



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY

**Vysokonapěťové kapalinové děliče pro měření
rychlých přechodných dějů**

**High voltage solution resistive divider for fast transients
measurement**

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Ing. Jan Hlaváček, Ph.D.

Jan Cmíral

Praha 2015

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická
katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Jan Cmíral**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Vysokonapěťové kapalinové děliče pro měření rychlých přechodných dějů**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Provedte rešeršní činnost v oblasti kapalinových děličů určených pro měření rychlých přechodných dějů.
- 2) Navrhněte a realizujte funkční vzorek kapalinového děliče pro měření impulzních napětí do 20 kV.
- 3) Provedte ověření vlastností realizovaného funkčního vzorku.

Seznam odborné literatury:

- [1] Kuffel, E., Zaengl, W.S., Kuffel, J.: High Voltage Engineering Fundamentals, Newnes, Oxford 2000.
- [2] Schwab, A.: High-voltage Measurement Techniques, M.I.T. Press, 1972.
- [3] Veverka, A.: Technika vysokých napětí, SNTL 1982, Praha.

Vedoucí: Ing. Jan Hlaváček, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2015/2016

L.S.

Ing. Jan Švec Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 1. 4. 2015

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, dne 1. května 2015

.....

Podpis

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce Ing. Janu Hlaváčkovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a za čas, který mi během vypracování této práce věnoval. Děkuji také panu Janu Kvasničkově za pomoc při sestavování prototypu kapalinového děliče.

Obsah

1	Úvod.....	9
2	Napět'ové děliče	10
2.1	Základní rozdělení napět'ových děličů	10
2.2	Konstrukce standardního VN děliče	12
2.3	Vysokonapět'ové kapalinové děliče obecně	13
2.4	Vliv kapacit a odporů na dobu odezvy kapalinového děliče	14
2.5	Stínění u kapalinového děliče	16
2.6	Použité chemické látky	17
3	Problematika konstrukce VN děličů	21
3.1	Vedení elektrického proudu roztokem	21
3.2	Základní pojmy elektrochemie	22
3.3	Stínění	23
3.4	Odrazy vln a impedanční přizpůsobení napět'ového děliče	25
3.5	Skinefekt	29
4	Problematika impulsních napětí.....	31
4.1	Atmosférické přepětí	31
4.2	Spínací přepětí.....	34
5	Současný stav problematiky kapalinových děličů.....	36
5.1	Kapalinový dělič 170 kV	36
5.2	Kapalinový dělič 300 kV	37
6	Konstrukce kapalinového děliče	41
6.1	Horní a spodní elektroda	43
6.2	Vnitřní a vnější trubka z plexiskla	44
6.3	Dřevěný podstavec	45
6.4	Plexisklová deska	45
6.5	Stínicí krabice.....	45
6.6	Dělicí poměr sestaveného děliče	45
7	Použité měřicí přístroje a metody pro vyhodnocení výsledků	46
7.1	Použité měřicí přístroje a zařízení.....	46
7.2	Postup při vyhodnocení naměřených hodnot	47
8	Vyhodnocení	51
8.1	Průběh vstupního a výstupního signálu	51
8.2	Míra odlišnosti tvaru vstupního a výstupního signálu (MOT).....	52

8.3	Frekvenční spektrum měřených signálů.....	54
8.4	Vliv roztoku na frekvenční charakteristiky.....	54
8.5	Vliv amplitudy napětí na frekvenční charakteristiky	56
8.6	Vliv teploty na frekvenční charakteristiky	57
8.7	Šířka pásma děliče.....	58
9	Závěr.....	60
	Použitá literatura.....	61
	Přílohy	63

Seznam tabulek

Tab. 1	- Vzdálenost elektrod v závislosti na charakteru napětí.....	13
Tab. 2	– Vysvětlení jednotlivých časů T	33
Tab. 3	– Popis jednotlivých částí děliče	43
Tab. 4	– Obsah látek v roztoku.....	46
Tab. 5	– Hodnoty MOT	53
Tab. 6	– Šířky pásma	59

Seznam obrázků

Obr. 1	– Schéma zapojení napěťového děliče	10
Obr. 2	– Schéma zapojení kombinovaného děliče	12
Obr. 3	– Standardní VN dělič [17]	13
Obr. 4	– Doba odezvy děliče	14
Obr. 5	– Zapojení odporového děliče s uvažováním parazitních kapacit.....	14
Obr. 6	– Zpoždění děliče v závislosti na jeho parametrech [9]	15
Obr. 7	– Vliv odporu děliče na dobu odezvy [9]	16
Obr. 8	– Stínění pomocí vnější kapalinové vrstvy [6].....	17
Obr. 9	– Závislost koncentrace na rezistivitě - CuSO_4 [13]	18
Obr. 10	– Závislost koncentrace na rezistivitě – $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ [13]	19
Obr. 11	– Závislost koncentrace na rezistivitě - NH_4Cl [13]	19
Obr. 12	– závislost koncentrace na rezistivitě – NaCl [13].....	20
Obr. 13	– Přízpůsobovací impedance na vstupu kabelu.....	26
Obr. 14	– Přízpůsobovací impedance na výstupu kabelu.....	27
Obr. 15	– Přízpůsobovací impedance na vstupu i výstupu kabelu	28
Obr. 16	– Plný atmosférický impuls [16]	31
Obr. 17	– Atmosférický impuls useknutý v týlu [16].....	32

Obr. 18 – Atmosférický impuls useknutý v čele [16].....	32
Obr. 19 – Schéma zapojení jednostupňového RG.....	33
Obr. 20 – Schéma zapojení třístupňového RG	34
Obr. 21 – Spínací impuls [16]	35
Obr. 22 – Fotografie Kapalinového děliče 170 kV [6].....	36
Obr. 23 – Schéma Kapalinového děliče 170 kV [6].....	36
Obr. 24 – Závislost dělicího poměru na teplotě [6].....	37
Obr. 25 – Fotografie Kapalinového děliče 300 kV [8].....	38
Obr. 26 – Schéma Kapalinového děliče 300 kV [8].....	38
Obr. 27 – Zapojení atenuátoru na výstup koaxiálního kabelu [8]	38
Obr. 28 – Odezva na jednotkový skok děliče 300 kV [8]	39
Obr. 29 – Test linearity dělicího poměru [8].....	40
Obr. 30 – Fotografie sestaveného kapalinového děliče.....	41
Obr. 31 – Schéma sestaveného kapalinového děliče.....	42
Obr. 32 – Conductivity meter [18]	46
Obr. 33 – Fotografie měření na děliči	47
Obr. 34 – Průběh vstupního a výstupního signálu CuSO_4 při 20 kV a 21 °C	51
Obr. 35 – Oscilace v oblasti amplitudy	52
Obr. 36 – Amplitudové frekvenční spektrum vstupního signálu pro 20 kV	54
Obr. 37 – Amplitudové frek. charakteristiky při 20 kV a 21 °C	55
Obr. 38 – Fázové frek. charakteristiky při 20 kV a 21 °C.....	55
Obr. 39 - Amplitudové frek. charakteristiky při NH_4Cl a 21 °C.....	56
Obr. 40 – Fázové frek. charakteristiky při NH_4Cl a 21 °C.....	56
Obr. 41 – Amplitudové frek. charakteristiky při NH_4Cl a 20 kV.....	57
Obr. 42 - Fázové frek. charakteristiky při NH_4Cl a 20 kV.....	57

Abstrakt

Tato závěrečná práce se zabývá problematikou kapalinových děličů určených pro měření rychlých přechodných dějů. Cílem práce je vytvoření funkčního vzorku kapalinového děliče pro měření impulsních napětí do 20 kV. Na základě naměřených dat jsou následně vyhodnoceny vlastnosti sestaveného děliče.

Klíčová slova

Napěťový dělič, kapalinový dělič, impulsní napětí, zpracování signálu

Abstract

This diploma thesis deals with high voltage solution resistive dividers for fast transients measurements. The main objective of this thesis is construction of the solution resistive divider prototype for impulse voltage of the amplitude up to 20 kV measuring. According to the measured values the properties of the constructed divider are evaluated.

Keywords

Voltage divider, solution resistive divider, impulse voltage, signal processing

1 Úvod

Pro měření impulsních napětí a ostatních rychlých přechodových dějů se v současné době používají především napěťové děliče, ať už ty kapacitní nebo odporové. Odporové děliče, které jsou poskládány ze standardních, tedy navíjených nebo napařovaných, rezistorů mají jednu velkou nevýhodu. Při vyšších frekvencích se začíná více uplatňovat jejich parazitní indukčnost. Její vliv je možné částečně eliminovat tzv. bifilárním vinutím vodiče rezistoru, toto opatření ale není dokonalé.

V minulosti vyšlo několik vědeckých článků, ve kterých jsou prezentovány výsledky měření na prototypu tzv. vysokonapěťových kapalinových děličů [6, 7, 8, 9]. Konkrétně jde o to, že je zde standardní rezistor nahrazen kapalinovým rezistorem, tedy vodním roztokem s vhodnou vodivostí. Výhoda použití kapaliny je, vzhledem k výše zmíněnému, zřejmá. Při průchodu proudu tímto rezistorem totiž nedochází ke vzniku parazitní indukčnosti mezi závity.

Cílem této práce je sestavení funkčního vzorku odporového napěťového děliče, který má namísto standardního vysokonapěťového rezistoru vhodnou kapalinu. Následně měřením na rázovém generátoru ověřit jeho funkčnost, a z naměřených hodnot určit jeho vlastnosti.

2 Napět'ové děliče

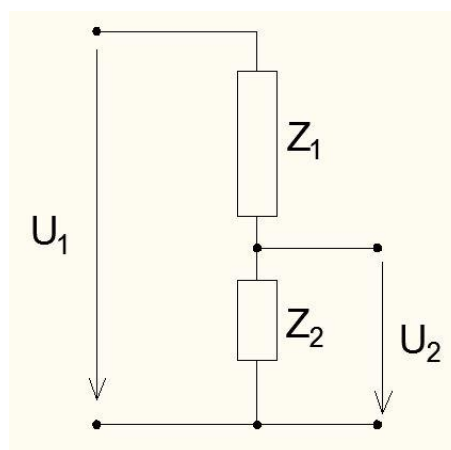
Napět'ové děliče mají velice široké spektrum využití. V této práci se ovšem věnují především vysokonapět'ovým děličům vhodným pro měření a zkoumání rychlých přechodových dějů. Pokud chceme studovat průběhy napět'ových impulsů nebo jiných přechodových jevů, které jsou generovány příslušnými generátory impulsů, musí být použit osciloskop. Díky osciloskopu lze poté určit parametry impulsu, jako například jeho amplitudu, dobu trvání impulsu, dobu čela impulsu, dobu týlu impulsu nebo frekvenci a periodu u periodických průběhů.

Konstrukce většiny osciloskopů, ať analogových nebo digitálních, ovšem nedovoluje připojit na jejich vstupy napětí větší než stovky voltů. Pokud jsou ale prováděny zkoušky izolátorů, kabelů apod., jsou aplikovány impulsy s amplitudou řádově i jednotky megavoltů. Z toho vyplývá, že nelze měřit takovéto jevy přímo osciloskopem bez přidaného mezičlenu. Takový mezičlen může tvořit například vhodný vysokonapět'ový dělič.

Úkolem napět'ového děliče je snížit amplitudu měřeného impulsu napětí tak, aby mohl být měřen osciloskopem. Zároveň také vzniká požadavek na co nejmenší deformování měřeného signálu děličem.

2.1 Základní rozdělení napět'ových děličů

Zapojení napět'ového děliče je v principu velice jednoduché, jak je patrné z následujícího schématu (Obr. 1). Napět'ový dělič se obecně skládá ze dvou impedancí Z_1 a Z_2 . Napětí U_1 představuje přiváděné napětí a napětí U_2 výstupní napětí, které je dále přiváděno například do osciloskopu. Protože chceme, aby napětí U_2 na výstupu děliče splňovalo podmínku $U_2 < U_1$, je zřejmé, že pro impedanci Z_2 musí platit $Z_2 < Z_1$, tak aby napětí U_{Z1} na impedanci Z_1 bylo větší než napětí U_2 na impedanci Z_2 .



Obr. 1 – Schéma zapojení napět'ového děliče

Je zřejmé, že pro nezatížený dělič, tak jak je uveden na schématu (Obr. 1), platí následující:

$$I = \frac{U_1}{Z_1 + Z_2}, \quad I_{Z2} = \frac{U_2}{Z_2} \quad (2.1)$$

$$I = I_{Z_2} \quad (2.2)$$

kde I je celkový proud děličem (A),
 I_{Z_2} proud impedancí Z_2 (A).

Po úpravě rovnic (2.1) a (2.2) lze psát rovnici pro napět'ový dělič (2.3).

$$U_2 = U_1 \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.3)$$

Existují tři základní typy napět'ových děličů, a to odporové, kapacitní a indukční. Z těchto základních typů děličů lze sestavit dělič kombinovaný.

2.1.1 Odporové děliče

Odporové děliče se používají především kvůli své jednoduchosti a tím pádem i nižším pořizovacím nákladům. Při měření rychlých přechodových dějů a impulsů ovšem může na odporovém děliči vzniknout poměrně velká chyba. [1]

Pro čistě odporový dělič jsou impedance Z_1 a Z_2 ve schématu (Obr. 1) a v rovnici (2.3) nahrazeny ideálními odpory R_1 a R_2 , z čehož vyplývá, že pro výstupní napětí odporového děliče platí rovnice

$$U_2 = R_2 \cdot \frac{U_1}{R_2 + R_1} \quad (2.4)$$

V případě nižších aplikovaných napětí (řádově jednotky kV) může vysokonapět'ová část děliče obsahovat jediný rezistor, ale při aplikaci vysokých napětí (řádově až MV) se vysokonapět'ová část skládá nejčastěji ze sériově zapojených rezistorů, kterých mohou být desítky nebo dokonce stovky.

2.1.2 Kapacitní děliče

Kapacitní děliče dosahují dobrých výsledků jak při měření pomalých, tak i rychlých jevů. Jejich nevýhodou je jejich pořizovací cena, která je u kvalitních kapacitorů vyšší než u rezistorů. [1]

Impedance Z_1 a Z_2 ve schématu (Obr. 1) a v rovnici (2.3) by v tomto případě byly nahrazeny kapacitami C_1 a C_2 . Rovnice pro výstupní napětí U_2 čistě kapacitního děliče má tedy tvar

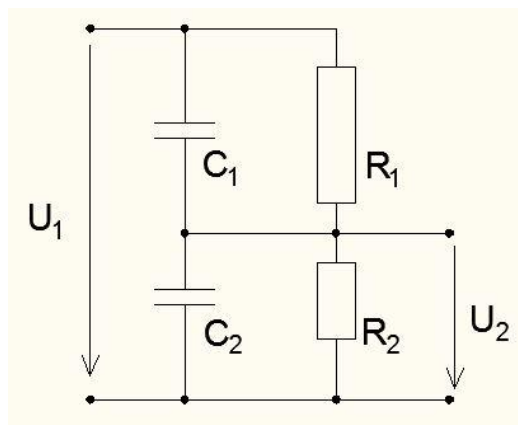
$$U_2 = C_1 \cdot \frac{U_1}{C_1 + C_2} \quad (2.5)$$

2.1.3 Indukční děliče

Indukční dělič je přístroj, který obsahuje jeden nebo více transformátorů. Jedná se například o přesné autotransformátory nebo dekadové dělicí transformátory tak jak je zmíněno v příslušné normě [15].

2.1.4 Kombinované děliče

Nejčastěji používané zapojení kombinovaného děliče je zakresleno na následujícím schématu.



Obr. 2 – Schéma zapojení kombinovaného děliče

Je patrné, že se v principu jedná o paralelní spojení kapacitního a odporového děliče. Prvky takto zapojeného děliče musí splňovat podmínku rovnosti časových konstant obou částí, musí tedy platit podmínka [2]:

$$C_1 \cdot R_1 = C_2 \cdot R_2 \quad (2.6)$$

Pro dosažení lepších výsledků při vysokých frekvencích je také nutné splnit podmínku rovnosti dělicích poměrů dílčího kapacitního a odporového děliče, tedy:

$$n = \frac{C_1 + C_2}{C_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (2.7)$$

Lze říci, že kombinované děliče se při pomalých jevech chovají jako odporové a při rychlých jevech jako kapacitní. [1]

2.2 Konstrukce standardního VN děliče

Vysokonapět'ové děliče bývají nejčastěji umístěny v izolační nádobě válcového tvaru a provozní poloha děliče bývá svislá (tedy nastojato). V takovémto případě se na jeho horním konci vyskytuje vysokonapět'ová elektroda a na jeho dolním konci zemnicí elektroda (Obr. 3). Rozměry děliče, tedy především jeho výška, jsou omezeny přeskokovým napětím mezi elektrodami, které je odvozeno od jmenovitého napětí děliče. Výška děliče se volí právě podle jmenovitého napětí děliče, a také podle charakteru napětí, které má být děličem měřeno. Na přeskokové napětí děliče má vliv také rozložení elektrického pole, a tedy především tvar vysokonapět'ové, horní, elektrody.



Obr. 3 – Standardní VN dělič [17]

Jak již bylo zmíněno výše, vzdálenost horní a dolní elektrody je odvozena nejen od velikosti přiváděného napětí, ale závisí také na jeho charakteru. Orientační vzdálenost elektrod v závislosti na charakteru napětí je uvedena v následující tabulce. [2]

Tab. 1 - Vzdálenost elektrod v závislosti na charakteru napětí

Charakter měřeného napětí	Orientační vzdálenost elektrod
Stejnoseměrné	2,5 až 3 m·MV ⁻¹
Střídavé	> 5 m·MV ⁻¹
Atmosférické přepětí	2 až 2,5 m·MV ⁻¹
Spínací impuls	> 4 m·MV ⁻¹

2.3 Vysokonapět'ové kapalinové děliče obecně

Nejčastěji používané odporové děliče užívají standardní rezistory. Ty jsou tvořeny navinutým odporovým drátkem nebo nanesením tenké vrstvy uhlíku nebo slitin kovů na izolační jádro (např. keramické). Při použití těchto standardních rezistorů může ovšem docházet k rezonanci, a to vlivem parazitních kapacit a vlastní indukčnosti. Při měření rychlých jevů také dochází ke změně velikostí těchto kapacit a indukčností vlivem skinefektu, což způsobuje zkreslení zaznamenaných průběhů¹. Další nevýhodou u tenkovrstvých rezistorů je to, že jsou konstruovány na poměrně malé jmenovité a krátkodobé výkony. Při jejich přetěžování tedy může dojít k jejich trvalé deformaci.

Výše zmíněné nedostatky mohou být částečně eliminovány, a to použitím rezistorů ve formě kapaliny, resp. vhodného roztoku. V této práci jsou jako kapalinové rezistory použity vodní roztoky síranu měďnatého (CuSO₄), chloridu amonného (NH₄Cl), thiosíranu sodného (Na₂S₂O₃) a nakonec chloridu sodného (NaCl), viz kapitola 2.6.

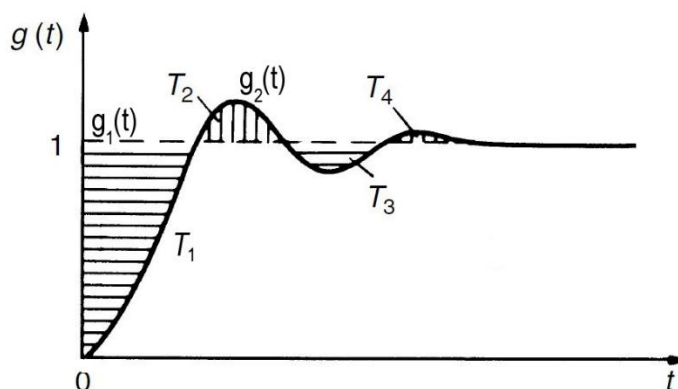
¹ Vlivem frekvenční závislosti rezistorů

2.4 Vliv kapacit a odporů na dobu odezvy kapalinového děliče

Doba odezvy děliče T_O na jednotkový skok je definována jako součet ploch, které vzniknou mezi průběhy reálného $g_2(t)$ a ideálního $g_1(t)$ přenosu a platí pro ni:

$$T_O = T_1 - T_2 + T_3 - T_4 \dots \quad (2.8)$$

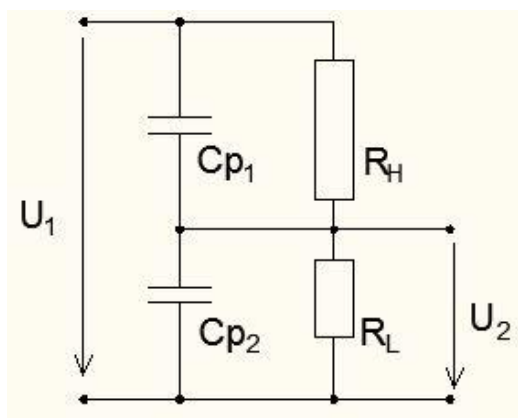
Situace je znázorněna na následujícím obrázku.



Obr. 4 – Doba odezvy děliče

Pokud by byl na čistě odporový dělič napětí přiveden jednotkový skok, na výstupu děliče by se okamžitě objevil tvarově shodný impuls a doba odezvy děliče by byla rovna nule.

Přestože je dělič nazýván čistě odporovým, vyskytují se v něm parazitní kapacity, které mají vliv na dobu odezvy děliče. Parazitní kapacity si lze představit jako kapacity paralelně připojené k vysokonapět'ovému odporu R_H , tedy kapacita C_{p1} , a nízkonapět'ovému odporu R_L , tedy kapacita C_{p2} , tak jak je znázorněno na následujícím obrázku.



Obr. 5 – Zapojení odporového děliče s uvažováním parazitních kapacit

Pokud bychom na vstupní svorky děliče přivedli skokové napětí² U_0 , bylo by výstupní napětí popsáno následující rovnicí [9]:

$$U(t) = U_0 \cdot \left(\frac{R_L}{R_H + R_L} \right) \cdot \left\{ 1 + \frac{R_H \cdot Cp_1 - R_L \cdot Cp_2}{R_L \cdot (Cp_1 + Cp_2)} \cdot e^{\left(-\frac{t}{t_e} \right)} \right\}, \quad (2.9)$$

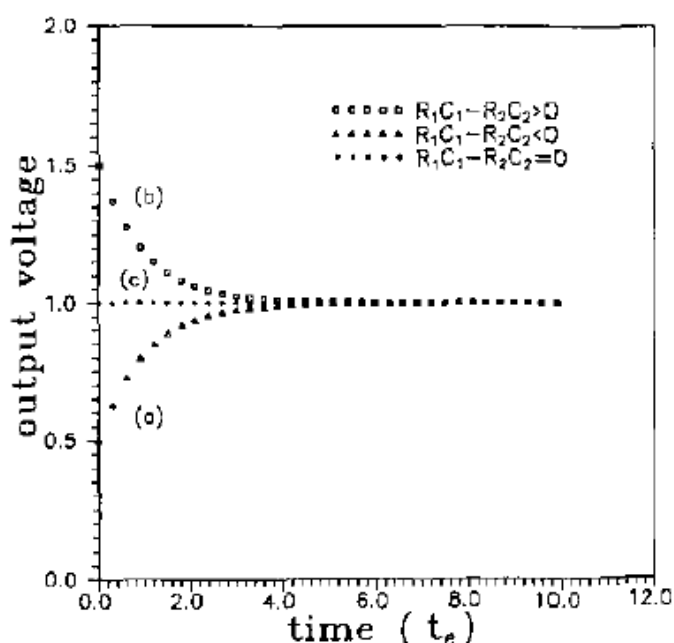
kde

$$t_e = \frac{R_H \cdot R_L}{R_H + R_L} \cdot (Cp_1 + Cp_2) \quad (2.10)$$

kde t_e je časová konstanta (s), která odpovídá času, za který se nabijí parazitní kapacity a na výstupu se tak ustálí požadované napětí. Dá se tedy mluvit o době odezvy. Pokud by byl pomocí děliče s dobou odezvy t_e měřen impuls s dobou čela t_c , která by byla menší než odezva děliče, tedy $t_c < t_e$, byl by přenos chybný a obraz na osciloskopu zkreslený. Pro přesné zkoumání rychlých přechodových dějů nebo impulsů je tedy zapotřebí použít děliče, jejichž odezva je co nejmenší.

V následujícím grafu jsou vykresleny 3 možné stavy, a to:

- a) $R_H \cdot Cp_1 - R_L \cdot Cp_2 > 0$,
- b) $R_H \cdot Cp_1 - R_L \cdot Cp_2 < 0$,
- c) $R_H \cdot Cp_1 - R_L \cdot Cp_2 = 0$.



Obr. 6 – Zpoždění děliče v závislosti na jeho parametrech [9]

Ideální je tedy případ c), kdy se na výstupu objeví převedené vstupní napětí bez zpoždění. Je to případ, kdy je dělič plně kompenzován. V praxi ovšem nelze přímo tohoto stavu dosáhnout, ale vhodnou konstrukcí a materiálem lze získat velmi rychlé odezvy.

² Napěťový impuls s nulovou dobou čela

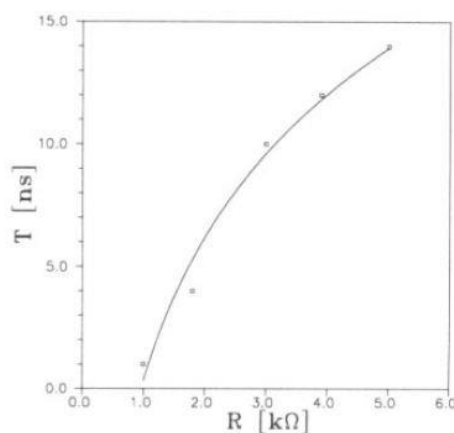
Ve většině reálných případů platí, že [7]

$$R_H \cdot Cp_1 \gg R_L \cdot Cp_2 \quad (2.11)$$

což v důsledku znamená, že doba odezvy je dána především odporem vysokonapět'ové části a jeho parazitní kapacity, tedy:

$$t_e \sim R_H \cdot Cp_1 \quad (2.12)$$

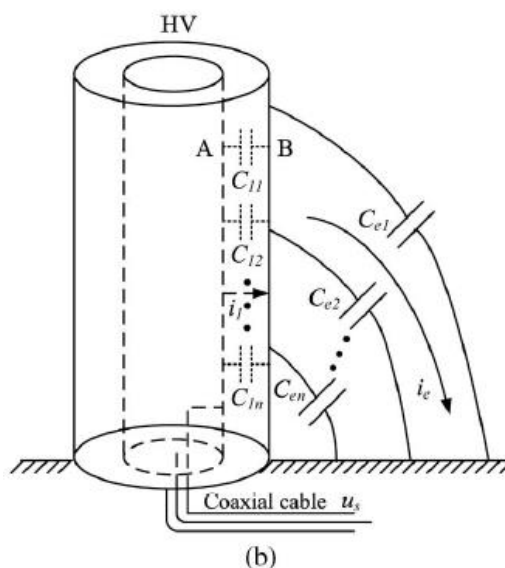
V následujícím grafu je vynesena závislost doby, za kterou skokové napětí dosáhne svého maxima v závislosti na velikosti odporu děliče, tento graf je prezentován v článku [9].



Obr. 7 – Vliv odporu děliče na dobu odezvy [9]

2.5 Stínění u kapalinového děliče

Stínicí elektroda může být u kapalinových děličů provedena pomocí stínicích kruhů nebo přidavnou odporovou vrstvou, čímž vznikne napět'ový dělič s koaxiálním uspořádáním. Princip funkce této vnější, stínicí vrstvy je znázorněn na obrázku (Obr. 8), kde C_{en} představuje parazitní kapacitu stínicí vrstvy k zemi a C_{in} parazitní kapacitu mezi vnitřní a vnější vrstvou. Proud i_e je kapacitní proud, který teče přes kapacity C_{en} z vnější vrstvy do země a i_l kapacitní proud mezi vnitřní a vnější vrstvou. Pokud je výška vnější (stínicí) a vnitřní (odporové) vrstvy děliče stejná, jsou stejné i potenciály v jednotlivých výškách a proud i_l je minimální. Na odezvu děliče má tedy vliv především proud i_e a tudíž parazitní kapacita C_{en} stínění vůči zemi. Tento druh stínění je použit v děliči 170 kV, který je popsán v článku [6], viz kapitola 5.1.



Obr. 8 – Stínění pomocí vnější kapalinové vrstvy [6]

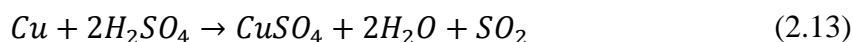
2.6 Použité chemické látky

Jak již bylo zmíněno výše, pokusy byly prováděny se čtyřmi roztoky, a to s roztokem síranu měďnatého, thiosíranu sodného, chloridu amonného a chloridu sodného. V následujících podkapitolách jsou jednotlivé roztoky, resp. chemické sloučeniny, stručně popsány. U každé ze sloučenin je také graf závislosti koncentrace jejího vodního roztoku na rezistivitě roztoku. Tyto grafy také sloužily při míchání roztoku pro samotné měření a jsou dostupné ze zdroje [13].

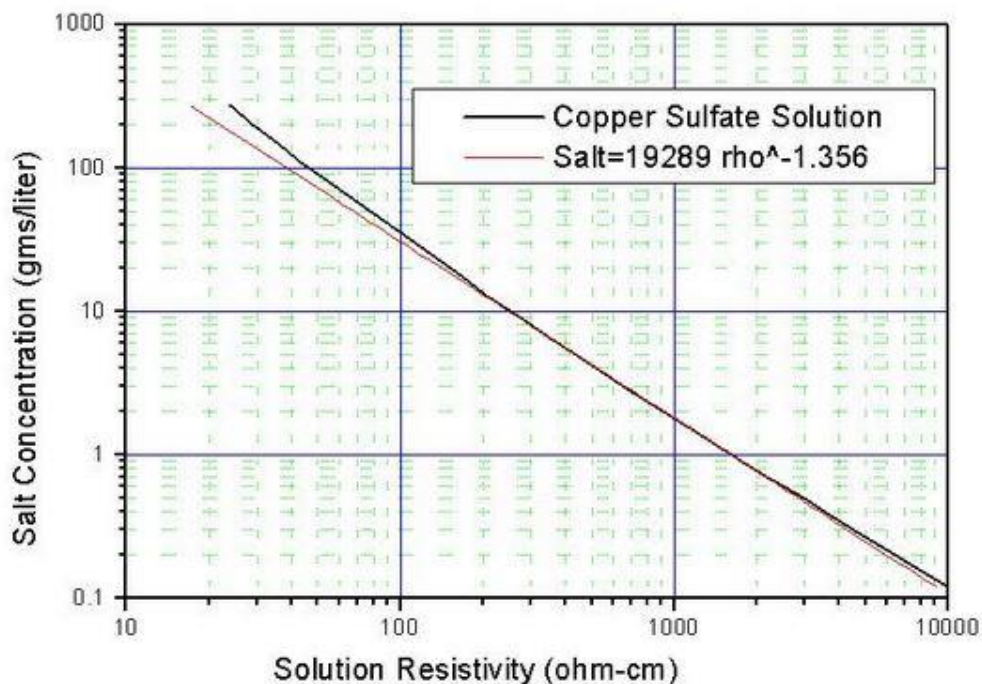
2.6.1 Síran měďnatý

Síran měďnatý patří k nejběžnějším sloučeninám mědi a jedná se o průmyslově nejprodukovnější měďnatou sůl. Vzorec síranu měďnatého je CuSO_4 . Na trhu se objevuje s různými stupni hydratace, přičemž asi nejznámější je tzv. pentahydrát síranu měďnatého, tedy $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Tento pentahydrát je také znám pod názvem modrá skalice, a to díky svému čistě modrému zbarvení. Naopak čistý, resp. nehydratovaný, CuSO_4 má světle šedou barvu.

Průmyslově se síran měďnatý vyrábí rozpouštěním čisté mědi nebo oxidu měďnatého v kyselině sírové podle rovnice:



Hustota modré skalice je $2,286 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, bod tání je $110 \text{ }^\circ\text{C}$ a rozpustnost ve vodě $20,5 \text{ g}$ na 100 ml při $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Závislost koncentrace vodního roztoku síranu měďnatého na rezistivitě roztoku je vynesena na následujícím grafu.



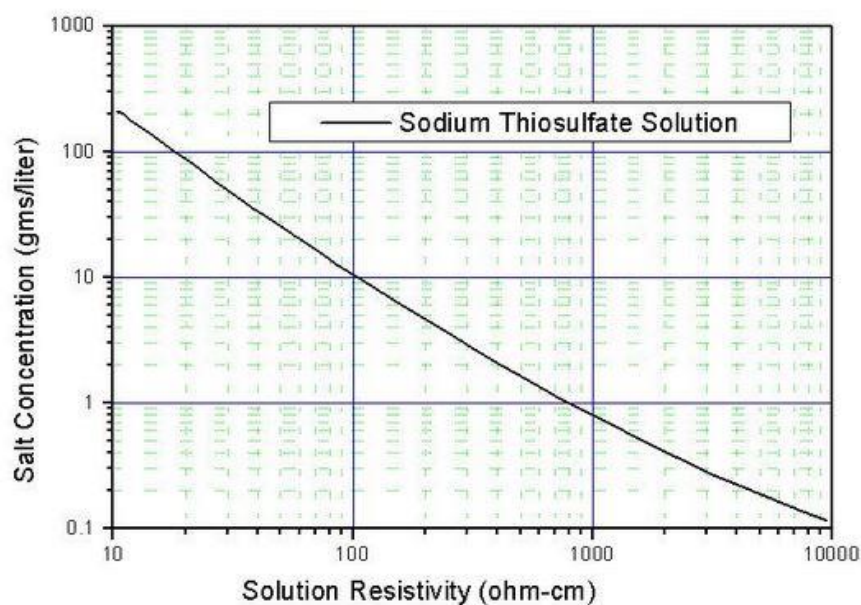
Obr. 9 – Závislost koncentrace na rezistivitě - CuSO_4 [13]

2.6.2 Thiosíran sodný

Vzorec thiosíranu sodného je $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ a jedná se o sůl kyseliny thiosírové. Vyrábí se rozpouštěním síry ve vodním roztoku siřičitanu sodného, podle rovnice:



V této práci byl použit pentahydrát thiosíranu sodného, který má hustotu $1,756 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, teplotu tání $40 \text{ }^\circ\text{C}$ a jeho rozpustnost ve vodě je $75,9 \text{ g}$ na 100 ml vody při $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Závislost koncentrace na rezistivitě vodního roztoku je vynesena v následujícím grafu.



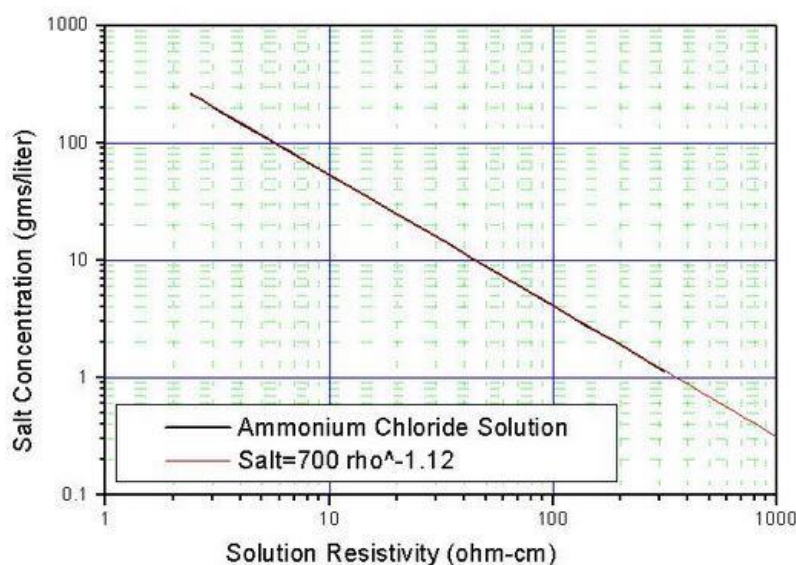
Obr. 10 – Závislost koncentrace na rezistivitě – $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ [13]

2.6.3 Chlorid amonný

Chlorid amonný je také znám pod názvem salmiak. Vzorec salmiaku je NH_4Cl . Průmyslově se salmiak vyrábí reakcí amoniaku s kyselinou chlorovodíkovou.



Má hustotu $1,527 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, teplotu tání $340 \text{ }^\circ\text{C}$ a jeho rozpustnost ve vodě je $37,14 \text{ g}$ na 100 ml vody při $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Závislost koncentrace na rezistivitě vodního roztoku je vynesena v následujícím grafu.

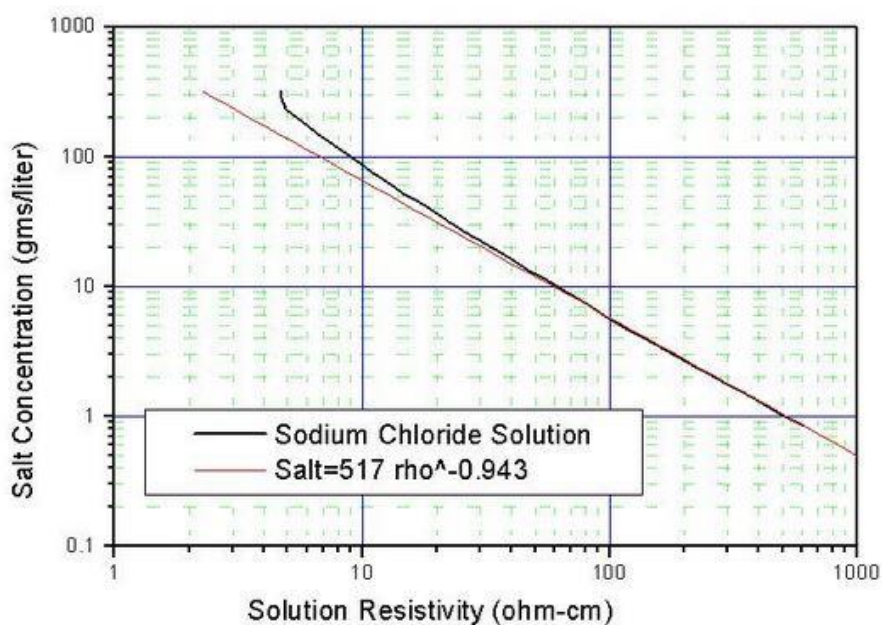


Obr. 11 – Závislost koncentrace na rezistivitě - NH_4Cl [13]

2.6.4 Chlorid sodný

Chemický vzorec chloridu sodného je NaCl. Chlorid sodný se, oproti předchozím chemickým sloučeninám, ve větší míře průmyslově nevyrábí. Chlorid sodný je znám jako kuchyňská sůl a je těžen z nerostu zvaného halit. V této práci byla použita jodizovaná sůl, která lze zakoupit v běžném obchodu s potravinami. Jodizovaná sůl obsahuje kromě samotného chloridu sodného také jodid draselný nebo jodičnan draselný. Zřejmou výhodou použití kuchyňské soli je její velmi nízká cena.

Hustota soli je $2,163 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, teplota tání je $801 \text{ }^\circ\text{C}$ a její rozpustnost ve vodě je $35,86 \text{ g}$ na 100 ml vody při $20 \text{ }^\circ\text{C}$.



Obr. 12 – závislost koncentrace na rezistivitě – NaCl [13]

3 Problematika konstrukce VN děličů

3.1 Vedení elektrického proudu roztokem

Vodiče jako takové lze dle způsobu, jakým vedou elektrický proud rozdělit na dvě základní skupiny, a to na vodiče 1. a 2. řádu.

3.1.1 Vodiče 1. řádu

U vodičů 1. řádu je přenos elektrického náboje zprostředkován pohybujícími se volnými elektrony, které byly uvolněny z elektronových obalů atomů. Mezi tyto vodiče se řadí především kovy a uhlík, resp. grafit. Důležitou vlastností těchto vodičů je to, že se průchodem elektrického proudu nemění jejich chemické vlastnosti.

3.1.2 Vodiče 2. řádu

Zde je přenos náboje zprostředkován pohybujícími se elektricky nabitými ionty. Vodiče 2. řádu jsou zastoupeny tzv. elektrolyty. Elektrolyty jsou elektricky vodivé roztoky, které vznikají rozpouštěním sloučenin s iontovou vazbou v polárních rozpouštědlech. Rozpouštědla jsou v tomto případě nejčastěji zastoupena destilovanou H₂O nebo anorganickými kyselinami. Tento jev se nazývá elektrolytická disociace, a v podstatě jde o to, že se molekuly rozpouštědla natačejí k iontům na povrchu mřížky tak, že oslabují vazební síly mezi ionty, které jsou následně uvolňovány do roztoku.

Elektrolyty mohou být také elektricky vodivé taveniny, které vzniknou tzv. termickou disociací. Látce s iontovou mřížkou je při tomto procesu dodáváno teplo, které zvýší kinetickou energii vázaných iontů. Je-li tato energie dostatečně velká, dochází k uvolňování iontů z mřížky.

Takto uvolněné ionty jsou elektricky nabitě, a jedná se tedy o kladně nabitě kationty a záporně nabitě anionty.

Kapalné elektrolyty lze dále dělit na dvě skupiny, a to:

- a) **Silné elektrolyty**, u kterých disociace proběhla zcela a obsahují tedy pouze ionty.
- b) **Slabé elektrolyty**, které obsahují jak ionty, tak nedisociované, neutrální molekuly.

V porovnání s vodiči 1. řádu je elektrická vodivost těchto vodičů nižší, a to kvůli výše zmiňovaným iontům. Ty jsou totiž větší a těžší než elektrony, čímž je omezena rychlost jejich pohybu.

3.1.3 Elektrický odpor a vodivost

Základní vlastností vodičů, ať už 1. nebo 2. řádu, je jejich elektrická vodivost, resp. odpor. Tyto parametry udávají schopnost vodiče vést elektrický proud, přičemž platí, že:

$$R = \frac{1}{G} = \frac{U}{I} \quad (3.1)$$

kde R je elektrický odpor (Ω),
 G elektrická vodivost (S).

V praxi se ale používají spíše poměrné jednotky a zavádí se tedy měrný odpor, resp. měrná vodivost, pro které platí:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}, \gamma = \frac{G \cdot l}{S} \quad (3.2)$$

kde ρ je měrný odpor ($\Omega \cdot \text{m}$),
 γ měrná vodivost neboli konduktivita ($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$).

3.2 Základní pojmy elektrochemie

Protože je v sestaveném děliči využíváno elektricky vodivých roztoků, je, pro snazší pochopení problematiky, nutné uvést několik základních pojmů z oboru elektrochemie. Těmito pojmy jsou molární koncentrace, molární vodivost, stupeň disociace a rozpustnost.

3.2.1 Molární koncentrace

Molární koncentrace je velice důležitou veličinou v oblasti roztoků protože číselně charakterizuje jejich chemické složení. Udává jaké látkové množství rozpouštěné látky je obsaženo v daném objemu roztoku, a platí pro ni vztah:

$$c = \frac{n}{V} = \frac{\frac{m}{M}}{V} = \frac{m}{M \cdot V} \quad (3.3)$$

kde c je molární koncentrace ($\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$),
 n látkové množství (mol),
 V objem roztoku (dm^{-3}),
 m hmotnost rozpouštěné látky (kg),
 M molární hmotnost rozpouštěné látky ($\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$).

Obecně lze říci, že pro vodiče 2. řádu je tím uživanějším parametrem jejich konduktivita, v tomto případě nazývaná elektrolytická konduktivita. Elektrolytická konduktivita při dané teplotě je funkcí koncentrace elektrolytu.

Pro silné elektrolyty platí, že s rostoucí koncentrací roste poměrně prudce i vodivost elektrolytu, avšak pouze do určité hodnoty koncentrace. Po překročení určité kritické hodnoty koncentrace elektrolytu naopak začíná vodivost prudce klesat vlivem působení elektrostatických sil. Ty způsobují zpomalování pohybu iontů, což prakticky znamená právě pokles vodivosti. Naopak u slabých elektrolytů je závislost vodivosti na koncentraci poměrně malá.

3.2.2 Molární vodivost a stupeň disociace

Molární vodivost je další důležitou veličinou v oboru elektrochemie. Závisí na koncentraci roztoku a na teplotě a lze ji vypočítat jako poměr měrné vodivosti roztoku a molární koncentrace:

$$\lambda = \frac{\gamma}{c} \quad (3.4)$$

kde λ je molární vodivost ($\text{S}\cdot\text{m}^2\cdot\text{mol}^{-1}$)

Z rovnice (3.4) je zřejmé, že molární vodivost roztoku klesá s jeho rostoucí koncentrací. Svě nejvyšší hodnoty nabývá molární vodivost při tzv. nekonečném zředění, tedy při stavu kdy $c \approx 0$. Taková hodnota je označována λ_0 . Hodnota λ_0 elektrolytu je součtem molární vodivosti kationtů a aniontů při nekonečném zředění, tedy $\lambda_0 = \lambda_0^+ + \lambda_0^-$, přičemž hodnoty limitních molárních vodivostí jednotlivých iontů jsou tabelovány.

Dále se zavádí tzv. disociační stupeň pro slabé elektrolyty, pro který platí:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\lambda_0} \quad (3.5)$$

Postupným odvozením lze získat vztah pro Ostwaldův zředovací zákon, který umožňuje výpočet velikosti disociační konstanty kyseliny nebo zásady na základě její molární vodivosti a má tvar [14]:

$$K = \frac{c \cdot \lambda^2}{\lambda_0(\lambda_0 - \lambda)} \quad (3.6)$$

kde K je disociační konstanta (-), která je další charakteristickou vlastností látek.

3.2.3 Rozpustnost

Rozpustnost je charakteristickou vlastností dané látky a vyjadřuje koncentraci jejího nasyceného roztoku v daném rozpouštědle při daném tlaku a teplotě. Jednotkou rozpustnosti je $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ nebo $\text{mol}\cdot\text{l}^{-1}$. U většiny látek lze přitom sledovat, že s rostoucí teplotou roste i jejich rozpustnost. Pro určení rozpustnosti málo rozpustných látek v polárních rozpouštědlech, nejčastěji ve vodě, se zavádí další veličina, a tou je tzv. součin rozpustnosti.

3.3 Stínění

Jak vyplývá z kapitoly 6, rezistory nízkonapěťové části děliče jsou uloženy ve stínící krabici. V této kapitole je tedy uvedeno proč stínění použít a proti jakým druhům rušení stínění slouží.

Stínění je prostředkem pro potlačení rušivých vlivů okolí, lépe řečeno parazitních vazeb³, na elektrotechnické zařízení. Na druhou stranu stínění slouží také k zabránění šíření

³ Parazitních vazeb induktivních a kapacitních

elektromagnetické energie do okolí. Z toho vyplývá, že lze ke stínění přistupovat dvěma způsoby, a to tak, že je stíněn buď chráněný objekt, nebo naopak zdroj rušení.

Podle druhu rušivého pole a stínícího materiálu lze rozlišovat 3 základní druhy stínění, a to elektromagnetické, elektrostatické a magnetostatické.

3.3.1 Elektromagnetické stínění

Využívá vzniku vířivých proudů v materiálu stínění. Tyto vířivé proudy vytvářejí své vlastní magnetické pole, jehož směr je opačný oproti směru rušivého pole, takže dochází k jeho oslabování, resp. vytlačování. Už z principu funkce tohoto stínění je patrné, že je vhodné pouze pro stínění střídavých magnetických polí s vyššími frekvencemi (tak aby došlo k indukování vířivých proudů ve stínění). Právě kvůli těmto vířivým proudům je vhodné stínící prostředky uzemňovat.

Přípravek pro elektromagnetické stínění lze vytvořit z jakéhokoli diamagnetického materiálu, přičemž se nejvíce používá hliník nebo měď.

3.3.2 Elektrostatické stínění

Elektrostatické stínění se využívá k potlačení parazitní kapacitní vazby. Pro takovéto stínění je vhodný prakticky kterýkoli elektricky vodivý materiál. Pro správnou funkci tohoto stínění je nezbytné, aby bylo uzemněno a naindukovaný náboj tak mohl být neutralizován.

3.3.3 Magnetostatické stínění

Pro magnetostatické stínění jsou využívány feromagnetické materiály, a to kvůli jejich vysoké reluktanci (magnetické vodivosti). Toto stínění je určeno pro tlumení stejnosměrných a střídavých rušivých magnetických polí s nízkým kmitočtem. Takové rušení je pak z velké části pohlceno stíněním a neprojde k chráněnému objektu.

3.3.4 Hodnocení kvality stínění

Kvalitu stínění jako takového lze ohodnotit například tzv. koeficientem stínění (S), který udává poměr intenzity magnetického pole vně (H_o) a uvnitř (H_i) stínícího krytu.

$$S = \frac{H_o}{H_i} \quad (3.7)$$

V praxi se k hodnocení kvality stínění využívá také tzv. stínící útlum, který v decibelech udává útlum rušivého magnetického pole.

$$b = 20 \cdot \log(S) = 20 \cdot \log\left(\frac{H_o}{H_i}\right) \quad (3.8)$$

Při výpočtech se reálné tvary stínění aproximují jednoduššími uspořádáními (dvě rovnoběžné nekonečné desky, nekonečně dlouhý dutý válec, dutá koule) čímž samozřejmě vznikají, v závislosti na reálné podobě stínění, menší či větší nepřesnosti. Obecně lze ale říci, že daleko větší vliv na stínění, než jeho tvar, má materiál, ze kterého je stínění vyrobeno.

3.4 Odrazy vln a impedanční přizpůsobení napět'ového děliče

Pro přenos signálu z děliče do osciloskopu se nejčastěji používá koaxiálního kabelu, a to především kvůli jeho stínícím schopnostem. Základní vlastností takového kabelu je jeho vlnová neboli charakteristická impedance, která se nejčastěji značí Z_0 a lze ji spočítat dle rovnice:

$$Z_0 = \frac{Z_p}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) \quad (3.9)$$

kde Z_p je impedance volného prostředí, přičemž $Z_p = 120 \cdot \pi$,
 ϵ_r relativní permitivita dielektrika použitého v kabelu,
 D průměr vnějšího vodiče,
 d průměr vnitřního vodiče.

Vlnová impedance daného kabelu lze spočítat také podle vzorce

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (3.10)$$

kde R je elektrický odpor na jednotku délky (Ω/m),
 G elektrická vodivost na jednotku délky (S/m),
 L indukčnost na jednotku délky (H/m),
 C kapacita na jednotku délky (F/m).

Protože lze uvažovat prakticky bezeztrátový kabel, tedy $R = G = 0$, lze rovnici (3.10) postupně upravit na následující tvar:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (3.11)$$

z čehož vyplývá, že lze vlnovou impedanci koaxiálního kabelu považovat za čistě odporovou. Standardizované hodnoty vlnových impedancí pro koaxiální kabely jsou 50, resp. 75 Ω . [5]

Rychlost šíření vln v kabelu lze vypočítat dle následující rovnice:

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \approx \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r}} \quad (3.12)$$

kde μ_0 je permeabilita vakua ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$),
 ϵ_0 permitivita vakua ($\approx 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$).

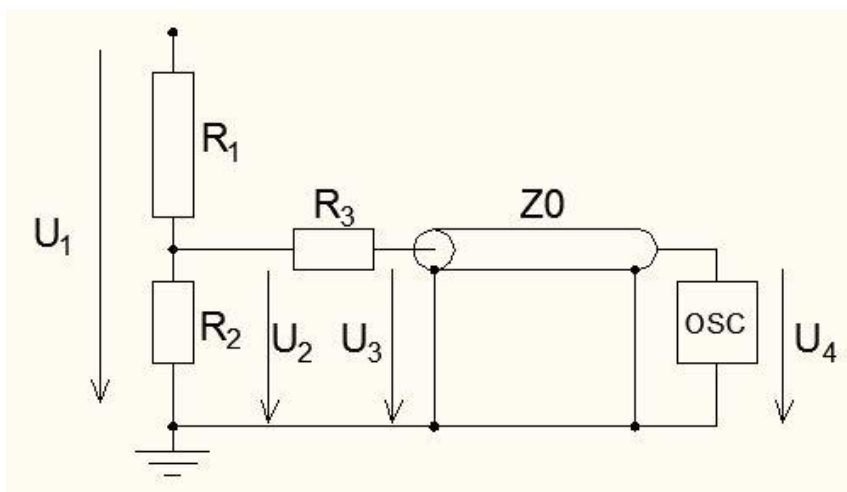
Přizpůsobovací impedance lze k přenosovému kabelu umístit třemi základními způsoby, a to buď:

- a) na vstup kabelu,
- b) na výstup kabelu,
- c) na vstup i výstup kabelu.

Umístění těchto rezistorů má vliv na naměřené napětí, jak je odvozeno v následujících podkapitolách. [4, 5]

3.4.1 Přizpůsobovací impedance na vstupu kabelu

Schéma takového uspořádání je na následujícím obrázku, kde R_3 představuje odpor přizpůsobovací impedance.



Obr. 13 – Přizpůsobovací impedance na vstupu kabelu

Aby byl obvod plně přizpůsoben, musí platit podmínka

$$Z_0 = R_3 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}. \quad (3.13)$$

Protože ale ve většině případů platí, že $R_1 \gg R_2$, tak lze vztah (3.13) upravit do podoby

$$Z_0 = R_3 + R_2. \quad (3.14)$$

Pro další odvození je nutné zavést vztah pro impedanci nízkonapěťové části děliče, která bude značena Z_1 a bude pro ni platit

$$Z_1 = R_2 || (R_3 + Z_0) = \frac{R_2 \cdot (R_3 + Z_0)}{R_2 + R_3 + Z_0} = \frac{R_2 \cdot (R_3 + Z_0)}{2 \cdot Z_0}. \quad (3.15)$$

Pro napětí U_2 přímo na rezistoru R_2 děliče platí

$$U_2 = \frac{Z_1 \cdot U_1}{R_1 + Z_1} = \frac{R_2 \cdot (R_3 + Z_0) \cdot U_1}{2 \cdot Z_0 \cdot (R_1 + Z_1)} \quad (3.16)$$

a pro napětí U_3 na vstupu kabelu

$$U_3 = \frac{Z_0 \cdot U_2}{R_3 + Z_0} = \frac{Z_0}{R_3 + Z_0} \cdot \frac{R_2 \cdot (R_3 + Z_0) \cdot U_1}{2 \cdot Z_0 \cdot (R_1 + Z_1)} = \frac{R_2 \cdot U_1}{2 \cdot (R_1 + Z_1)}. \quad (3.17)$$

Vlna tedy projde na konec kabelu, kde se vlivem, teoreticky, nekonečně velké impedance osciloskopu odrazí. Napětí na konci kabelu U_4 , tedy napětí zachycené osciloskopem, se jeví, co do velikosti, dvojnásobné. Pro velikost U_4 platí vztah

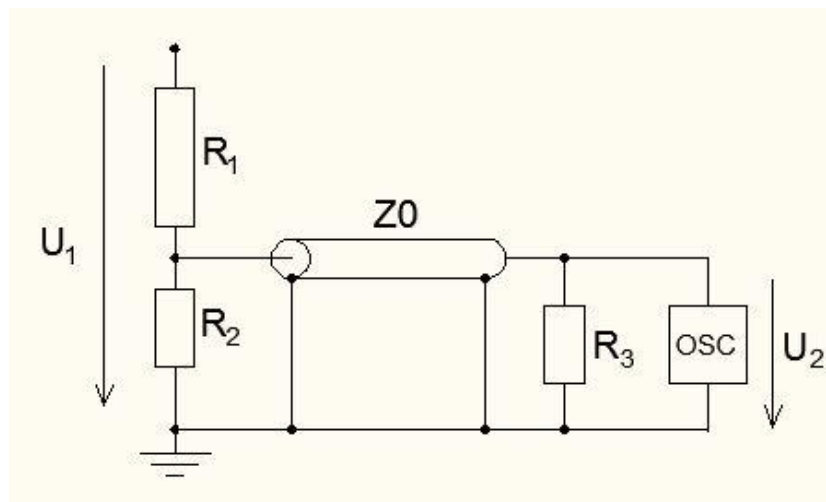
$$U_4 = 2 \cdot U_3 = \frac{R_2 \cdot U_1}{R_1 + Z_1}. \quad (3.18)$$

Odražená vlna se vrací zpět ke vstupu kabelu, a protože platí vztah (3.14), již není odražena zpět ke konci, ale je plně absorbována rezistory R_2 a R_3 .

Rovnice (3.18) lze ještě dále upravit. Z rovnice (3.14) vyplývá, že $R_2 < Z_0$, a jelikož je Z_1 paralelní kombinací R_2 a $(R_3 + Z_0)$, tak musí platit $Z_1 < R_2$. Protože $R_1 \gg R_2$, tak R_1 je zároveň o mnoho větší než Z_1 a tudíž $Z_1 + R_1 \approx R_1$. Rovnice (3.18) poté nabývá tvaru

$$U_4 = \frac{R_2 \cdot U_1}{R_1} = \frac{R_2 \cdot U_1}{R_1 + R_2}. \quad (3.19)$$

3.4.2 Přizpůsobovací impedance na výstupu kabelu



Obr. 14 – Přizpůsobovací impedance na výstupu kabelu

V tomto případě je na výstupu koaxiálního kabelu připojen rezistor R_3 , pro který platí $R_3 = Z_0$. Takto zapojený rezistor způsobí, že se vlna na konci kabelu neodrazí, ale je naopak plně přenesena do rezistoru R_3 . Nyní je opět výhodné zavést náhradní impedanci Z_1 , a pomocí ní také celkový proud, který do děliče vstupuje.

$$Z_1 = R_1 + \frac{Z_0 \cdot R_2}{Z_0 + R_2} = \frac{R_1 \cdot (Z_0 + R_2) + Z_0 \cdot R_2}{Z_0 + R_2} \quad (3.20)$$

$$I = \frac{U_1}{Z_1} = \frac{U_1 \cdot (Z_0 + R_2)}{R_1 \cdot (Z_0 + R_2) + Z_0 \cdot R_2} \quad (3.21)$$

Pro napětí U_2 poté při známém proudu děličem I platí:

$$\begin{aligned}
 U_2 = I \cdot (R_2 || Z_0) &= \frac{I \cdot R_2 \cdot Z_0}{Z_0 + R_2} = \frac{U_1 \cdot (Z_0 + R_2)}{R_1 \cdot (Z_0 + R_2) + Z_0 \cdot R_2} \cdot \frac{R_2 \cdot Z_0}{Z_0 + R_2} \\
 &= \frac{U_1 \cdot R_2 \cdot Z_0}{R_1 \cdot (Z_0 + R_2) + Z_0 \cdot R_2} = \frac{U_1 \cdot R_2 \cdot Z_0}{(R_1 + R_2) \cdot Z_0 + R_1 \cdot R_2} \quad (3.22) \\
 &= \frac{U_1 \cdot R_2}{(R_1 + R_2) + \frac{R_1 \cdot R_2}{Z_0}}
 \end{aligned}$$

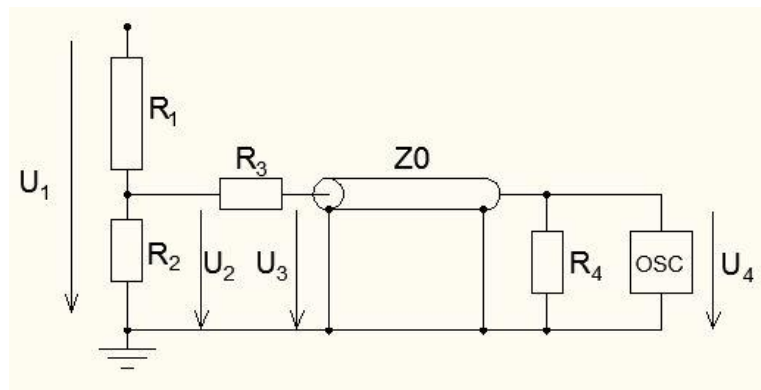
A protože lze tvrdit, že $Z_0 \approx R_2$, tak pro napětí U_2 platí vztah

$$U_2 = \frac{R_2 \cdot U_1}{2 \cdot R_1 + R_2}. \quad (3.23)$$

Z porovnání rovnic (3.18) a (3.23) vyplývá, že jsou při zapojení přizpůsobovací impedance na výstup koaxiálního kabelu na osciloskopu zachyceny nižší hodnoty napětí než při zapojení rezistoru na vstup kabelu.

3.4.3 Přizpůsobovací impedance na vstupu i výstupu kabelu

V tomto případě jsou přizpůsobovací impedance zapojeny na obou koncích kabelu, a jedná se tedy o kombinaci předešlých řešení. Takto provedené zapojení je schematicky zakresleno na následujícím obrázku.



Obr. 15 – Přizpůsobovací impedance na vstupu i výstupu kabelu

V obvodu nedochází k odrazu vlny ani na jednom konci kabelu. Toto zapojení je tedy vhodné především tam, kde je kladen požadavek na minimální zkreslení způsobené koaxiálním kabelem.

Stejně tak jako v předchozích případech je pro správné přizpůsobení nutné, aby byly splněny podmínky na obou koncích kabelu, tedy aby platilo

- a) $R_2 + R_3 = Z_0$,
- b) $R_4 = Z_0$.

Opět je zde zavedena dílčí impedance Z_1 , pro kterou platí

$$Z_1 = R_2 || (R_3 + Z_0) = \frac{R_2 \cdot (R_3 + Z_0)}{R_2 + R_3 + Z_0} = \frac{R_2 \cdot (R_3 + Z_0)}{2 \cdot Z_0}, \quad (3.24)$$

z čehož vyplývá, že pro napětí U_2 (dle schématu na Obr. 15) platí

$$U_2 = \frac{Z_1 \cdot U_1}{R_1 + Z_1} = \frac{R_2 \cdot (R_3 + Z_0) \cdot U_1}{2 \cdot Z_0 \cdot (R_1 + Z_1)}. \quad (3.25)$$

Napětí U_3 na vstupu kabelu je zmenšeno o úbytek na rezistoru R_3 podle následující rovnice

$$U_3 = \frac{Z_0 \cdot U_2}{R_3 + Z_0} = \frac{Z_0}{R_3 + Z_0} \cdot \frac{R_2 \cdot (R_3 + Z_0) \cdot U_1}{2 \cdot Z_0 \cdot (R_1 + Z_1)} = \frac{R_2 \cdot U_1}{2 \cdot (R_1 + Z_1)}. \quad (3.26)$$

A protože nedochází na koncích kabelu k žádným odrazům, platí následující:

$$U_3 = U_4 = \frac{R_2 \cdot U_1}{2 \cdot (R_1 + Z_1)}. \quad (3.27)$$

3.5 Skinefekt

Při průchodu střídavého proudu vodičem, vytváří tento proud časově proměnný magnetický tok. Ten zpětně ve vodiči indukuje tzv. vířivé proudy, které způsobují „vytlačení“ proudu vodičem k jeho povrchu. Mění se tedy efektivní průřez vodiče a tím i jeho odpor.

Pro popis tohoto jevu se využívá tzv. hloubky vniku, která udává vzdálenost od povrchu vodiče, kde proudová hustota klesne na hodnotu J_δ , která je dána následujícím vztahem:

$$J_\delta = \frac{1}{e} J_{povrch}. \quad (3.28)$$

Hodnota hloubky vniku lze vypočítat dle rovnice:

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\omega \cdot \mu}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}}, \quad (3.29)$$

kde δ je hloubka vniku (m),
 ρ rezistivita materiálu ($\Omega \cdot m$),
 μ absolutní magnetická permeabilita ($H \cdot m^{-1}$).

Proudová hustota ve vzdálenosti d (m) od povrchu vodiče je dána vztahem:

$$J = J_{povrch} \cdot e^{-d/\delta} . \quad (3.30)$$

3.5.1 Eliminace vlivu skin efektu v kapalinovém děliči

Ke snížení nebo dokonce k eliminaci vlivu skin efektu při měření přechodných jevů nebo střídavých průběhů, je do středu nádoby umístěna izolační tyč. Tato izolační tyč zmenší velikost plochy kapalinového rezistoru, čímž se i při vysoké frekvenci, tedy při malé hodnotě hloubky vniku, omezí vliv nerovnoměrné proudové hustoty. Frekvenční závislost kapalinového rezistoru se touto úpravou téměř eliminuje.

4 Problematika impulsních napětí

Protože má být navrhovaný dělič vhodný k měření rychlých přechodových jevů, je nutné popsat jejich základní typy.

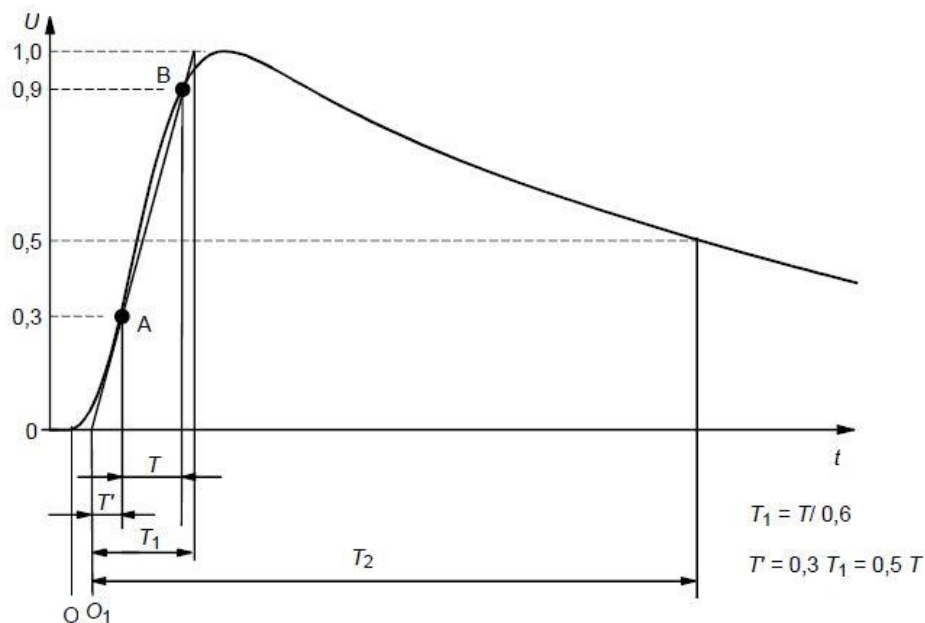
V sítích, ať už přenosových nebo distribučních, mohou vzniknout dva základní druhy přepětí, a to atmosférické a spínací. Toto přepětí se následně šíří od místa svého vzniku v podobě vlny, jejíž parametry jsou určeny jejím původem.

4.1 Atmosférické přepětí

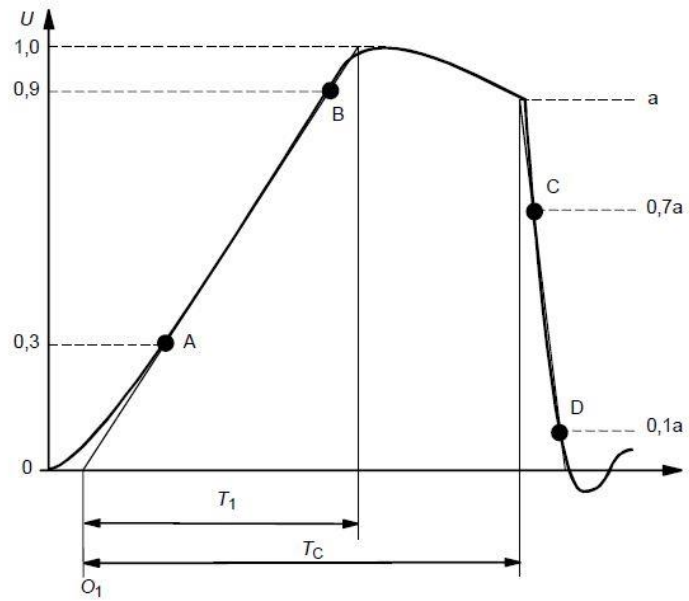
Prvním druhem napěťového impulsu je tzv. atmosférický impuls. Ten vznikne úderem blesku do fázových vodičů, do zemnicích lan nebo do stožárů. Atmosférické přepětí může vzniknout také úderem blesku do blízkosti vedení, v takovém případě hovoříme o nepřímém úderu. Amplituda takových impulsů je obvykle velmi vysoká, řádově i jednotky MV a je nezávislá na jmenovitém napětí vedení. Takový napěťový impuls je samozřejmě spojen i se zvýšeným proudem, který může následně dosahovat velikosti až stovky kA. Atmosférický impuls se následně šíří po vedení na obě strany ve formě vlny. Tvar vln je ovlivněn především elektrickou pevností izolačních systémů. Příliš vysoké napětí vlny může totiž způsobit přeskok na izolátoru, což ovlivní tvar vlny, tak jak je uvedeno v následující podkapitole.

4.1.1 Tvar vlny atmosférického přepětí

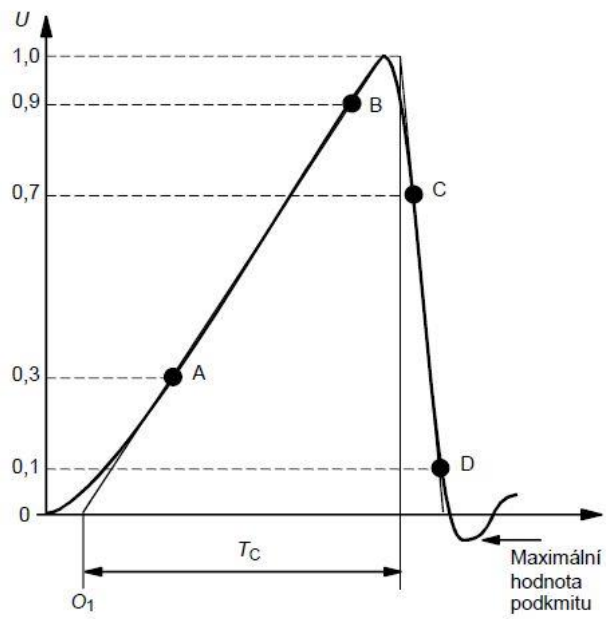
Na následujících průbězích jsou popsány jednotlivé části napěťového impulsu. Na prvním průběhu je vyobrazen plný (tedy nepřerušovaný) napěťový impuls. Na 2. a 3. průběhu je pak vyobrazena kusá rázová vlna. Ta vznikne přeskokem nebo průrazem, což způsobí rychlý pokles napětí k hodnotě blízké nule. K přeskoku nebo průrazu může dojít ve třech pozicích. Vlna je tedy useknuta při nárůstu napětí, tedy v čele (Obr. 18), ve vrcholu nebo při poklesu napětí, tedy v týlu (Obr. 17).



Obr. 16 – Plný atmosférický impuls [16]



Obr. 17 – Atmosférický impuls useknutý v týlu [16]



Obr. 18 – Atmosférický impuls useknutý v čele [16]

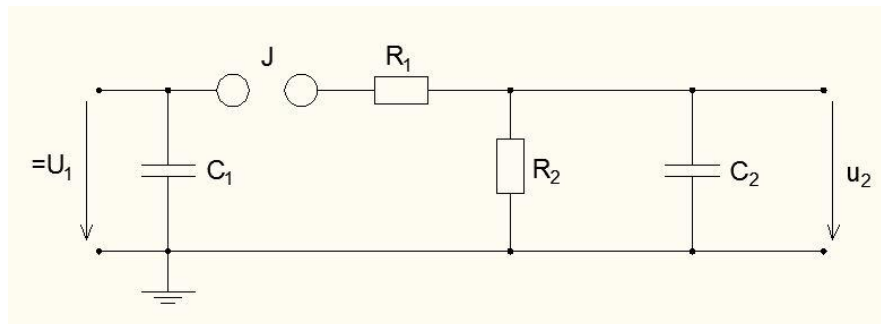
Tab. 2 – Vysvětlení jednotlivých časů T

Označení	Popis
T	Čas, za který vlna naroste z 30 % na 90 % U .
T_1	Doba čela, přičemž $T_1 = 1,67 \cdot T$.
T_2	Doba půltýlu, odpovídá času od zdánlivého počátku vlny (bod O_1) do 50 % U při jeho poklesu.
T'	$0,3 \cdot T_1 = 0,5 \cdot T$
T_C	Doba useknutí, odpovídá času od zdánlivého počátku vlny (bod O_1) do bodu useknutí vlny vlivem překoku.

Normalizovaný atmosférický impuls má dobu čela $T_1 = 1,2 \mu\text{s} \pm 30\%$ a dobu půltýlu $T_2 = 50 \mu\text{s} \pm 20\%$ a je tedy označován jako impuls 1,2/50.

4.1.2 Rázový generátor

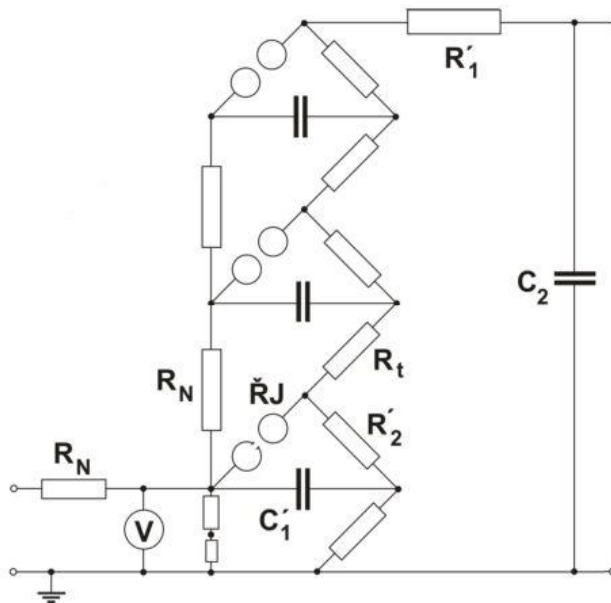
Pro simulaci atmosférických impulsů v laboratořích, jsou používány tzv. rázové generátory. Schéma zapojení jednostupňového rázového generátoru je na následujícím obrázku.



Obr. 19 – Schéma zapojení jednostupňového RG

Generátor je tedy tvořen dvěma kondenzátory a dvěma rezistory. Kondenzátor C_1 se nazývá činný a C_2 zatěžovací. Rezistor R_1 čelní a R_2 týlní. Kondenzátor C_1 je nabíjen stejnosměrným zdrojem napětí U_1 . Po dosažení dostatečně velkého napětí dojde k přeskoku na jiskřišti a kondenzátor C_1 se vybije do obvodu R_1 , R_2 a C_2 . Tvar výsledné rázové vlny je dán právě parametry prvků tohoto zatěžovacího obvodu. Tvar týlu vlny je dán velikostí R_2 , tedy proudem tímto odporem, a tvar čela vlny je ovlivněn velikostí R_1 a C_2 .

Z výše popsaného principu vyplývá, že amplituda výsledné rázové vlny je omezena maximálním napětím stejnosměrného zdroje na vstupu generátoru. Pro vysokonapěťové impulsy je proto používán vícestupňový rázový generátor. Schéma zapojení takového generátoru je na následujícím obrázku.



Obr. 20 – Schéma zapojení třístupňového RG

V tomto případě jsou kondenzátory C_1' nabíjeny napětím U_1 přes nabíjecí rezistory R_N . Ve chvíli, kdy jsou kondenzátory plně nabity, dojde k přeskokům na jiskřištích $\check{R}J$, čímž se všechny kondenzátory spojí do série. Celkové napětí je tedy dáno součtem napětí kondenzátorů. Kondenzátory se následně vybíjí přes tlumivé rezistory R_t do obvodu R_1', C_2 . Právě pomocí R_1', C_2 lze upravovat velikost rázové vlny. Naopak na velikost vlny nemají téměř žádný vliv nabíjecí rezistory R_N . [1]

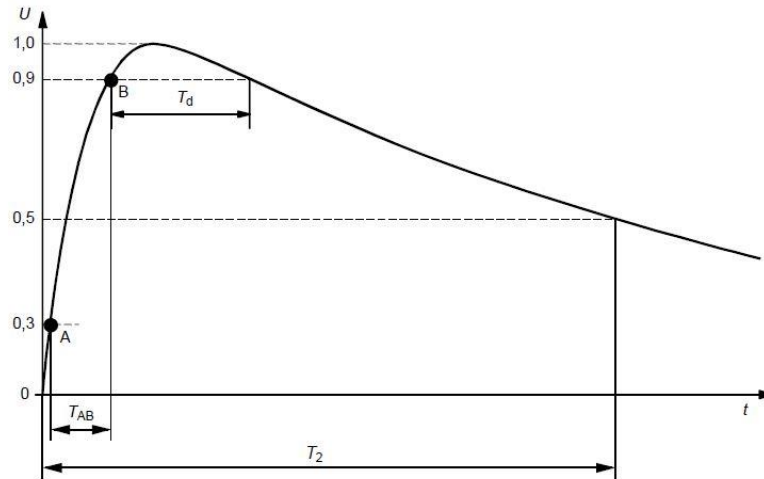
Vícetupňovým rázovým generátorem lze docílit amplitudy impulsu řádově desítky až tisíce kilovoltů, což jsou již dostatečné hodnoty pro simulaci atmosférických impulsů.

4.2 Spínací přepětí

Druhým typem přepětí je tzv. spínací přepětí. To vznikne při náhlých změnách parametrů v síti (např. zapínání a vypínání vedení) nebo při poruchách v síti (zemní spojení a zkratky). Amplituda takového impulsu je ovlivněna především velikostí jmenovitého napětí v místě spínání. Tvar impulsu je poté dán velikostí impedance systému a také podmínkami při spínání. Strmost nárůstu napětí je v tomto případě, v porovnání s atmosférickým impulsem, nižší.

4.2.1 Tvar vlny spínacího přepětí

Značení a specifikace jednotlivých časů u spínacího impulsu se liší od atmosférického impulsu, tak jak je patrné z následujícího průběhu.



Obr. 21 – Spínací impuls [16]

Kde T_{AB} je čas, za který vlna naroste z 30 % na 90 % U . T_d představuje tzv. dobu vrcholu, tedy čas, po který je velikost napětí vyšší než 90 % velikosti U . Doba půltýlu T_2 je opět definována stejně jako pro impuls atmosférický.

Pro normalizovaný spínací impuls platí, že doba do vrcholu $T_P = 250 \mu\text{s} \pm 20 \%$ a doba půltýlu $T_2 = 2500 \mu\text{s} \pm 60 \%$. Spínací impuls je označován jako impuls 250/2500. Protože testovaný izolační systém může být náchylný na tvar spínacího impulsu, lze se setkat s tím, že se doba do vrcholu pohybuje v širším rozmezí, nejčastěji od $100 \mu\text{s}$ do $1000 \mu\text{s}$. [2]

5 Současný stav problematiky kapalinových děličů

Problematika kapalinových děličů je prozatím do velké míry přehlížena. To dokazuje i to, že z dostupných zdrojů byly nalezeny záznamy a vědecké články pouze o dvou děličích za období posledních 10 let. První kapalinový dělič je sestaven na jmenovité napětí 170 kV a je popsán v článku [6] a druhý na 300 kV a je popsán v článku [7], [8]. Pro jednodušší orientaci bude první dělič dále označován jako **Kapalinový dělič 170 kV** a druhý dělič jako **Kapalinový dělič 300 kV**.

5.1 Kapalinový dělič 170 kV

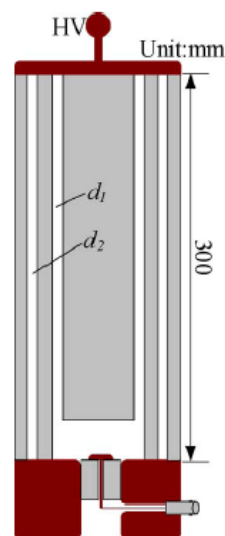
Tento prototyp byl sestaven na katedře vysokého napětí technické univerzity v čínském městě Wuhan (anglický název: *Department of High Voltage Engineering, College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan*).

Dělič byl sestaven pro měření na impulsním generátoru s napěťovou amplitudou 170 kV. Odporovou kapalinou byl v tomto případě vodný roztok síranu měďnatého.

Dělič má jednoduchý válcový tvar s koaxiálním uspořádáním, tak jak je patrné z následujících obrázků.



Obr. 22 – Fotografie Kapalinového děliče 170 kV [6]



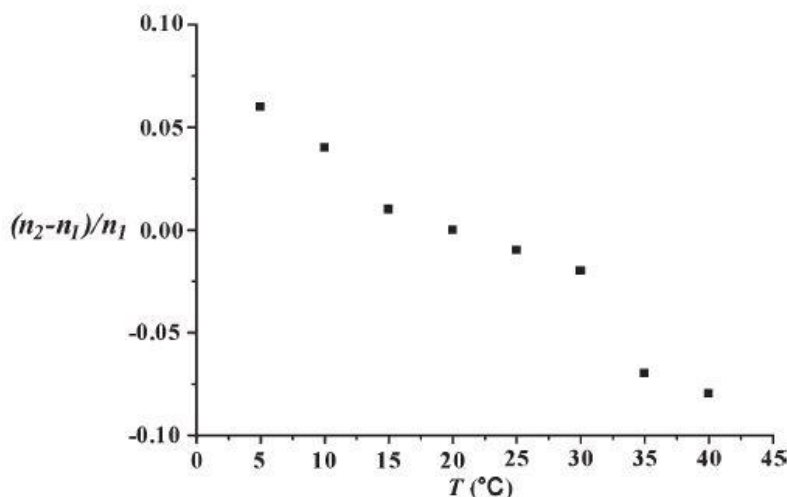
Obr. 23 – Schéma Kapalinového děliče 170 kV [6]

Na horní části děliče je umístěna měděná elektroda, pro připojení zdroje vysokonapěťového impulsu. Střední elektroda děliče je umístěna ve středu dolní části. V dolní části děliče je také elektroda pro uzemnění. Tloušťka vnitřní odporové vrstvy d_1 je 1 mm a vnější, stínící (viz kapitola 2.5) vrstvy d_2 je 2 mm. Celková vzdálenost vysokonapěťové a zemní elektrody $h = 300$ mm. Odpor vysokonapěťové části je 2996Ω a nízkonapěťové $3,3 \Omega$ (při 20°C), dělicí poměr tohoto děliče je přibližně $n = 1/910$. Všechny elektricky nevodivé části děliče jsou vyrobeny z plexiskla. Jádrem tohoto děliče tvoří izolační tyč, která je kratší než tělo děliče. Tak je objem kapaliny mezi střední a zemnicí elektrodou větší a je docíleno menšího odporu nízkonapěťové části.

Hlavním úkolem této středové izolační tyče je ovšem snížení vlivu skinefektu na odpor kapaliny při vysokofrekvenčním měření (viz kapitola 3.5). Jestliže je uvažována rezistivita CuSO_4 $\rho = 1,37 \Omega \cdot \text{m}$, relativní permeabilita CuSO_4 $\mu_r = 1$, a maximální frekvence děliče $f_M = 35 \text{ MHz}$, pak vyjde podle vztahu (3.29) hloubka vniku $\delta = 9,96 \text{ cm}$. Vzhledem k tomu, že d_I je 1 mm, lze prohlásit, že je vliv skinefektu, a tedy i frekvence měřeného průběhu, na odpor děliče zanedbatelný.

5.1.1 Měření na děliči

Jak již bylo zmíněno výše, nevýhodou kapalinového rezistoru oproti standardnímu je to, že se s teplotou mění jeho vlastnosti výrazněji. To má za následek výraznější změnu dělicího poměru děliče v závislosti na teplotě. Tento nepříznivý jev je u této konstrukce částečně eliminován tím, že je odporová kapalina vysokonapěťové a nízkonapěťové části děliče přímo propojena. Se změnou teploty se tedy rovnoměrně mění vysokonapěťový a nízkonapěťový rezistor a dělicí poměr by měl být méně závislý na teplotě. Měřením bylo zjištěno, že změna dělicího poměru dosahuje 8 % při 40 °C (kdy referenční dělicí poměr je vypočítán při 20 °C) a 6 % při 5 °C. Pokud by se ovšem teplota pohybovala v menším rozmezí, např. $20 \pm 5 \text{ °C}$, byl by rozdíl dělicího poměru jen 1 %. [6]



Obr. 24 – Závislost dělicího poměru na teplotě [6]

5.2 Kapalinový dělič 300 kV

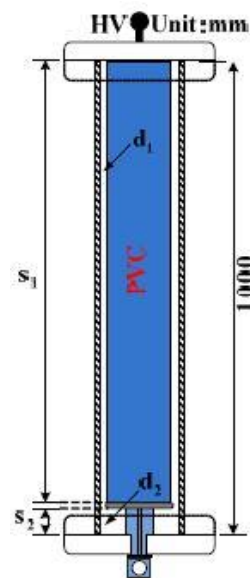
Tento dělič byl sestaven na technické univerzitě v Bangkoku (anglický název: *Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok*). Jmenovité napětí tohoto děliče je 300 kV.

Jeho konstrukce je velice podobná konstrukci prvního děliče. Izolační válec, který tvoří jádro děliče je ovšem po celé jeho výšce a střední elektroda je ve vzdálenosti $s_1 = 990 \text{ mm}$ od vysokonapěťové elektrody, resp. $s_2 = 10 \text{ mm}$ od zemní elektrody. U tohoto děliče také chybí vnější stínící elektroda. Stínění lze u tohoto děliče provést připojením stínících kruhů, tak jak je znázorněno na fotografii (Obr. 25). Vzdálenost vysokonapěťové a zemní elektrody, u tohoto provedení, je $h = 1000 \text{ mm}$. Elektrody jsou zde provedeny z hliníku a izolační jádro z PVC. Jako rezistor vysokonapěťové části zde byl použit roztok chloridu sodného. Odpor nízkonapěťové části je tvořen standardním tenkovrstvým rezistorem.

Odpor vysokonapěťové části je $R_H = 10 \text{ k}\Omega$ a nízkonapěťové $R_L = 11 \text{ }\Omega$. Dělicí poměr tohoto děliče je tedy přibližně 1/1100.



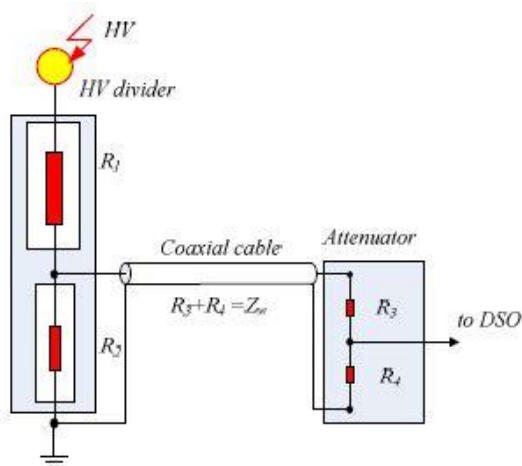
Obr. 25 – Fotografie Kapalinového děliče 300 kV [8]



Obr. 26 – Schéma Kapalinového děliče 300 kV [8]

5.2.1 Měření na děliči

Pro měření byl na výstup děliče připojen standardní odporový dělič s celkovým odporem $50 \text{ }\Omega$. A dělicím poměrem 10. Celkový dělicí poměr soustavy kapalinový dělič – atenuátor je tedy přibližně 13 200.

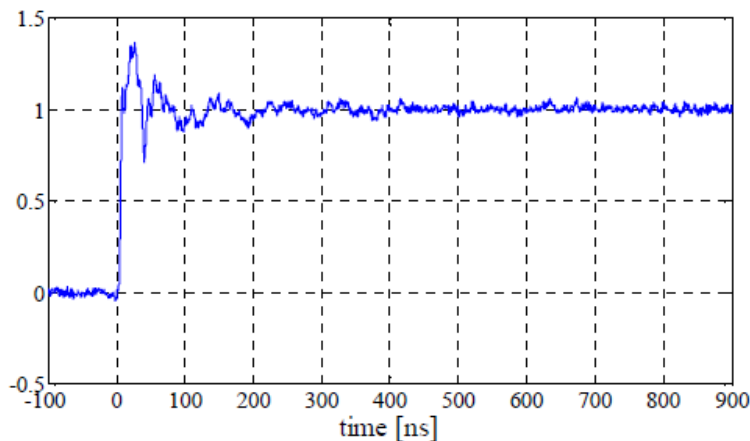


Obr. 27 – Zapojení atenuátoru na výstup koaxiálního kabelu [8]

Dělič byl podroben pěti testům, a to: odezva na jednotkový napěťový skok, výdržné napětí, test linearity dělicího poměru, test krátkodobé stability a test strmým napěťovým impulsem.

a) Odezva na jednotkový napěťový skok

Pomocí osciloskopu na výstupu atenuátoru byla naměřena doba odezvy na jednotkový skok 2,85 ns, dále maximální napětí 1,36 V, tedy 36 % a doba ustálení cca 150 ns. Tyto výsledky jsou dobře patrné z následujícího zaznamenaného průběhu. [8]



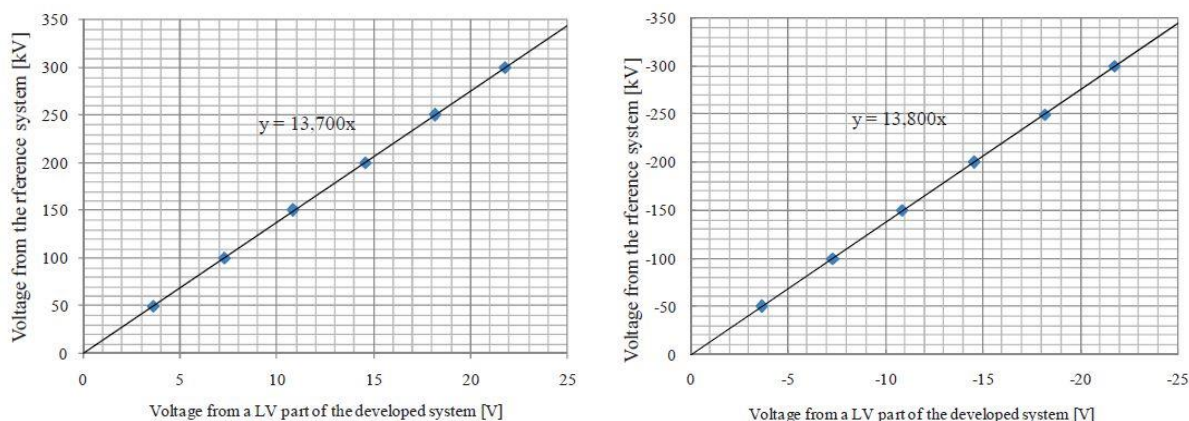
Obr. 28 – Odezva na jednotkový skok děliče 300 kV [8]

b) Výdržné napětí

Na vstupní svorky kapalinového děliče bylo postupně přivedeno 10 kladných a 10 záporných impulsů o velikosti 330 kV. Dělič testem prošel úspěšně, nedošlo tedy k přeskoku. Po těchto 20 impulsích byla znovu provedena zkouška jednotkovým skokem, a to pro kontrolu toho, zda se nějak nezměnili parametry děliče, přičemž byly naměřeny přibližně stejné parametry jako v bodě a).

c) Zkouška linearity dělicího poměru

V této zkoušce byl srovnáván sestavený dělič s referenčním děličem (standardní provedení). Na oba děliče byly přiváděny kladné a záporné atmosférické impulsy, tedy s tvarem 1,2/50 a o velikosti 50 – 300 kV, přičemž bylo testováno, zda je mezi výstupním napětím obou děličů lineární závislost. Bylo zjištěno, že následně vypočítaný dělicí poměr se v celém měřeném rozsahu liší o ± 1 %. Vzájemné závislosti výstupních napětí obou děličů jsou patrné z následujících grafů.



Obr. 29 – Test linearity dělicího poměru [8]

d) Zkouška krátkodobé stability

V tomto testu bylo na vstup děliče, postupně po 30s intervalech, přivedeno 20 atmosférických impulsů o velikosti 330 kV. Poté dalších 20 impulsů o velikosti 100 kV po 30 s. Po těchto 40 impulsích byl znovu přepočítán dělicí poměr děliče, přičemž bylo zjištěno, že se liší o $\pm 0,1$ % oproti dělicímu poměru získanému před testem.

e) Zkouška strmým napět'ovým impulsem

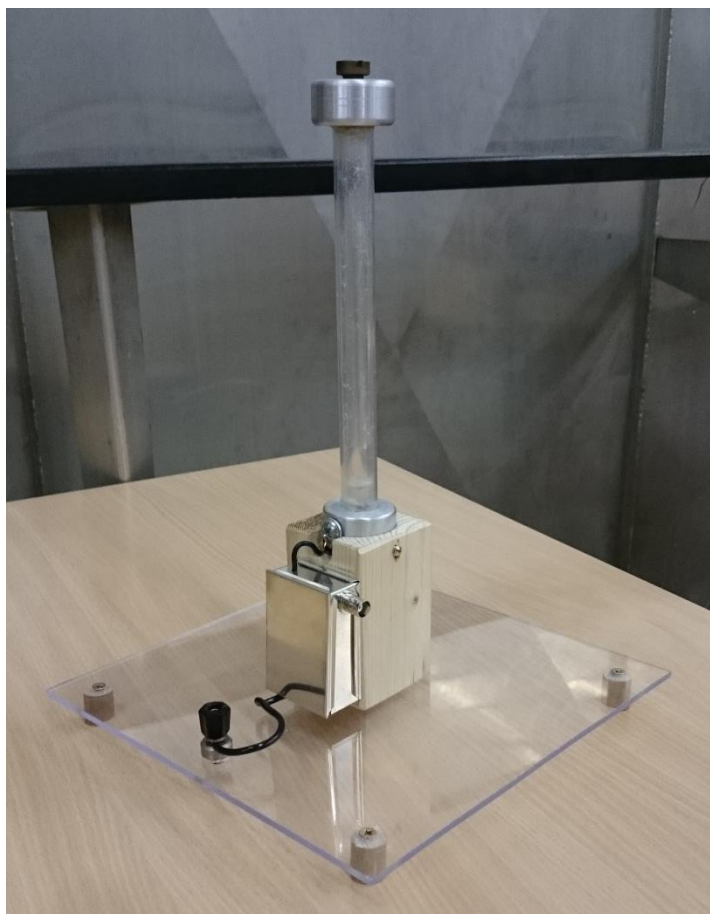
Na dělič byl přiveden kladný a záporný impuls o strmosti $2500 \text{ kV}/\mu\text{s}$. I při této zkoušce měl dělič velice dobré výsledky.

Z výsledků měření děliče 170 i 300 kV je patrné, že se vysokonapět'ové kapalinové děliče mohou rovnat se standardními děliči.

6 Konstrukce kapalinového děliče

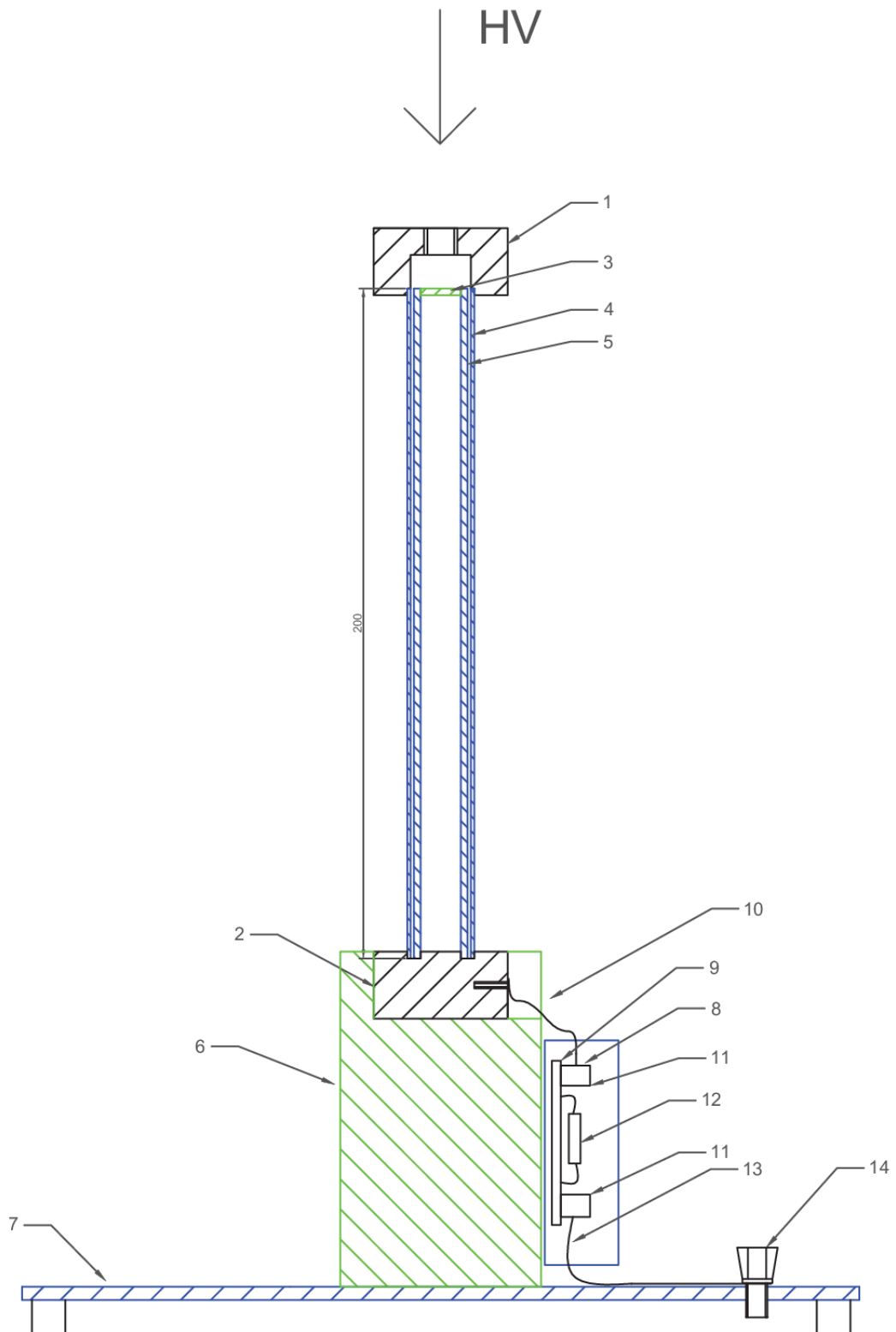
Při návrhu a konstrukci vysokonapěťového kapalinového děliče byly zohledněny odborné články [6], [7], [8] ve který je popsána konstrukce děličů zmíněných v předchozí kapitole.

Na následujícím obrázku je fotografie sestaveného děliče.



Obr. 30 – Fotografie sestaveného kapalinového děliče

Schéma sestaveného děliče je na následujícím obrázku a popis jednotlivých částí je uveden v tabulce a v kapitolách níže.



Obr. 31 – Schéma sestaveného kapalinového děliče

Tab. 3 – Popis jednotlivých částí děliče

Číslo ve schématu	Popis
1	Horní „vysokonapěťová“ elektroda
2	Spodní „nízkonapěťová“ elektroda
3	Dřevěná zátka zamezující proniknutí kapaliny do vnitřní trubky
4	Vnější trubka z plexiskla
5	Vnitřní trubka z plexiskla
6	Dřevěný podstavec
7	Základna z plexiskla
8	Stínící krabička
9	Nepájivé kontaktní pole
10	Přívodní kabel do krabičky
11	Šroubovací svorkovnice do DPS
12	Metalizované rezistory
13	Kabel pro uzemnění
14	Svorkovnice

V následujících podkapitolách budou blíže popsány jednotlivé části děliče.

6.1 Horní a spodní elektroda

Horní i spodní elektroda je vysoustružena z hliníku. Ten je použit především kvůli svým výborným elektrickým vlastnostem, nižší pořizovací ceně a lepší obrobiteľnosti oproti ostatním přípustným materiálům.

V horní elektrodě je vytvořen závit o průměru 10 mm, tento závit slouží nejen pro přišroubování vysokonapěťového přívodu, ale také pro nalévání roztoků do prostoru mezi trubkami.

Ve spodní elektrodě je vysoustruženo vymežovací mezikruží, které slouží k přesnému umístění plexisklových trubek. I v této elektrodě je vytvořen závit. Ten zde slouží pro přišroubování vývodního kabelu.

Výkresy obou elektrod, i s jejich přesnými rozměry, jsou umístěny v příloze.

6.2 Vnitřní a vnější trubka z plexiskla

Jedná se o extrudované plexisklové trubky Plexiglas[®]. Vnější trubka má vnější průměr 20 mm a tloušťku stěny 1 mm. Vnitřní trubka poté 16 mm a tloušťku stěny 2 mm. Trubka s menším průměrem je vsazena do druhé, tak, že mezi nimi vzniká mezera 1 mm, tak jak je patrné ze schématu (Obr. 31). Toto mezikruží je při měření na děliči vyplněno používaným roztokem. Výška obou trubek je 20 cm. Odůvodnění, těchto rozměrů je uvedeno níže.

Vnitřní trubka je přítomna také kvůli eliminaci vlivu skinefektu. Princip je zmíněn v kapitole (3.5).

6.2.1 Volba rozměrů trubek

Celkový požadovaný odpor kapaliny je poměrně vysoký, a to 4 kΩ. Tak aby nedošlo, při přivedení napětí, k přeskoku mezi elektrodami, je nutné dodržet určitou vzdálenost mezi nimi. Tato vzdálenost byla stanovena jako 1 cm vzdálenosti na 1 kV přiloženého napětí. Jestliže je tento dělič sestaven na jmenovité napětí 20 kV, je potřebná vzdálenost mezi elektrodami minimálně 20 cm. Uvažovaná rezistivita roztoku je 1 Ω·m a vztah, který platí pro výpočet odporu je následující:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad (6.1)$$

kde R je odpor roztoku (Ω), který má být 4 kΩ,
 ρ rezistivita roztoku (Ω·m), která je 1 Ω·m,
 l vzdálenost elektrod (m), která je 20 cm,
 S průřez vodiče (kapaliny) (m²).

Z rovnice (6.1) je tedy patrné, že jedinou neznámou je průřez, který pro dané hodnoty vychází 50 mm². To znamená, že pokud bychom neumísťovali vnitřní trubku, bylo by zapotřebí použít trubku o vnitřním průměru cca 8 mm.

Při použití vnitřní trubky se ovšem jedná o plochu v mezikruží, kterou lze vypočítat dle vztahu

$$S = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} - \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_1^2 - d_2^2) \quad (6.2)$$

kde d_1 je vnitřní průměr vnější trubky (mm),
 d_2 vnější průměr vnitřní trubky (mm).

Nyní tedy bylo zapotřebí vybrat z katalogu výrobce takové trubky, se kterými bychom se co nejvíce přiblížili hodnotě $S = 50 \text{ mm}^2$. Přičemž nejvíce vyhovovali právě trubky s průměry zmiňovanými na začátku kapitoly, pro které vyšla plocha $S \approx 53,4 \text{ mm}^2$.

6.3 Dřevěný podstavec

Hlavním požadavkem na podstavec bylo, co nejjednodušší uchycení nádoby s roztokem, tak aby ji bylo možné jednoduše a rychle odpojit a roztok v ní vyměnit. Jak je patrné ze schématu (Obr. 31) musí být tento podstavec elektricky nevodivý. Z tohoto důvodu bylo, jako materiálu na podstavec, zvoleno dřevo, které je mimo jiné také velice dobře obrobitelné.

Systém pro uchycení nádoby je patrný z fotografie děliče (Obr. 30), a tvoří ho dva protilehlé šrouby. V podstavci je také vyříznut otvor na šroub elektrody a vyvedení kabelu do stínicí krabice, která je k podstavci přišroubována vruty, stejně tak, jako plexisklová základna.

6.4 Plexisklová deska

Tato deska zde plní především stabilizační funkci. Je na ní také přišroubována svorka pro připojení uzemnění. K této svorce je z druhé strany vyveden kabel ze stínicí krabice.

6.5 Stínicí krabice

Rezistory, které tvoří nízkonapěťový odpor děliče R_2 (viz kapitola 2.1.1) jsou umístěny ve stínicí krabici. Důvody pro stínění a druhy stínění jsou uvedeny v kapitole 3.3.

V krabici se nachází nepájivé kontaktní pole, na kterém jsou dvě šroubovací svorkovnice do DPS. Svorkovnice mají dva navzájem propojené vstupy, kdy je do 1. vstupu horní svorkovnice přiveden kabel ze spodní „nízkonapěťové“ elektrody⁴ a z 2. vstupu je vyveden holý měděný vodič do jádra BNC konektoru, ke kterému je připájen. Z 1. vstupu dolní svorkovnice je vyveden kabel na zemnicí svorku na plexisklové desce a z 2. vstupu dolní svorkovnice je vyveden holý měděný vodič na vnější elektrodu BNC konektoru ke které je opět připájen. BNC konektor zde zároveň řeší problematiku impedančního přizpůsobení, když vytváří odpor R_3 z Obr. 13, kap. 3.4.1.

Na nepájivém kontaktním poli jsou mezi horní a spodní svorkovnicí umístěny paralelně řazené metalizované rezistory. Celkem je zde 5 rezistorů, každý s hodnotou 10Ω , výsledný odpor R_2 nízkonapěťové části děliče je tedy 2Ω .

Při použití desky plošných spojů namísto nepájivého kontaktního pole, by bylo pravděpodobně dosaženo lepších výsledků.⁵ Protože se ale jedná o prototyp a dá se předpokládat, že bude v budoucnu na děliči prováděno více měření, jeví se jako výhodnější použití právě nepájivého pole, tak aby se dal dělicí poměr děliče snáze upravovat.

6.6 Dělicí poměr sestaveného děliče

Z výše zmíněného vyplývá, že dělicí poměr sestaveného děliče je přibližně $5 \cdot 10^{-4}$, tedy platí, že $U_2 = 5 \cdot 10^{-4} \cdot U_1$ nebo $U_1 = 2000 \cdot U_2$.

⁴ Přívodní kabel, stejně tak jako kabel na zemnicí svorku je typ CY 1x1,5

⁵ Především kvůli kvalitnějším kontaktům.

7 Použité měřicí přístroje a metody pro vyhodnocení výsledků

7.1 Použité měřicí přístroje a zařízení

V následujících podkapitolách jsou popsány jednotlivé měřicí přístroje, které byly použity, nejen při samotném měření na děliči, ale také při přípravách před ním.

7.1.1 Příprava roztoků

Při míchání chemických látek a destilované vody byly jako zdroj použity grafy v kapitole 2.6. Z těchto grafů vyplývá, že pro dosažení rezistivity $1 \Omega \cdot \text{m}$ je zapotřebí použít množství látek dle následující tabulky:

Tab. 4 – Obsah látek v roztoku

Látka	Hmotnost ($\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$)
CuSO_4	38
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$	10
NH_4Cl	4
NaCl	5

Pro přesné měření hmotnosti byla použita digitální váha METTLER BD 202.

K měření rezistivity, resp. vodivosti roztoku byl použit přístroj JENWAY 4510 Conductivity meter, který je také zobrazen na následujícím obrázku.



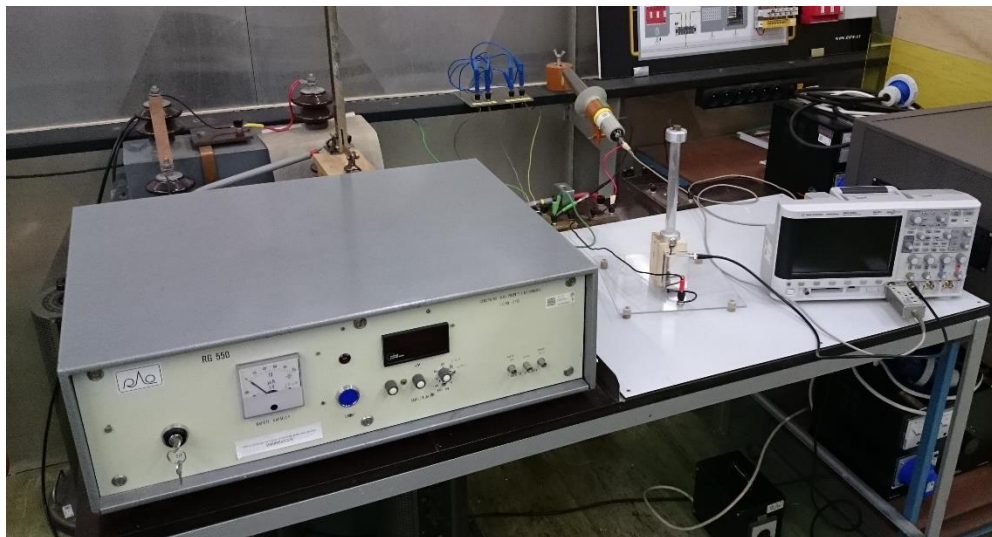
Obr. 32 – Conductivity meter [18]

Tento přístroj slouží pro měření měrné vodivosti kapalin. Tu měří pomocí sondy (na obrázku je sonda umístěna ve stojanu), ve které jsou dvě elektrody. Při ponoření těchto elektrod do kapaliny je měřena vodivost mezi nimi. Přístroj má také funkci automatického přepočítávání

vodivosti v závislosti na teplotě kapaliny. Naměřená hodnota vodivosti je zobrazována v jednotkách $S \cdot cm^{-1}$.

7.1.2 Měření na rázovém generátoru

Dělič byl připojen na rázový generátor RAO RG 550, $U_{max} = 20$ kV, a průběhy napětí byly snímány přímo pomocí osciloskopu DSO-X 3034A od společnosti Agilent Technologies. Průběh vstupního napětí byl navíc měřen pomocí napěťové sondy Tektronix P6015A.



Obr. 33 – Fotografie měření na děliči

7.2 Postup při vyhodnocení naměřených hodnot

V následujících podkapitolách jsou popsány jednotlivé kroky vyhodnocení naměřených průběhů. Naměřené hodnoty a výpočty se zpravidla dají prezentovat v časové a frekvenční oblasti.

7.2.1 Míra odlišnosti tvaru vstupního a výstupního signálu

Prvním kritériem, podle kterého budou porovnávány jednotlivé roztoky v děliči, je míra odlišnosti tvaru (dále jen *MOT*) vstupního a výstupního signálu. Výstupem je zde jedno číslo, které charakterizuje, jak se tvarově liší vstupní a výstupní signál.

Všechny hodnoty budou nejdříve normovány, a to tak, že maximum každého signálu bude mít hodnotu 1. Tím se všechny hodnoty amplitudově sjednotí a bude uvažován pouze tvar signálů. *MOT* pro jednotlivá uspořádání děliče je spočtena jako suma kvadrátů rozdílů vstupního a výstupního signálu a platí pro ni vztah:

$$MOT = \sum_{i=1}^n (u_{INi} - u_{OUTi})^2 \quad (7.1)$$

kde n je počet vzorků (-),

u_{INi} i -tý prvek normovaného vstupního napětí (-),

u_{OUTi} i -tý prvek normovaného výstupního napětí (-).

7.2.2 Převod naměřených hodnot z časové do frekvenční oblasti

Pro další vyhodnocování dat je nezbytné převést naměřené hodnoty z časové oblasti do oblasti frekvenční. K tomu slouží tzv. diskrétní Fourierova transformace (dále jen DFT), která je založena na následujícím vztahu:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-\frac{jnk2\pi}{N}} \quad (7.2)$$

kde $X(k)$ je signál ve frekvenční oblasti, pro $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$,
 $x(n)$ signál v časové oblasti, pro $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$,
 N celkový počet vzorků.

Hodnoty z frekvenční oblasti lze samozřejmě převádět zpět do té časové, tomu slouží inverzní Fourierova transformace, a vztah pro ni je:

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k)e^{\frac{jnk2\pi}{N}}. \quad (7.3)$$

Pro zpracování naměřených hodnot bude použit program MATLAB, který obsahuje funkci *fft()* neboli rychlou Fourierovu transformaci (dále jen FFT) (angl. *Fast Fourier Transformation*). Tento algoritmus je složitější než při postupu podle definičního vztahu DFT, ale jeho rychlost je vyšší. Při výpočtu podle definice (7.2) musí být vykonáno N^2 komplexních součinů a N^2 komplexních součtů, zatímco u FFT pouze $N \cdot \log_2(N)$ komplexních součinů a součtů.

Pro převod koeficientu k na konkrétní hodnoty frekvence slouží následující vztah.

$$f(k) = k \cdot \frac{1}{N \cdot T} = k \cdot \frac{f_{vz}}{N} \quad (7.4)$$

kde $f(k)$ je frekvence pro daný koeficient k (Hz), pro $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$,
 N celkový počet vzorků (-),
 T vzorkovací perioda (s),
 f_{vz} vzorkovací frekvence (Hz).

Jednotlivé vzorky jsou od sebe vzdáleny o Δf , přičemž

$$\Delta f = \frac{1}{N \cdot T}. \quad (7.5)$$

Tato vzdálenost je také často nazývána frekvenční bin a součin $N \cdot T$ je celková doba odečítání signálu. [11]

7.2.3 Frekvenční spektrum signálu

Z předchozí kapitoly vyplývá, že jsou hodnoty, převedené z časové do frekvenční oblasti, komplexními čísly, a to i přes to, že původní hodnoty byla čistě reálná čísla. Protože se jedná

o komplexní čísla, vynášejí se výsledky do dvou grafů, a to do amplitudového frekvenčního spektra a do fázového frekvenčního spektra.

Jestliže zapíšeme komplexní číslo $X(k)$ z rovnice (7.2) ve tvaru $X(k) = a_k + j \cdot b_k$, pak pro jeho amplitudu platí:

$$|X(k)| = X(k) = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad (7.6)$$

a pro jeho fázi platí:

$$\text{Arg}(X(k)) = \tau_k = \arctg \frac{b_k}{a_k}. \quad (7.7)$$

Amplitudové frekvenční spektrum je tedy závislost $X = f(f)$ a fázové frekvenční spektrum $\varphi = f(f)$.

7.2.4 Frekvenční charakteristika

V předchozí kapitole (7.2.3) byly uvedeny definice frekvenčního spektra, ty popisují daný signál na výstupu a na vstupu děliče, ale nic nevypovídají o tom, jak se dělič v daných frekvencích chová. To je popsáno právě pomocí frekvenčních charakteristik, které se opět dělí na amplitudové a fázové.

Nejdříve je nutné zavést pojem komplexní přenos děliče. Ten je definován jako:

$$A(k) = \frac{U_2(k)}{U_1(k)} \quad (7.8)$$

kde $A(k)$ je přenos děliče (-), pro $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$,

$U_1(k)$ napětí na vstupu děliče ve frekvenční oblasti (V), pro $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$,

$U_2(k)$ napětí na výstupu děliče ve frekvenční oblasti (V), pro $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$.

$A(k)$ je opět komplexní číslo a obecně má tvar $A(k) = c + j \cdot d$. Jeho absolutní hodnota lze pak vypočítat podle vzorce:

$$|A(k)| = A(k) = \sqrt{c_k^2 + d_k^2} \quad (7.9)$$

Jeho fáze, tedy fáze přenosu děliče je:

$$\text{Arg}(A(k)) = \varphi_k = \arctg \frac{d_k}{c_k}. \quad (7.10)$$

Amplitudová frekvenční charakteristika je tedy závislost absolutní hodnoty přenosu na frekvenci, tedy $A = f(f)$. Fázová frekvenční charakteristika je závislost fáze přenosu na frekvenci, tedy $\varphi = f(f)$.

Přenos je pro přehlednost výhodné převést do logaritmického měřítka podle následujícího vzorce:

$$A_{dB}(k) = 20 \cdot \log_{10}(A(k)) \quad (7.11)$$

kde $A_{dB}(k)$ je přenos děliče (dB), pro $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$.

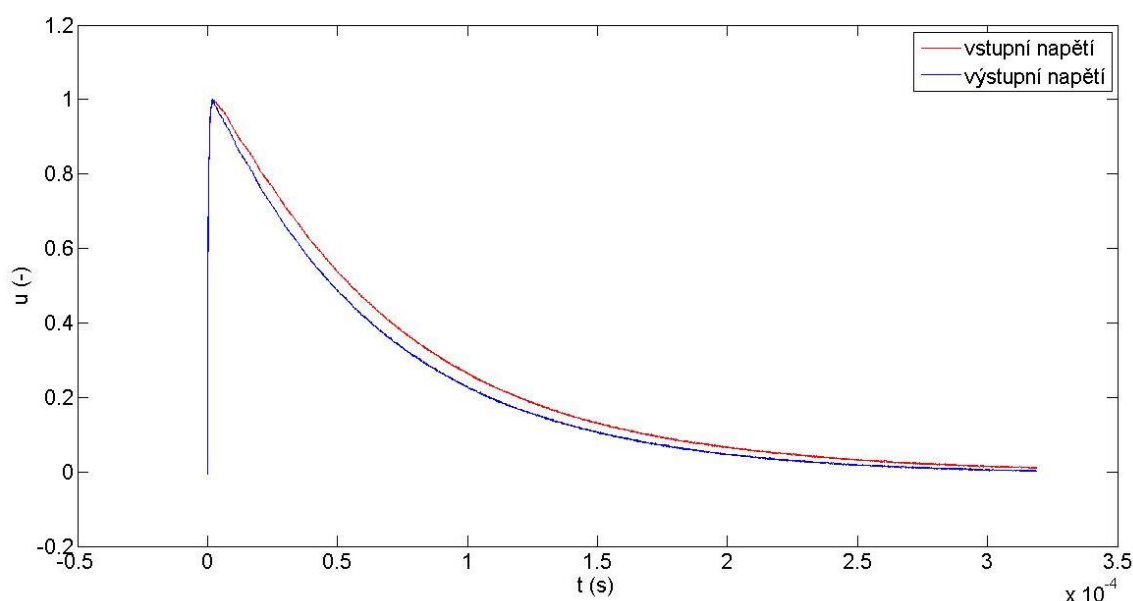
8 Vyhodnocení

V této kapitole jsou uvedeny naměřené hodnoty a výsledky získané pro jednotlivá srovnávací kritéria, která byly zmíněna v předchozí kapitole. K vyhodnocení naměřených dat byl použit program MATLAB.

Měřeny byly čtyři roztoky, které jsou popsány v kapitole 2.6. Všechny roztoky byly měřeny při třech různých amplitudách vstupního napětí, a to 5, 10 a 20 kV. Všechny roztoky byly také měřeny při třech teplotách, a to 15 °C, 21 °C a 40 °C⁶. Celkem tedy bylo naměřeno 36 sad hodnot.

8.1 Průběh vstupního a výstupního signálu

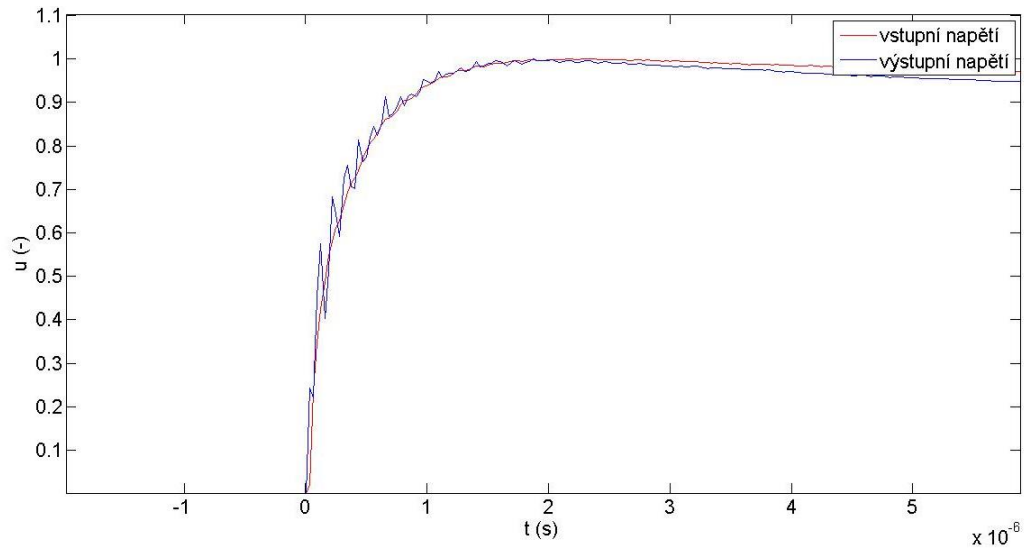
Jak již bylo zmíněno dříve, měřeno bylo na rázovém generátoru a tvar vlny je tedy 1,2/50 (viz kapitola 4). Pro zachování přehlednosti zde nebudou uvedeny průběhy napětí u všech uspořádání. Na následujícím grafu je zaznamenán průběh normovaného vstupního a výstupního signálu při měření roztoku CuSO₄, při 21 °C a amplitudě vstupního napětí 20 kV.



Obr. 34 – Průběh vstupního a výstupního signálu CuSO₄ při 20 kV a 21 °C

Z obrázku je patrné, že se průběh na výstupu příliš neliší od toho na vstupu. Při bližším pohledu (Obr. 35) je možné pozorovat, že v oblasti amplitudy dochází k vysokofrekvenčním oscilacím. Ty jsou přítomny u všech roztoků a pravděpodobně je lze připsat šumu nebo odrazům na kabelu. K jejich eliminaci by tedy bylo zapotřebí dělič lépe impedančně přizpůsobit (viz kapitola 3.4).

⁶ Teploty 15 a 40 °C jsou pouze orientační, protože jsou vypočteny průměrováním teploty roztoku před a po měření na rázovém generátoru.



Obr. 35 – Oscilace v oblasti amplitudy

8.2 Míra odlišnosti tvaru vstupního a výstupního signálu (MOT)

U žádného z naměřených průběhů nebyla na první pohled patrná větší odchylka výstupního signálu oproti vstupnímu, proto bylo nutné zavést číselné ohodnocení podobnosti vstupu a výstupu. K tomu slouží právě MOT. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty MOT pro jednotlivé roztoky, teploty a napětí. V tabulce jsou také barevně označeny limitní hodnoty (červeně maximum a zeleně minimum) a také hodnoty pro 20 kV při 21 °C, ty mají modrou barvu.

Tab. 5 – Hodnoty MOT

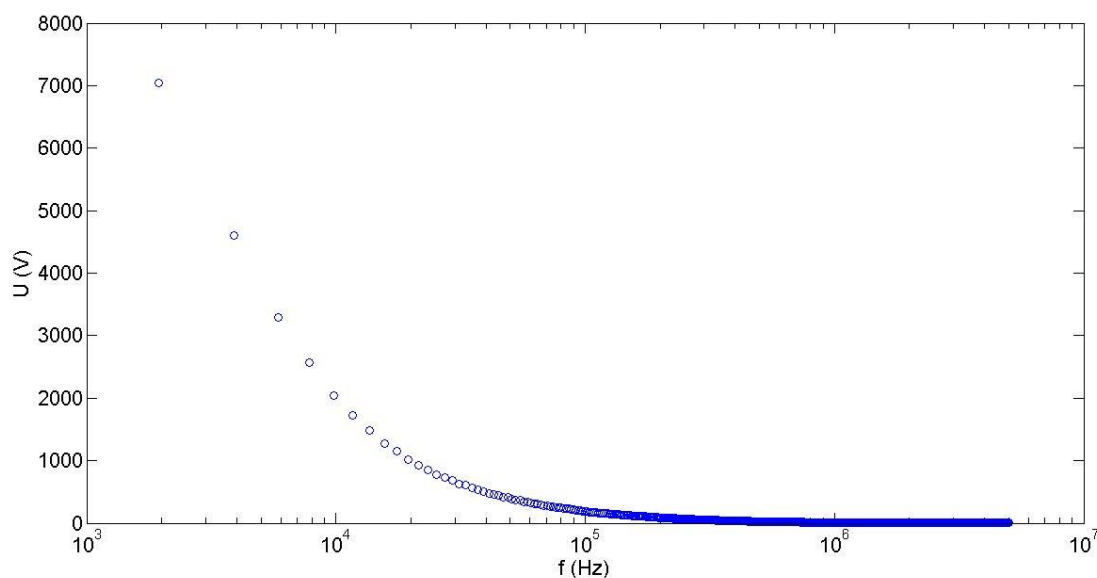
Roztok	Napětí (kV)	Teplota (°C)	MOT (-)
CuSO ₄	5	15	5,00
		21	9,69
		40	6,44
	10	15	5,68
		21	12,71
		40	6,83
	20	15	6,39
		21	9,32
		40	7,53
NH ₄ Cl	5	15	6,93
		21	6,09
		40	5,62
	10	15	5,34
		21	6,68
		40	6,47
	20	15	6,81
		21	7,74
		40	7,44
Na ₂ S ₂ O ₃	5	15	6,81
		21	6,04
		40	4,90
	10	15	6,51
		21	6,21
		40	5,28
	20	15	6,70
		21	7,44
		40	6,43
NaCl	5	15	6,94
		21	4,61
		40	4,41
	10	15	5,04
		21	5,98
		40	6,30
	20	15	8,64
		21	6,12
		40	6,55

Z tabulky je patrné, že nejhoršího výsledku, tedy největší deformace signálu, bylo dosaženo při použití roztoku CuSO₄, při 10 kV a 21 °C. Naopak nejmenšího zkreslení signálu bylo dosaženo při použití roztoku NaCl, při 5 kV a 40 °C.

Protože je dělič navržen na jmenovité napětí 20 kV a předpokládá se jeho užívání při pokojové teplotě, tedy například při 21 °C, je na místě vzájemné porovnání hodnoty MOT pro jednotlivé roztoky. Nejvyšší hodnoty, a tedy největší deformace signálu bylo dosaženo při použití roztoku CuSO₄, naopak nejlepšího výsledku dosáhl roztok NaCl.

8.3 Frekvenční spektrum měřených signálů

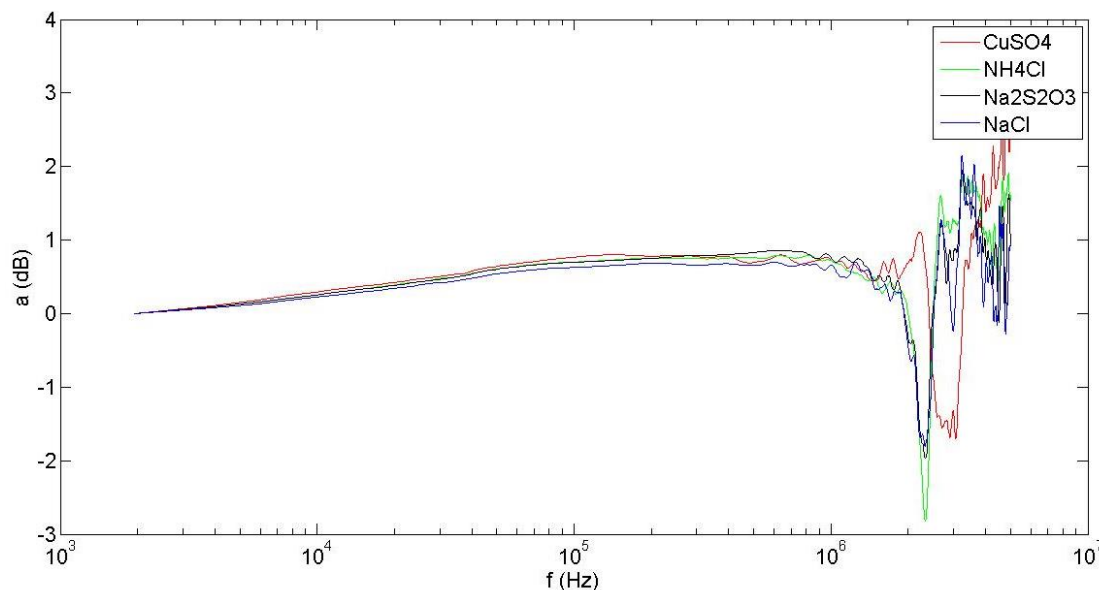
Spektrum signálu z rázového generátoru je na následujícím obrázku. Spektrum je vyobrazeno pouze do 5 MHz, protože při vyšších hodnotách frekvence již byla hodnota amplitudy spektra příliš malá a jednalo se spíše o šum, který by do dalších výpočtů vnášel nepřesnosti. Další výpočty ve frekvenční oblasti tedy budou uvažovány pouze do 5 MHz.



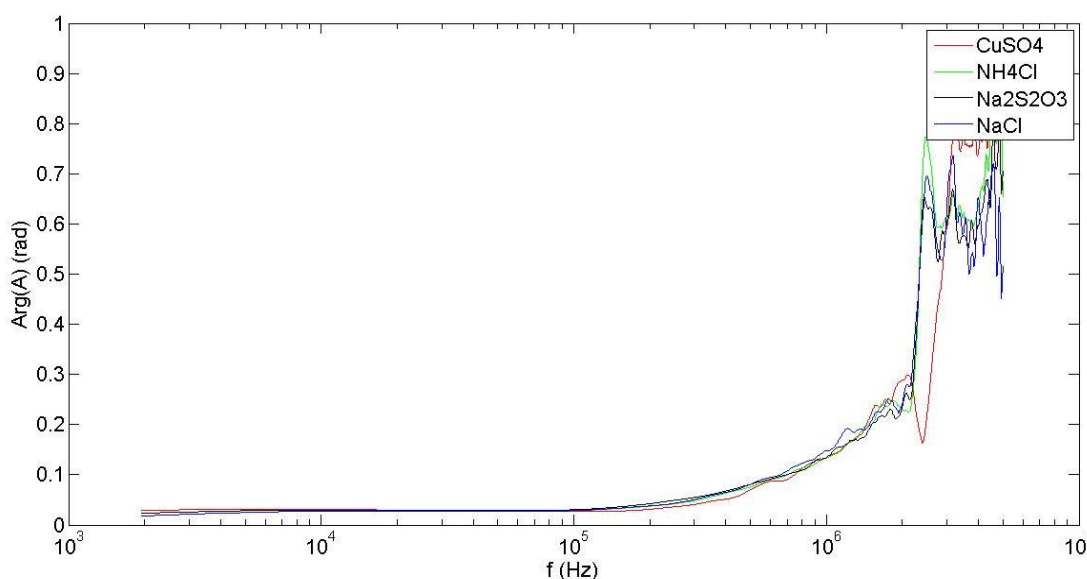
Obr. 36 – Amplitudové frekvenční spektrum vstupního signálu pro 20 kV

8.4 Vliv roztoku na frekvenční charakteristiky

V následující kapitole je vyhodnocen vliv použitého roztoku na amplitudovou a fázovou frekvenční charakteristiku děliče. Protože je dělicí poměr děliče pro jednotlivé roztoky různý, je pro grafické porovnání přenosu děliče vhodné sjednotit jednotlivé průběhy. Ve všech následujících grafech, ve kterých jsou zobrazeny amplitudové frekvenční charakteristiky, je tedy na ose y vynesena hodnota a (dB) a jedná se o rozdíl, v dB, oproti základní frekvenci.



Obr. 37 – Amplitudové frek. charakteristiky při 20 kV a 21 °C



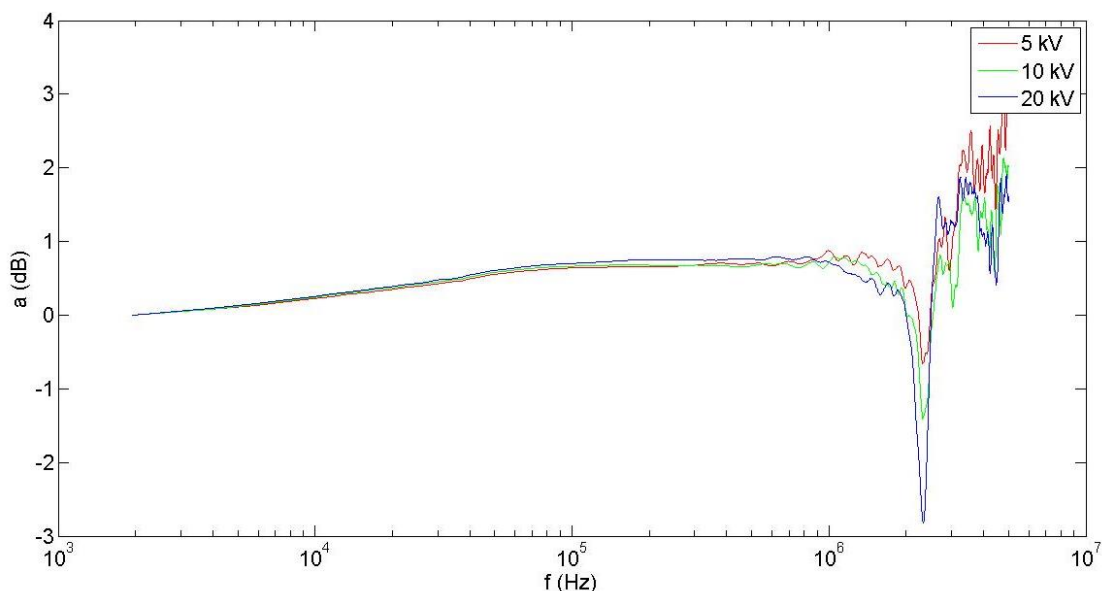
Obr. 38 – Fázové frek. charakteristiky při 20 kV a 21 °C

Z grafu na obrázku (Obr. 37) je zřejmé, že se, do frekvence cca 2 MHz, u všech roztoků pohybuje přenos v rozmezí ± 1 dB oproti přenosu na základní frekvenci. V hodnotě cca 2,1, resp. 2,5 MHz u CuSO_4 , dochází k poměrně prudkému útlumu. Při vyšších frekvencích je již možné vidět silné kmitání, které je pravděpodobně způsobeno šumem a dalšími nepřesnostmi v měření. V intervalu od 10 do 100 kHz dochází, u všech roztoků, k mírnému nárůstu hodnoty přenosu cca 0,5 dB. Naopak od 100 kHz do 1 MHz je hodnota přenosu téměř konstantní, změna je maximálně 0,1 dB.

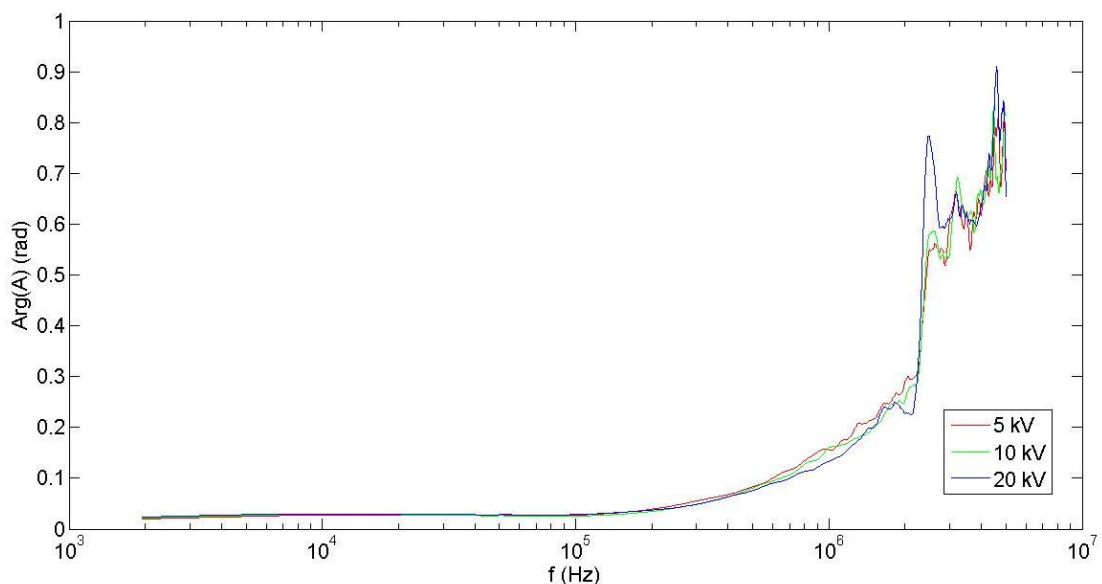
Průběh fázové frekvenční charakteristiky je u všech roztoků podobný. Do hodnoty cca 0,7 MHz je úhel přenosu menší než 0,1 rad. Poté začíná úhel mírně narůstat a v hodnotě 2,1 MHz dochází k prudkému nárůstu. Ten lze opět připsat šumu a nepřesnostem měření.

8.5 Vliv amplitudy napětí na frekvenční charakteristiky

Všechny čtyři roztoky byly měřeny při amplitudě vstupního napětí 5, 10 a 20 kV. V následujících grafech jsou zobrazeny amplitudové a frekvenční charakteristiky děliče s roztokem NH_4Cl , při daných napětích.



Obr. 39 - Amplitudové frek. charakteristiky při NH_4Cl a 21 °C



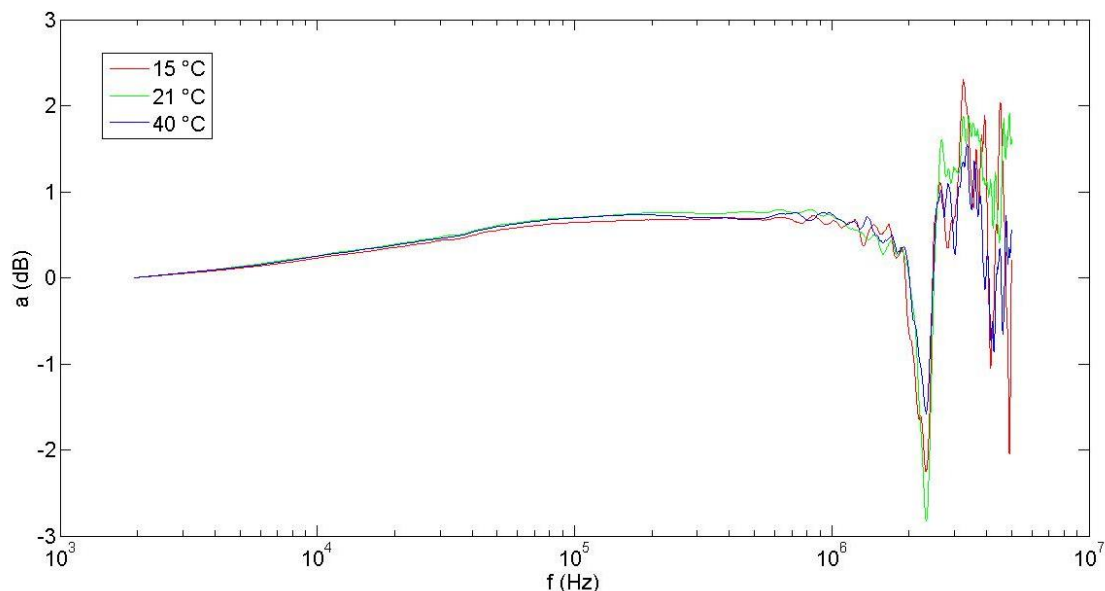
Obr. 40 – Fázové frek. charakteristiky při NH_4Cl a 21 °C

Z grafů na Obr. 39 a Obr. 40 je patrné, že velikost amplitudy vstupního napěťového impulsu má na charakteristiky minimální vliv. V amplitudové charakteristice je v intervalu do 1 MHz maximální rozdíl mezi 5 a 20 kV pouze cca 0,2 dB.

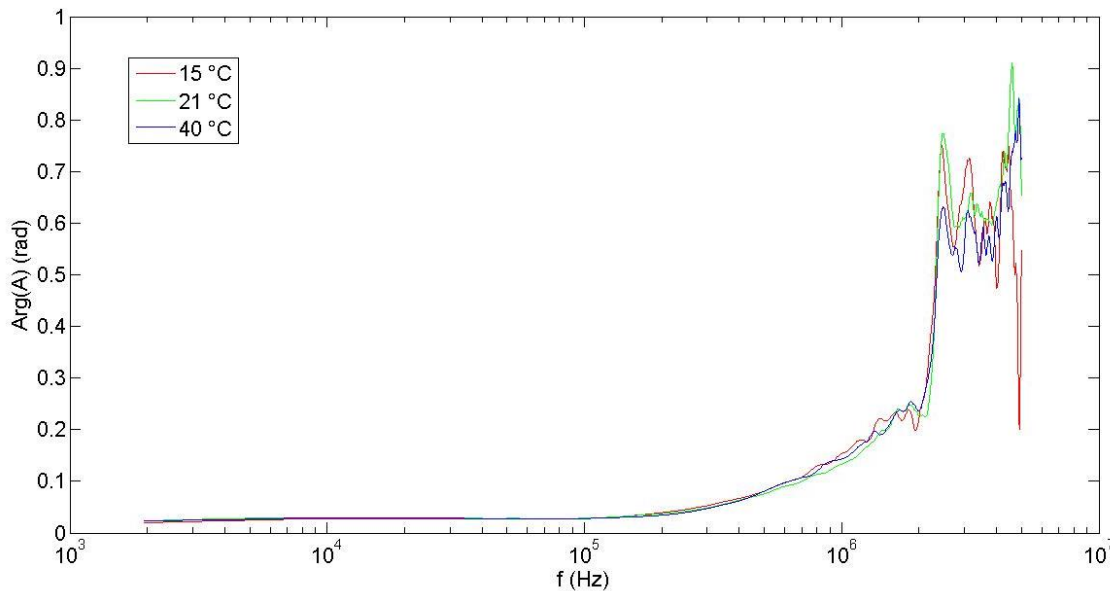
U ostatních roztoků jsou výsledky velice podobné a pro zachování přehlednosti zde ani nejsou uvedeny.

8.6 Vliv teploty na frekvenční charakteristiky

Níže jsou vyneseny amplitudové a fázové frekvenční charakteristiky pro dělič s roztokem NH_4Cl a při napětí 20 kV.



Obr. 41 – Amplitudové frek. charakteristiky při NH_4Cl a 20 kV



Obr. 42 - Fázové frek. charakteristiky při NH_4Cl a 20 kV

Stejně jako v předchozím případě, i zde se všechny charakteristiky téměř překrývají a lze tedy tvrdit, že jsou frekvenční charakteristiky prakticky nezávislé na teplotě. Do 1 MHz je rozdíl mezi nejnižší a nejvyšší teplotou opět pouze 0,2 dB.

Pro ostatní roztoky jsou výsledky velice podobné, a proto zde nejsou uvedeny.

8.7 Šířka pásma děliče

Šířka pásma obecně udává, pro jaký frekvenční rozsah je zařízení vhodné použít. V tomto případě se bude jednat o frekvenci, při které dojde k poklesu nebo nárůstu přenosu děliče o 3 dB, oproti základní frekvenci, tedy $k = 1$ v rovnici (7.4). Šířka pásma bývá nejčastěji označována B (z anglického *bandwidth*) a v tomto případě bude vždy uvedena v MHz.

Šířka pásma byla vypočtena pro všechny možné kombinace situací a výsledky jsou zaznamenány v následující tabulce. Stejně tak, jako v tabulce (Tab. 5), je i v tomto případě zeleně podbarven nejlepší výsledek, červeně nejhorší a modře jsou podbarveny výsledky pro jmenovité podmínky.

Naměřené šířky pásma děliče jsou pouze orientační. Pro zjištění přesných hodnot šířky pásma by bylo zapotřebí použít generátor impulsů, který generuje impulsy se strmějším čelem. Pro vyšší hodnoty frekvence má již impuls, z použitého generátoru impulsů, velmi malé amplitudy a ve velké míře se začíná uplatňovat rušení. Výsledky jsou tak, při vyšších frekvencích zkreslené a nepřesné.

Tab. 6 – Šířky pásma

Roztok	Napětí (kV)	Teplota (°C)	B (MHz)
CuSO ₄	5	15	4,73
		21	5,39
		40	5,24
	10	15	4,74
		21	4,88
		40	4,69
	20	15	5,12
		21	4,84
		40	5,27
NH ₄ Cl	5	15	5,03
		21	4,74
		40	5,16
	10	15	4,86
		21	5,14
		40	5,23
	20	15	5,18
		21	5,10
		40	5,36
Na ₂ S ₂ O ₃	5	15	5,28
		21	4,77
		40	5,37
	10	15	4,51
		21	5,00
		40	5,17
	20	15	5,29
		21	5,28
		40	5,27
NaCl	5	15	4,92
		21	5,12
		40	5,38
	10	15	4,83
		21	4,85
		40	5,23
	20	15	4,22
		21	5,32
		40	5,26

Nejlepšího výsledku bylo dosaženo při použití roztoku CuSO₄, při 5 kV a 21 °C. Naopak nejhoršího výsledku bylo dosaženo při použití roztoku NaCl, při napětí 20 kV a teplotě 15 °C. Při jmenovitých podmínkách, tedy při 20 kV a 21 °C, nejhůře dopadl roztok CuSO₄ a nejlépe naopak roztok NaCl.

Nutné je ovšem podotknout, že při takto vysokých frekvencích již byla amplituda vstupního signálu velice malá a hodnoty jsou tedy zatíženy poměrně velkou chybou.

9 Závěr

Problematika kapalinových děličů, vhodných pro měření rychlých přechodových dějů je prozatím poměrně opomíjena. Cílem této práce bylo sestavení prototypu kapalinového děliče a ověření jeho vlastností, které zahrnovaly především frekvenční přenos a jeho změnu v závislosti na teplotě a napětí.

Standardní vysokonapěťový rezistor je v tomto prototypu nahrazen plexisklovou trubkou, která je vyplněna odporovým roztokem. Pro měření byly při této práci použity celkem čtyři vodní roztoky, a to: roztok síranu měďnatého neboli modré skalice, roztok chloridu amonného, neboli salmiaku, roztok thiosíranu sodného a roztok chloridu sodného, tedy klasické kuchyňské soli. Z výsledků, které jsou prezentovány v předchozí kapitole, vyplývá, že ani jeden z těchto roztoků nevykazoval výrazné odchylky a lze konstatovat, že jsou pro toto použití všechny uvedené roztoky rovnocenné. Měřen byl také vliv velikosti amplitudy vstupního napětí a teploty roztoku na přenos děliče. Měřením bylo zjištěno, že do frekvence 1 MHz je rozdíl v přenosu při různé amplitudě vstupního napětí a při různé teplotě maximálně 0,2 dB. Tyto podmínky mají tedy na přenos jen minimální vliv.

Výsledky, které jsou uvedeny ve frekvenční oblasti, končí na hodnotě frekvence 5 MHz. Tato hranice byla stanovena jako maximální, ve které ještě jsou získané výsledky výpovědischopné. Pro vyšší frekvence již byla amplituda impulsu příliš nízká, a jednalo se spíše o šum, než o sledovaný signál.

Nepřesnosti v měření na vyšších frekvencích jsou způsobeny nevhodným generátorem impulsů. Pro měření byl použit rázový generátor, který vytváří impuls 1,2/50. Energie takového impulsu na frekvencích vyšších než cca 2 MHz je již velice nízká. Bylo by tedy vhodné provádět měření s generátorem, který dokáže generovat strmější impuls. Takový generátor ovšem nebyl v době měření v laboratoři k dispozici.

Důležitou otázkou u kapalinových děličů je do budoucna také jejich dlouhodobá stabilita. Je zapotřebí nějakým způsobem zabránit vypařování kapaliny. Vypařováním vody z roztoku by se měnila jeho rezistivita a tím i dělicí poměr děliče. Pokud by se roztok vypařil příliš, mohlo by dokonce dojít k přerušení kontaktu mezi horní elektrodou a roztokem a dělič by se tak stal zcela nefunkční.

Dalším problémem při použití kapaliny je její prosakování. V sestaveném prototypu docházelo k pozvolnému prosakování roztoku do vnitřní trubky. Tím docházelo ke snižování hladiny ve vnější trubce a po určité době by mohlo dojít k výše zmíněnému přerušení kontaktu. Úkolem je tedy také nalezení takového těsnicího a fixačního materiálu, který by i dlouhodobě udržel roztok v nádobě.

Sestavený prototyp kapalinového děliče je tedy plně funkční, avšak pro jeho dlouhodobou stabilitu bude zapotřebí provést další úpravy. To bude předmětem dalšího výzkumu v laboratoři vysokých napětí katedry elektroenergetiky na FEL-ČVUT v Praze.

Použitá literatura

- [1] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí*. 3. přepr. vyd. Praha: SNTL, 1982, 301 s.
- [2] KUFFEL, E, W ZAENGL a J KUFFEL. *High voltage engineering: fundamentals*. 2nd ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000, xiii, 539 p.
- [3] Schwab, A.: *High-voltage Measurement Techniques*, M.I.T. Press, 1972.
- [4] WADHWA, C. *High voltage engineering*. 2nd ed. New Delhi: New Age International (P) Ltd., Publishers, 2007, xxxii, 271 p.
- [5] ROHAN, Lucas. *High voltage engineering*. 3. vyd. Sri Lanka: Dep. of Electrical Engineering University of Moratuwa, 2001.
- [6] LIU, Yi, Fuchang LIN, Guan HU a Miao ZHANG. *Design and Performance of a Resistive-Divider System for Measuring Fast HV Impulse*. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement [online]. 2011, vol. 60, issue 3, s. 996-1002 [cit. 2015-04-05]. DOI: 10.1109/tim.2010.2064410.
- [7] PHOAPHAN, Busayapol, Siriwat POTIVEJKUL, Punyavee CHAISIRI a Peerawut YUTTHAGOWITH. *Design and construction of a prototype saline solution resistive voltage divider*. In: 2013 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology [online]. 2013 [cit. 2015-04-05]. DOI: 10.1109/ecticon.2013.6559580.
- [8] PHOAPHAN, Busayapol, Nawakun TRIRUTTAPIRUK a Peerawut YUTTHAGOWITH. *A fast response high voltage measuring system based on saline solution*. In: 2014 International Conference on Information Science, Electronics and Electrical Engineering [online]. 2014 [cit. 2015-04-05]. DOI: 10.1109/infosee.2014.6946212.
- [9] RACZ, B a A PATOCS. *Fast high-voltage resistive pulse divider*. Measurement Science and Technology [online]. 1992, vol. 3, issue 9, s. 926-928 [cit. 2015-04-05]. DOI: 10.1088/0957-0233/3/9/021.
- [10] BAREK, Jiří, František OPEKAR a Karel ŠTULÍK. *Elektroanalytická chemie*. 1. vyd. Praha: Karolinum, 2005, 188 s. ISBN 8024611465.
- [11] HLAVÁČ, Václav a Miloš SEDLÁČEK. *Zpracování signálů a obrazů*. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 252 s. ISBN 978-80-01-04442-1
- [12] OPPENHEIM, Alan V, Ronald W SCHAFER a John R BUCK. *Discrete-time signal processing*. 2nd ed. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, c1999, xxvi, 870 p. ISBN 0137549202.
- [13] RICHARD, M. Technical data: Liquid resistors. Ness Engineering [online]. 2014, 21.10. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.nessengr.com/techdata/liqresistor/liquidresistor.html>
- [14] KUBÍČEK, Vladimír. *Výpočty z fyzikální chemie I*. 2. vyd. Praha: Karolinum, 2010, 71 s. ISBN 978-80-246-1806-7.
- [15] ČSN IEC 618+A1. Indukční děliče napětí. Praha: Český normalizační institut, 1997.

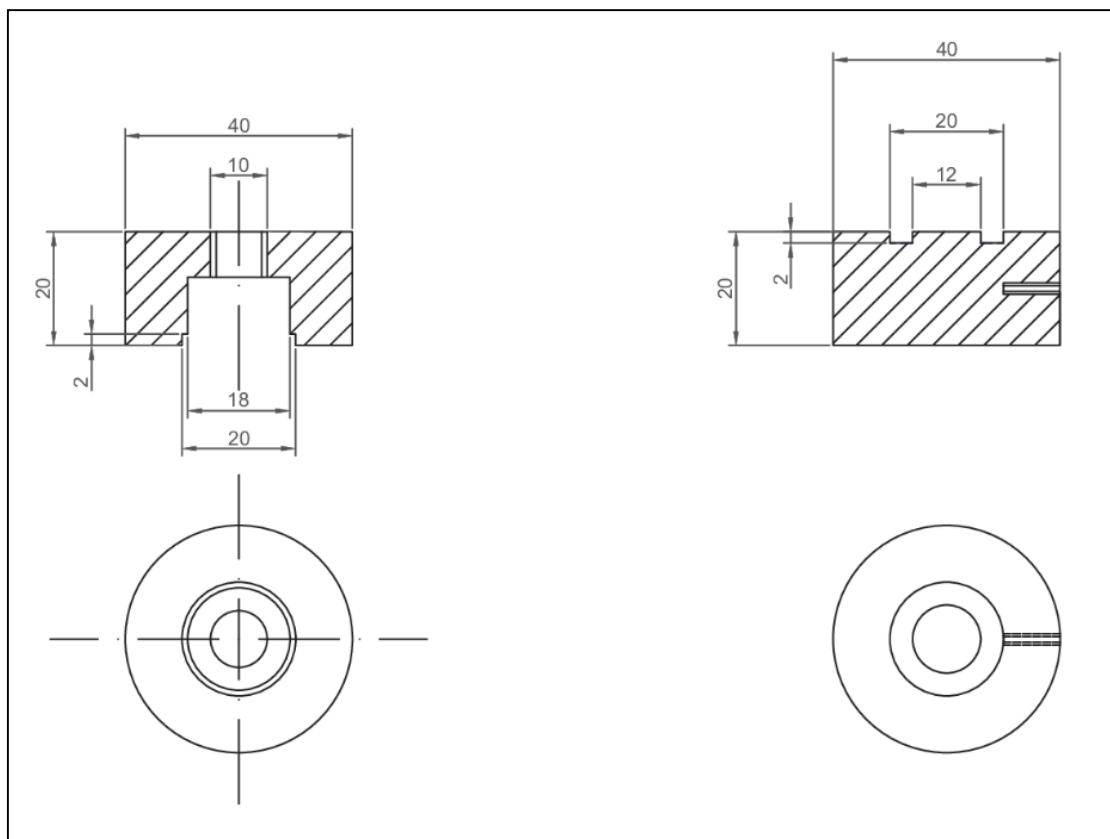
- [16] ČSN EN 60060-1. Technika zkoušek vysokým napětím: Obecné definice a požadavky na zkoušky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [17] Encentrum. DVR-150F stejnosměrný/střídavý napěťový dělič 0-150 kV [online]. 2011 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: <http://www.encentrum.cz/products/dvr-150f-stejnosmerny-stridavy-napetovy-delic-0-150-kv/>
- [18] Švecservis [online]. 2008 [cit. 2015-05-01]. Dostupné z:<http://www.svecservis.cz/>

Přílohy

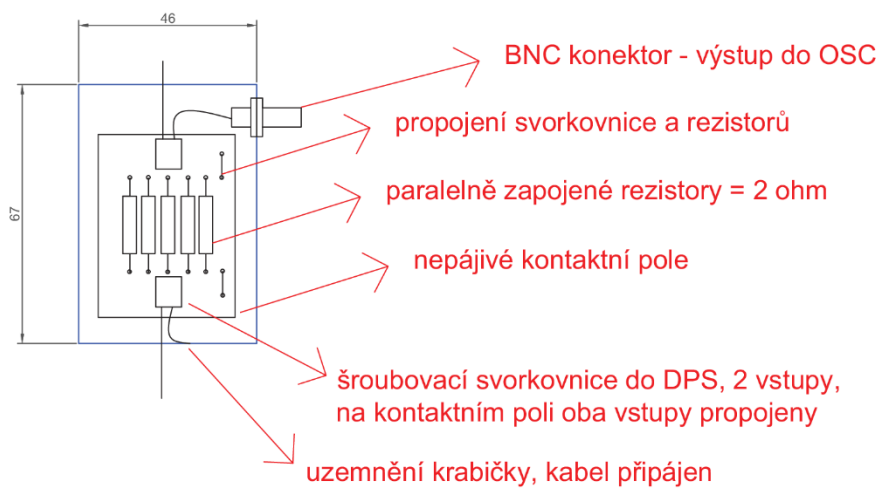
Seznam příloh

1 Doplnující dokumentace k výrobku.....	63
Obrázek 1 – Výkres elektrod.....	63
Obrázek 2 – Návrh zapojení obvodu ve stínící krabici.....	64
Obrázek 3 – Fotografie skutečného zapojení obvodu ve stínící krabici.....	64
2 Kódy z programu MATLAB	65

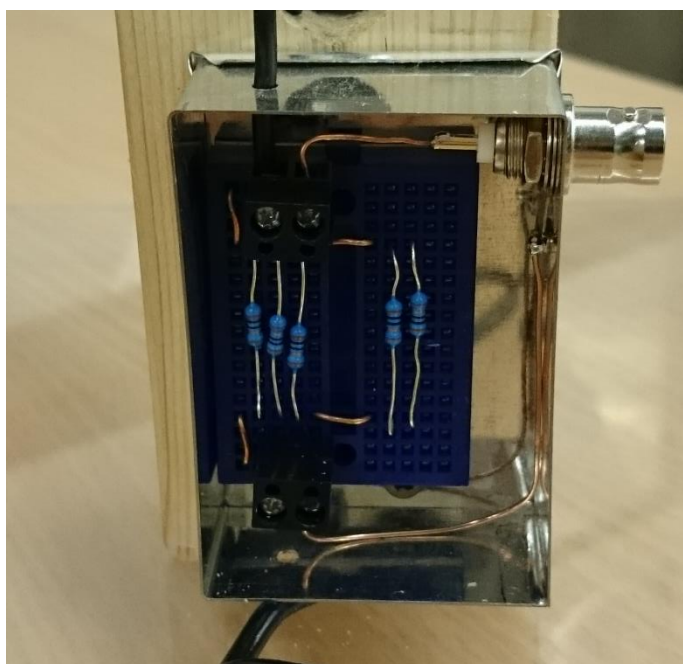
1 Doplnující dokumentace k výrobku



Obrázek 1 – Výkres elektrod



Obrázek 2 – Návrh zapojení obvodu ve stínící krabičce



Obrázek 3 – Fotografie skutečného zapojení obvodu ve stínící krabičce

2 Kódy z programu MATLAB

Všechny naměřené hodnoty jsou dostupné ve formátu .csv na přiloženém CD. Naměřené hodnoty byly importovány do programu MATLAB, kde z nich byly vytvořeny matice *hodnoty1* a *hodnoty2*. V následujících kódech se již pracuje s těmito maticemi. Nejprve je zde uveden kód pro výpočet míry odlišnosti tvaru (MOT) a poté kód pro převod hodnot do frekvenční oblasti a výpočet přenosu děliče.

Míra odlišnosti tvaru (MOT)

```
function [sumactvercu,normovaneHodnoty1,normovaneHodnoty2,delic] =
normovani(hodnoty1,hodnoty2)
%vytvoření proměnných a naplnění nulami
normovaneHodnoty1=zeros(10200,36);
normovaneHodnoty2=zeros(10200,36);
sumactvercu=zeros(1,36);
maxima=zeros(2,36);
delic=zeros(1,36);
%normování hodnot - dělení každé hodnoty maximem
for i=1:36
    maxima(1,i)=max(hodnoty1(:,i)); %maximální hodnota na vstupu
    maxima(2,i)=max(hodnoty2(:,i)); %maximální hodnota na výstupu
    normovaneHodnoty1(:,i)=hodnoty1(:,i)/maxima(1,i); %hodnoty na vstupu děliče
    normovaneHodnoty2(:,i)=hodnoty2(:,i)/maxima(2,i); %hodnoty na výstupu
    děliče
end

    for i=1:36
    for n=1:length(normovaneHodnoty1(:,1))
    %suma kvadrátů rozdílu - míra odlišnosti tvaru
    sumactvercu(1,i)=sumactvercu(1,i)+(normovaneHodnoty1(n,i)-
normovaneHodnoty2(n,i))^2;
    end
    %dělicí poměr děliče
    delic(1,i)=mean(hodnoty2(:,i)./hodnoty1(:,i));
    end
end
```

Fourierova transformace a výpočet přenosu děliče

```
function [f,prenosdB,sirkapasma,pektrum1,faze] =
fourier1(t,hodnoty1,hodnoty2)

L=length(hodnoty1); %celkový počet hodnot
Fs=1/(t(5001)-t(5000)); %stanovení vzorkovací frekvence
NFFT=2^nextpow2(L); %nalezení nejbližší vyšší mocniny 2
f=Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1); %výpočet frekvencí

%vytvoření proměnných a jejich naplnění nulami
pektrum1c=zeros(NFFT,36);
pektrum2c=zeros(NFFT,36);
pektrum1=zeros(NFFT/2+1,36);
pektrum2=zeros(NFFT/2+1,36);
prenos=zeros(NFFT/2+1,36);
prenosdB=zeros(NFFT/2+1,36);
sirkapasma=zeros(1,36);
faze=zeros(NFFT/2+1,36);

for i=1:36
```

```
%převod hodnot do frekvenčního spektra pomocí fft()
spektrum1c(:,i) = fft(hodnoty1(:,i),NFFT)/L;
spektrum2c(:,i) = fft(hodnoty2(:,i),NFFT)/L;
%vytvoření absolutních hodnot z komplexních čísel a omezení f spektra
spektrum1(:,i)=2*abs(spektrum1c(1:NFFT/2+1,i));
spektrum2(:,i)=2*abs(spektrum2c(1:NFFT/2+1,i));
%výpočet přenosu děliče
prenos(:,i)=spektrum2c(1:NFFT/2+1,i)./spektrum1c(1:NFFT/2+1,i);
%převod přenosu na dB
prenosdB(:,i)= 20*log10(abs(prenos(:,i)));
%vyhlazení hodnot
prenosdB(:,i)=fastsmooth(prenosdB(:,i),40,2,1);
%výpočet úhlu přenosu
faze(:,i)=atan(imag(prenos(:,i))./real(prenos(:,i)));
%vyhlazení hodnot úhlů přenosu
faze(:,i)=fastsmooth(faze(:,i),50,2,1);

%stanovení šířky pásma děliče (kritérium +-3dB)
for n=3:NFFT/2+1
if prenosdB(n,i)>=(prenosdB(2,i)+3) || prenosdB(n,i)<=(prenosdB(2,i)-3)
    sirkapasma(1,i)=f(1,n);
    break;
end
end

end

%omezení rozsahu hodnot - eliminace šumu
f=f(1:2560);
spektrum1=spektrum1(1:2560,:);
prenosdB=prenosdB(1:2560,:);
faze=faze(1:2560,:);

end
```

Pro vytvoření grafů byly použity samostatné skripty, které zde nejsou uvedeny, ale jsou dostupné na přiloženém CD spolu se skripty pro načtení hodnot do programu.