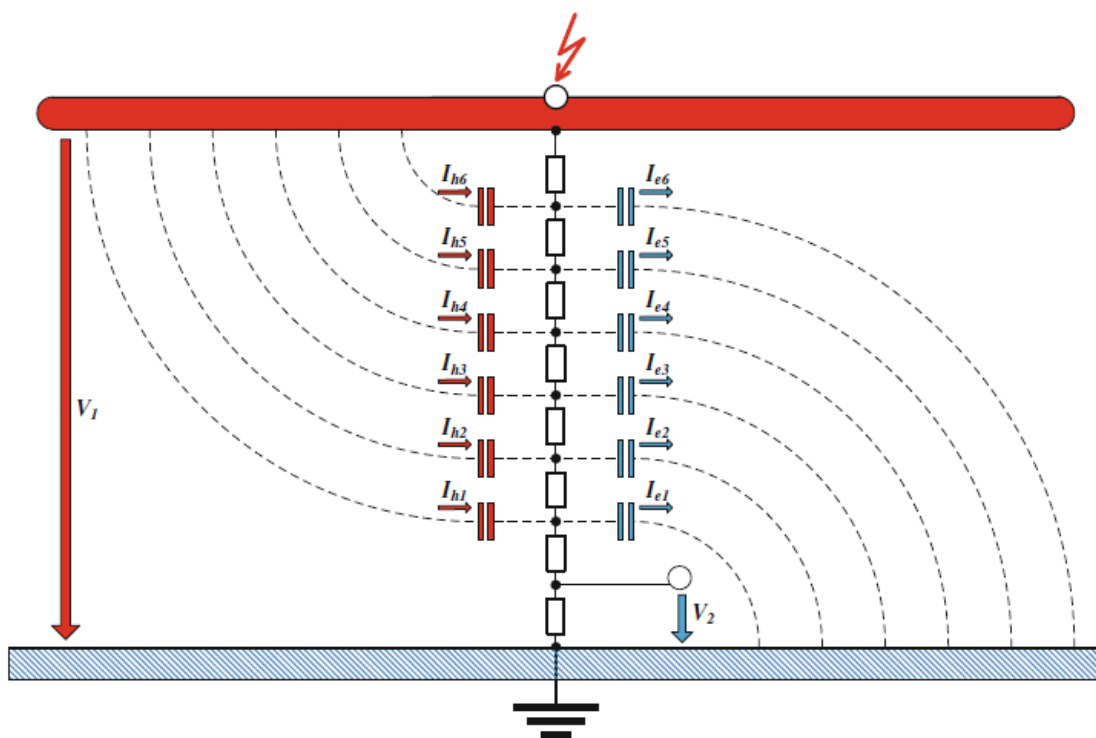
$$C_e \approx \frac{2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot h}{\ln\left(\frac{h}{d}\right)} \approx 24 \left(\frac{\text{pF}}{\text{m}}\right) \cdot \frac{h}{\ln\left(\frac{h}{d}\right)} \quad (2.5)$$

Představme si 2 MV dělič, kde je odpor na vysokonapěťové části $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$. Pro sloupec děliče o výšce $h = 5 \text{ m}$ a průměrem $d = 0,1 \text{ m}$ nabude zemní kapacita $C_e \approx 30 \text{ pF}$. Použití těchto parametrů na ekvivalentní obvod na Obr. 3.1c bude časová konstanta filtru s dolní propustí $\tau_f = R_1 \cdot C_e / 6 \approx 50 \text{ ns}$. Měřením v čele useknutém LI napětí s časovou konstantou $T_c = 0,5 \text{ }\mu\text{s}$ bude napětí objevující se na nízkonapěťové části o 10 % nižší v porovnání s velikostí napětí měřeném na „ideálním“ děliči [1].



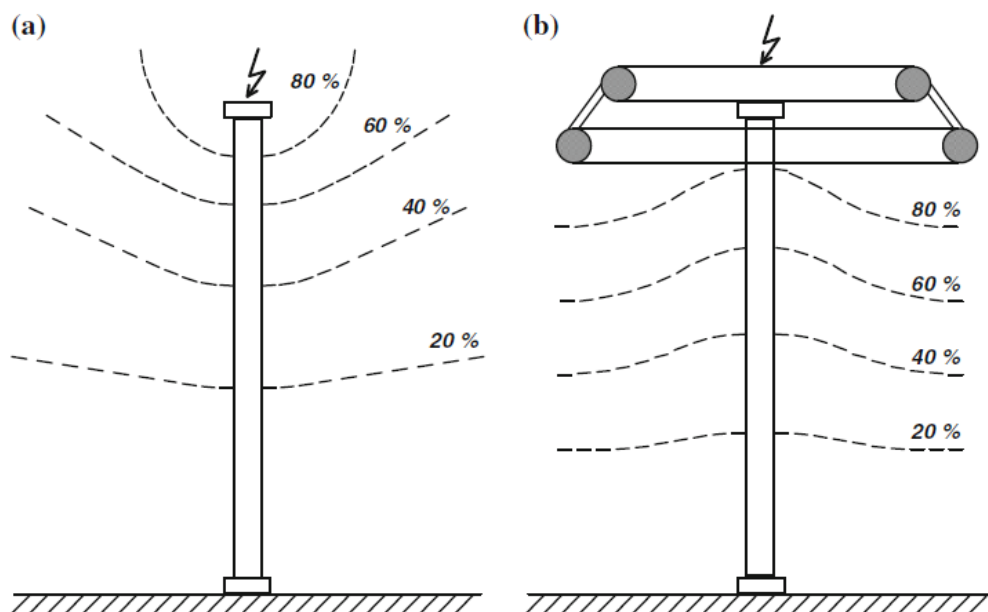
Obr 3.7 Stíněný LI odporový dělič na napětí 2,2 MV [1]

Na Obr 3.7 je odporový dělič, který má téměř stejné parametry, jaké jsou uvedeny výše. Přes poměrně vysoký odpor vysokonapěťové části $10 \text{ k}\Omega$, byla experimentální časová odezva určena okolo 15 ns , což je pouze 30 % hodnoty určené výše. To je mimo jiné dosaženo snížením dopadu zemní kapacity za použití ochranné elektrody. Za tohoto stavu jsou dílčí proudy I_{e1}, I_{e2} až I_{e6} mezi sloupem děliče a zemí víceméně kompenzovány dílčími proudy I_{h1}, I_{h2} až I_{h6} mezi vysokonapěťovou elektrodou a sloupem děliče, jak je zobrazeno na Obr 3.8 [1].



Obr 3.8 Princip kompenzace dílčích proudů mezi sloupem děliče a zemí pomocí proudů mezi vysokonapěťovou elektrodou a sloupem děliče [1]

Rozložení pole, které se vyskytuje podél napěťového sloupce, je optimalizováno, jak je tomu vidět na Obr 3.9.



Obr 3.9 Rozložení ekvipotenciálních čar přes vysokonapěťový sloupec odporového LI napěťového děliče. Bez řízení rozložení pole a), s řízením rozložení pole s použitím velkých stíněných elektrod b) [1]

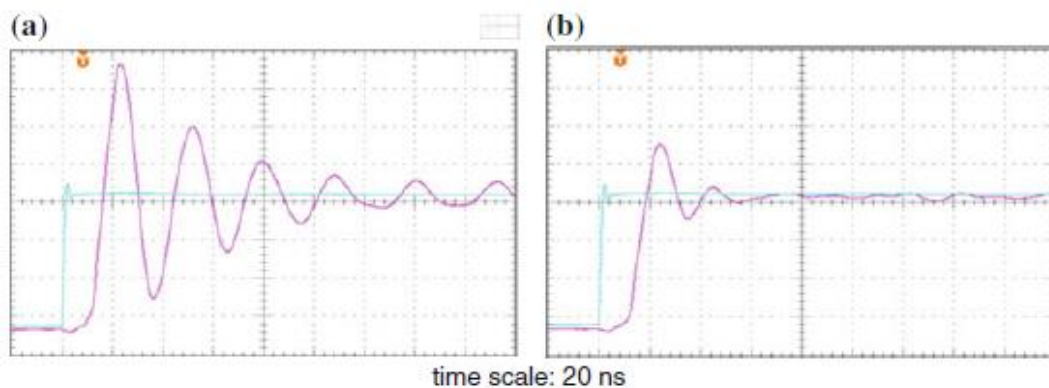
Toho je dosaženo za pomoci proměnného sklonu vinutí odporového drátu nebo odporové stuhy tak, aby se rozložení pole blížilo k elektrostatickému poli mezi elektrodami v nepřítomnosti sloupce děliče. Kromě toho byla indukčnost odporu poskytujícího vysokonapěťovou část minimalizována za použití bifilárního vinutí, kde je každý z nich zapojen v opačném směru kolem válcového jádra, izolovaného tenkou dielektrickou vrstvou. Další možností, jak minimalizovat indukčnost vysokonapěťové části je ta, že se aplikuje do obvodu Schniewindův-Bandův vysokonapěťový rezistor.

V podstatě se dá říci, že stíněné odporové děliče, které mají odpor v řádu desítek kV, jsou použitelné pouze pro měření plných LI napětí do hodnoty 2 MV, aby se splnily požadavky podle normy IEC 60060-2: 2010. Pro vyšší napětí jsou vyžadovány větší stínící elektrody. Z tohoto důvodu je celé zařízení samozřejmě dražší a snižuje se mechanická stabilita vysokých sloupců děliče. Snížení zemní kapacity je také limitováno z důvodu vůle k uzemněným a nabitým objektům. Ta musí být tak velká, jak je to jen možné, aby se zabránilo rušení optimalizovaného rozložení pole.

V zásadě platí, že dynamické chování napěťového děliče lze zlepšit snížením odporu vysokonapěťové části pod 10 k Ω . To by však způsobilo zmenšení hodnoty výstupního napětí, stejně tak jako dobu týlu LI generátoru. Kromě toho je třeba vzít také v úvahu, že ztrátový výkon a tím i teplota sloupce děliče roste s druhou mocninou přiloženého napětí. To je hlavním důvodem proč čistě odporové napěťové děliče s experimentální časovou odezvou méně než 10 ns, které vyžadují odpor vysokonapěťové části pouze několik k Ω , nejsou schopny měřit LI napětí nad 500 kV [1].

3.3.6 Tlumené kapacitní děliče

Z důvodu výše uvedených nevýhod čistě odporových napěťových děličů je rozumné použít jako alternativu kapacitní děliče. To proto, že použití kapacitního děliče eliminuje omezování výstupního napětí a doby trvání impulzu. Navíc sloupec děliče nebude nikdy zahříván, i když se používají napětí až několik MV. Hlavní nevýhodou kapacitních děličů je však to, že mohou rychlé přechodné napětí přejít na těžké oscilace, jak je možno vidět na Obr. 4.1a [1].



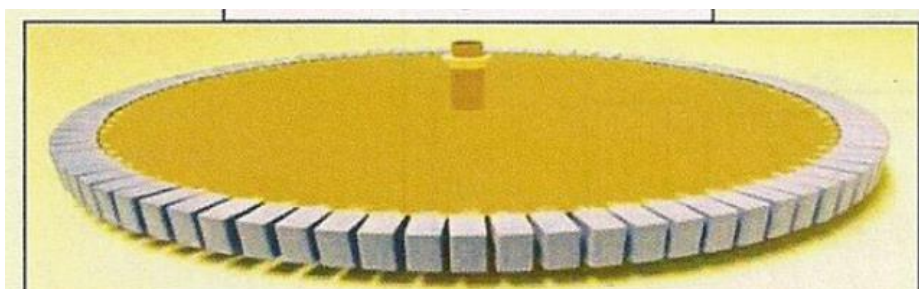
Obr 4.1 Odezva na jednotkový skok kapacitního děliče. Bez tlumeného rezistoru (a),
S tlumeným rezistorem (b) [1]

To je způsobeno tím, že kapacitní dělič působí ve vysokofrekvenčním rozsahu podobném stavu zkratu. To proto, že impedance kondenzátoru klesá s rostoucí frekvencí. Aby se předešlo této nevýhodě, měla by být vysokonapěťová část složena z vrstvených kondenzátorů společně se sériovými odpory. Hlavní výhodou tohoto přístupu je nejen to, že rušivé kmity jsou účinně tlumeny, ale také to, že časová konstanta se nezvýšila, jak je zřejmé z Obr 4.1b.

Je třeba zdůraznit, že návrh nízkonapěťové části tlumeného kapacitního děliče je také výzva. To proto, že poměr mezi indukčnostmi vysokonapěťové části a nízkonapěťové části musí být roven poměru děliče, který je roven poměru rezistoru a nepřímo úměrně poměru kapacity:

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{C_1}{C_2} \quad (2.6)$$

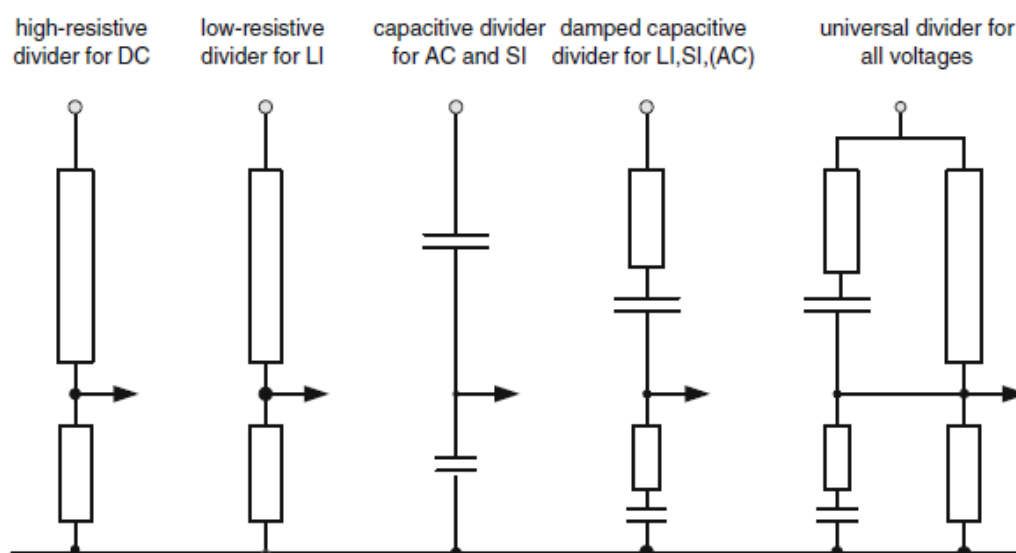
Nejúčinnější způsob, jak minimalizovat indukčnost nízkonapěťové části je paralelní zapojení velkého počtu prvků, které tvoří tvar disku, jak je vidět na Obr. 4.2, kde se každý prvek skládá z kapacitoru zapojeného do série s odporem [1].



Obr 4.2 Nízkonapěťová část tlumeného kapacitního děliče složena z 60 paralelních elementů složených z rezistorů zapojených v sérii s kapacitorem [1]

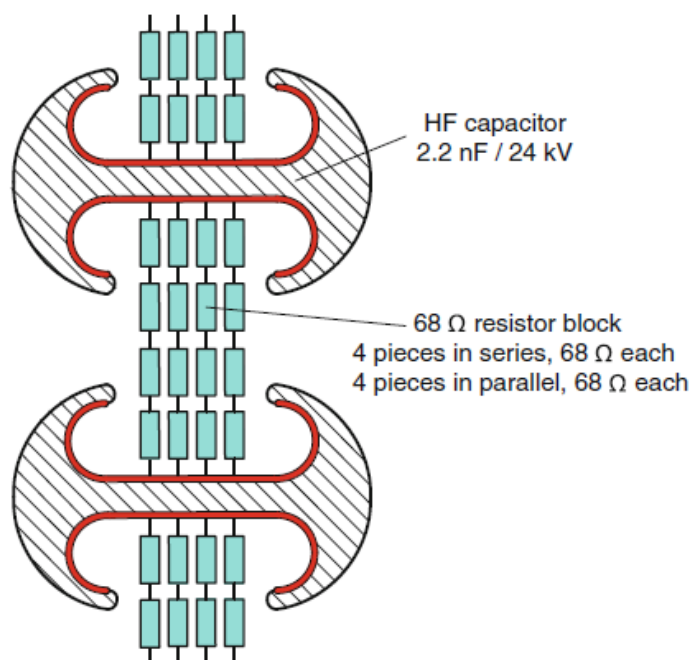
Srovnáme-li různé druhy děličů, lze konstatovat, že tlumené kapacitní děliče poskytují velmi dobré dynamické chování. Další výhodou je to, že ztráty v odporech vložených mezi naskládané kondenzátory jsou poměrně nízké. Přechodné proudy jsou pouze krátkého trvání, takže jmenovité napětí není nijak omezeno. Kromě toho poskytuje skutečná kapacita děliče vysokonapětěvé části základní zátěž pro LI generátor. Vzhledem k tomu, že je nabíjecí proud nepřímo úměrný frekvenci, jsou tlumené kapacitní děliče schopny měřit SI a AC napětí a dají se použít i pro měření kompozitních napětí.

Pokud je dělič vybaven odporem o velké hodnotě zapojeným paralelně k vysokonapětěvé části, nazývá se „univerzální dělič“, jak je vidět na Obr. 4.3. Ten je schopen měřit i stejnosměrné napětí včetně superponovaného zvlnění pokrývajícího frekvenční spektrum o hodnotě několika kHz. Vzhledem k široké oblasti působnosti jsou tlumené kapacitní děliče často označovány jako „víceúčelové“ děliče [1].



Obr 4.3 Různé typy zapojení napětěových děličů pro různě napětěové systémy [1]

Vzhledem k výše zmiňovaným výhodám je většina referenčních měřicích systémů (RMS) vybavena tlumenými kapacitními děliči. Aby se zachovala indukčnost a teplota vysokonapětěvé části na nejnižší možné úrovni, také se používají vysokofrekvenční kotoučové keramické kondenzátory. Tyto prvky jsou k dispozici pro jmenovité napětí do 25 kV a pro jmenovitou kapacitu v řádu 2 nF. Příklad je uveden na Obr. 4.4 [1].



Obr 4.4 Tlumený kapacitní dělič pro jmenovité napětí 200 kV [1]

Na Obr 4.4 je zobrazena vysokonapěťová část tlumeného kapacitního děliče, který je určen pro maximální LI napětí 200 kV používající sériové zapojení deseti vysokofrekvenčních keramických kondenzátorů, každý má hodnotu kapacity 2,2 nF a jsou pro jmenovité napětí 24 kV. Měření časové odezvy odhalilo, že optimální dynamické chování je dosaženo při sériovém odporu o hodnotě 680 Ω.

Celkově bylo zapojeno 9 odporových bloků mezi naskládané kapacity a jeden odporový blok slouží jako tlumící rezistor na vysokonapěťové straně. Každý odporový blok se skládá z 16 nízko-induktivních odporů na bázi oxidů kovu, 4 z nich jsou zapojeny do série a 4 z nich jsou zapojeny paralelně, jak je vidět na Obr 4.4 Pro kompletní 200 kV LI napěťový dělič byly zjištěny následující parametry [1]:

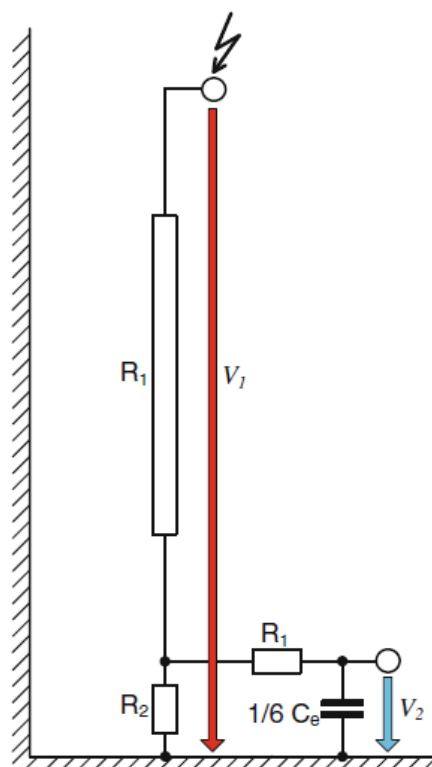
- **Experimentální doba odezvy:** $T_N \approx 2 \text{ ns}$
- **Dílčí doba odezvy:** $T_\alpha \approx 5 \text{ ns}$
- **Čas ustálení:** $t_s \approx 120 \text{ ns}$

4 Simulace odezvy na jednotkový skok pro impulzní napětí

V této části práce je ukázka simulace odezvy na jednotkový skok pro impulzní napětí v programu DYNAST. Cílem této kapitoly je vyzkoušet navržený dělič na dynamické chování, konkrétně na jednotkový skok. Důležitými údaji jsou tvar napětí a velikost amplitudy, která musí být děličem přenesena. Díky tomuto programu je možno si ověřit, pokud dělič splňuje požadavky a zda vyhovuje normám. Konkrétní dělič, který je použit v simulaci, je svými parametry částečně přebrán z literatury [1]. V simulaci řeším dva konkrétní obvody. V prvním případě testuji RC obvod, což znamená, že se jedná o odporový dělič a parazitní kapacitu vůči zemi. Ve druhém případě testuji tlumený kapacitní dělič.

4.1 RC dělič pro měření odezvy na jednotkový skok

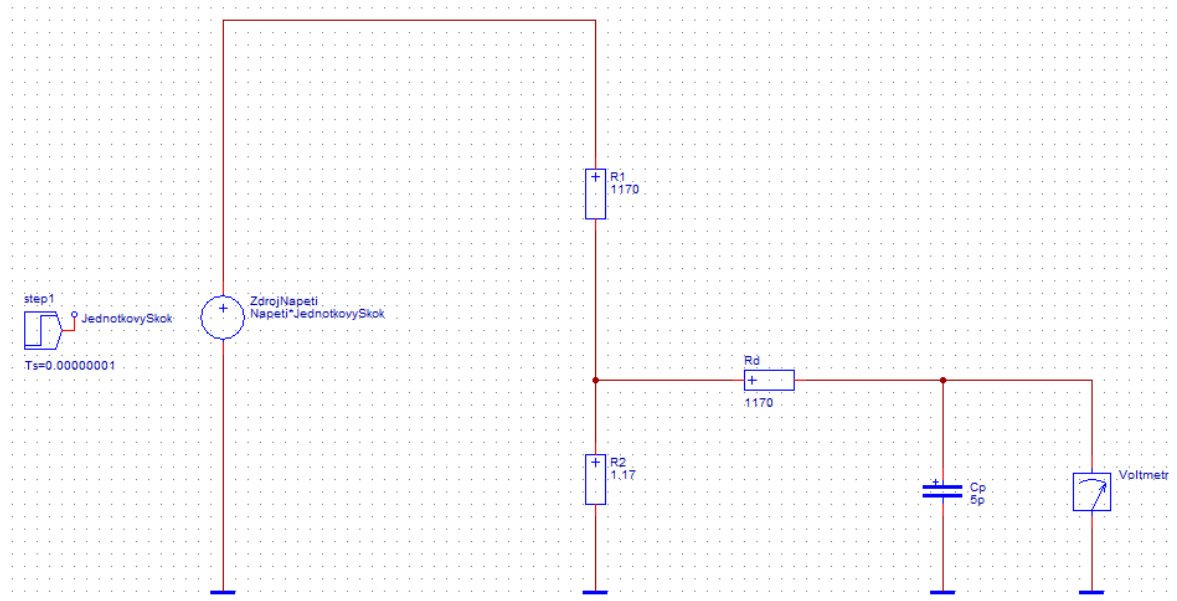
Obvod pro zapojení RC napěťového děliče je na Obr. 4.5.



Obr 4.5 Zapojení RC děliče [1]

4.1.1 Reálný RC dělič

Ověřme si konkrétní RC dělič, kde jsou jeho parametry uvedeny v literatuře [1]. Zapojení a parametry jsou zobrazeny na Obr. 4.6.



Obr 4.6 Zapojení RC děliče v programu DYNAST

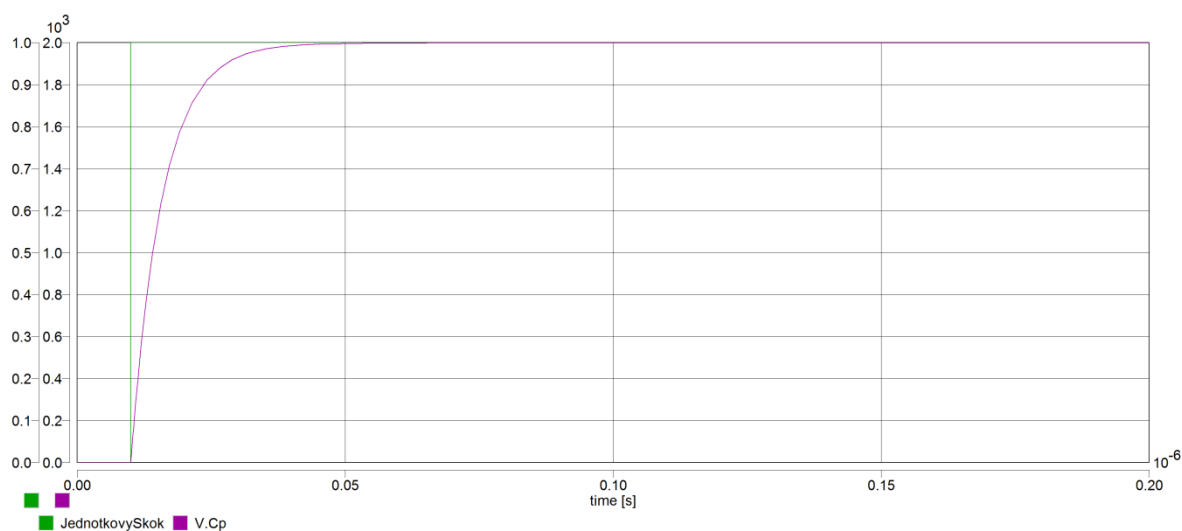
4.1.2 Parametry konkrétního obvodu napěťového děliče

- Zdroj napětí = 2 MV
- Odpor vysokonapěťové části $R_1 = 1170 \Omega$
- Odpor nízkonapěťové části $R_2 = 1,17 \Omega$
- Vlastní odpor děliče $R_d = 1170 \Omega$ (odpor odpovídající hodnotě R_1 zapojen v dolní propusti dle originálního schématu)
- Parazitní kapacita vůči zemi $C_p = 5 \text{ pF}$
- Voltmetr
- Výška děliče $h = 5 \text{ m}$
- Průměr děliče $d = 0,25 \text{ m}$

4.1.3 Vypočítané a naměřené hodnoty

$$C_p = \frac{C_e}{6} = \frac{30}{6} = 5 \text{ pF} \quad (2.7)$$

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 2\,000\,000 \cdot \frac{1,17}{1170 + 1,17} = 1998 \text{ V} \quad (2.8)$$

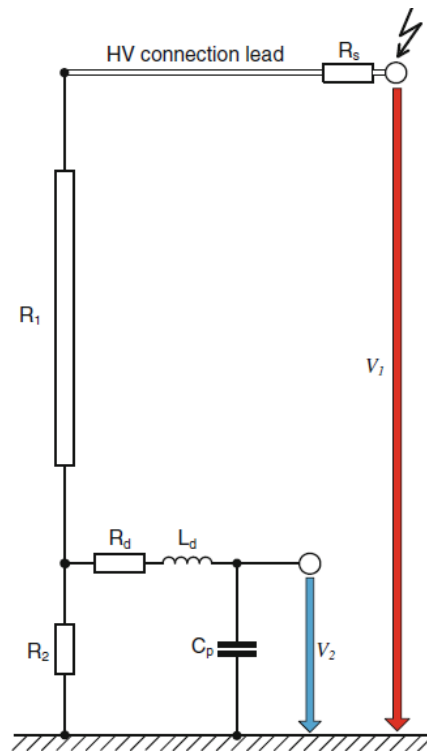


Obr 4.7 Odezva RC děliče na jednotkový skok v programu DYNAST

Fialová křivka vyjadřuje napětí zobrazované měřičem. Zelená křivka vyjadřuje jednotkový skok. V tomto případě je navržený dělič zvolen tak, aby přenášel plnou hodnotu amplitudy. Tvar napětí odpovídá teoretickým předpokladům. Pokud by byl požadavek na přenesení amplitudy, zkouška by proběhla úspěšně.

4.2 Tlumený kapacitní dělič pro měření odezvy na jednotkový skok

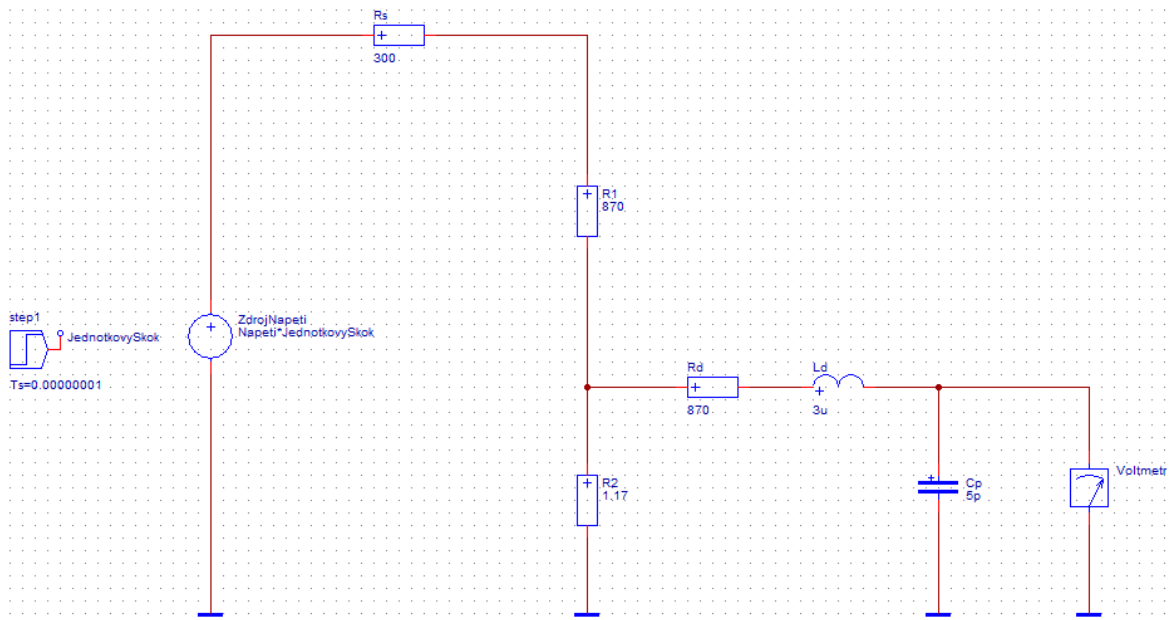
Obvod pro zapojení tlumeného kapacitního napěťového děliče je na Obr. 4.8.



Obr 4.8 Zapojení tlumeného kapacitního děliče [1]

4.2.1 Reálný tlumený kapacitní dělič

Ověřme si konkrétní reálný tlumený kapacitní dělič, kde jsou jeho parametry uvedeny v literatuře [1]. Zapojení a parametry jsou zobrazeny na Obr. 4.9.



Obr 4.9 Zapojení tlumeného kapacitního děliče v programu DYNAST

4.2.2 Parametry reálného tlumeného kapacitního děliče

- Zdroj napětí = 2 MV
- Tlumící odpor $R_s = 300 \Omega$
- Odpor vysokonapět'ové části $R_1 = 870 \Omega$
- Odpor nízkonapět'ové části $R_2 = 1,17 \Omega$
- Vlastní odpor děliče $R_d = 870 \Omega$
- Vlastní indukčnost děliče $L_d = 3 \mu\text{H}$
- Parazitní kapacita vůči zemi $C_p = 5 \text{ pF}$
- Voltmetr
- Výška děliče $h = 5 \text{ m}$
- Průměr děliče $d = 0,25 \text{ m}$

4.2.3 Vypočítané a naměřené hodnoty

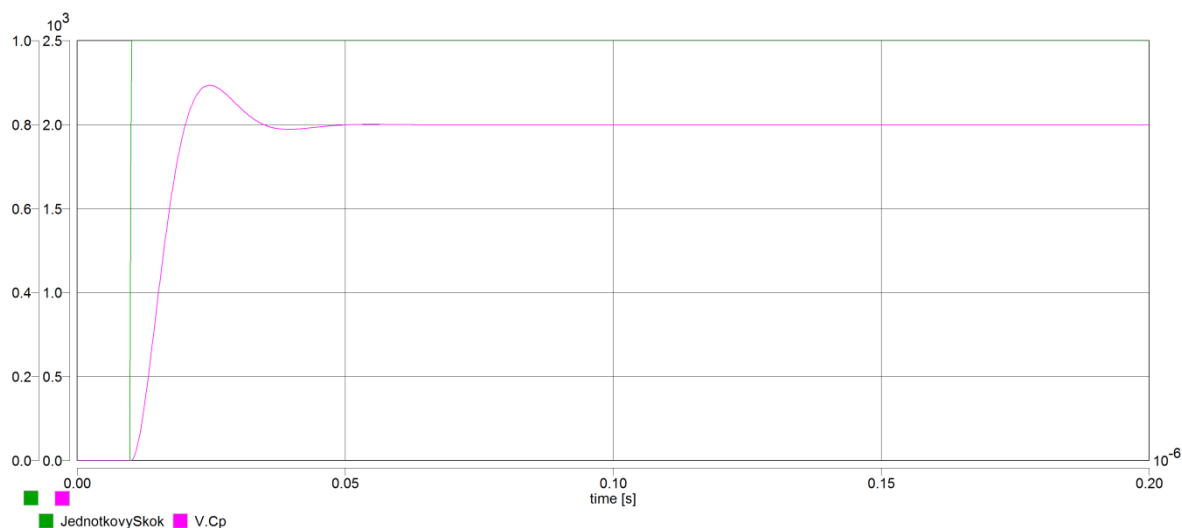
$$L_d \approx \frac{\mu_0 \cdot \left[\ln \left(\frac{h}{d} \right) \right] \cdot h}{2\pi} \approx \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \left[\ln \left(\frac{5}{0,25} \right) \right] \cdot 5}{2\pi} \approx 3 \mu\text{H} \quad (2.9)$$

$$R_d = 2 \cdot \sqrt{\frac{L_d}{C_p}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 10^{-12}}} \approx 870 \Omega \quad (3.1)$$

$$R_{1s} = R_1 + R_s = 870 + 300 = 1170 \Omega \quad (3.2)$$

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{R_2}{R_{1s} + R_2} = 2\,000\,000 \cdot \frac{1,17}{1170 + 1,17} = 1998 \text{ V} \quad (3.3)$$

- Ostatní hodnoty v obvodu zvoleny bez konkrétního výpočtu (převzaty z literatury [1])



Obr. 5.1 Odezva tlumeného kapacitního děliče na jednotkový skok v programu DYNAST

Růžová křivka vyjadřuje napětí zobrazované měřičem. Zelená křivka vyjadřuje jednotkový skok. V tomto případě je nasimulovaná hodnota napětí totožná s výpočtem, avšak tento navržený dělič nepřenáší plnou amplitudu napětí. Aby byla tato podmínka splněna, muselo by se napětí ustálit při plném kroku, tj. v na hodnotě 1. V tomto případě se hodnota ustaluje na hodnotě kroku 0,8. Museli bychom predefinovat parametry v obvodu pro dosažení plného přenesení amplitudy. Jelikož bychom ale testovali konkrétní dělič, parametry nemůžeme libovolně měnit. Museli bychom přehodnotit umístění děliče, čím by se mohla změnit parazitní kapacita děliče a ostatní věci s tím související. Pokud by byl tedy požadavek na přenesení amplitudy, dělič v tomto případě nevyhovuje.

Závěr

Předmětem simulací je odezva napěťového děliče na jednotkový skok. Požadavek ověřovaný simulacemi je přenesení plné hodnoty amplitudy napětí při odezvě na jednotkový skok. Parametry testovaných napěťových děličů jsou z části převzaty z literatury. Pro výpočet parametrů jednotlivých prvků děliče jsou v práci uvedeny jednotlivé vztahy, dle kterých byly další potřebné parametry dopočítány. Simulace prokazuje dynamické chování testovaných napěťových děličů.

V případě RC děliče je odezva na jednotkový skok v ideálním tvaru. Při daných a vypočtených parametrech děliče je přenesena plná hodnota amplitudy napětí.

V případě tlumeného kapacitního děliče je odezva na jednotkový skok odlišná. Do obvodu je přidána vlastní indukčnost děliče, čímž průběh napětí začíná oscilovat a následně se ustálí. Z grafu je vidět, že se nepřenáší celá hodnota amplitudy. To může být způsobeno parametry prvků v obvodu. Z výsledku testu vyplývá, že tento napěťový dělič nesplňuje potřebné parametry, neboť se výstupní napětí ustálí při hodnotě kroku 0,8. V ideálním případě se má výstupní napětí ustálit při plném kroku, tj. při hodnotě 1. Navržený dělič tedy není optimální a je třeba upravit některé parametry jeho prvků, abychom dosáhli požadovaného plného kroku. V programu DYNAST tedy můžeme dle uvedeného schématu testovat napěťové děliče, kdy při změně jejich parametrů lze ve výsledku dosáhnout optimálního návrhu.

Měření vysokého napětí záleží na mnoha okolnostech, které musejí být dodrženy jak z hlediska plnění technických norem, tak z hlediska technického návrhu. Je to velice precizní činnost, při které se musí promýšlet řada detailů. Konkrétní návrh napěťových děličů ovlivňují i okolnosti jako je například umístění děliče, objekty kolem děliče apod. V těchto případech mohou výsledek měření ovlivnit parazitní kapacity. Z toho vyplývá, že potřebujeme nejen optimalizovat parametry prvků děliče, ale je nutno vzít v úvahu i konkrétní místo, kde je měření prováděno. Přesnost měření je zejména v oblasti vysokého napětí nezbytná a měření musí být tudíž prováděno pečlivě a co nejpřesněji.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] HAUSCHILD, Wolfgang. LEMKE, Eberhard. *High-voltage test and measuring techniques*. ISBN 978-3-642-45351-9.
- [2] ČSN EN 60060-2. *Technika zkoušek vysokým napětím : Část 2: Měřicí systémy*. Praha : Český normalizační institut, 1997. 56 s.