

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektroenergetiky a ekologie**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Měřicí systémy vysokonapěťových zdrojů napětí**

**vedoucí práce: Ing. Petr Martínek Ph.D.  
autor: Bc. Lukáš Stupka**

**2013**

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**Fakulta elektrotechnická**  
**Akademický rok: 2012/2013**

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

Jméno a příjmení: **Lukáš STUPKA**  
Osobní číslo: **E11N0134P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Měřicí systémy vysokonapěťových zdrojů napětí**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

**Z á s a d y   p r o   v y p r a c o v á n í :**

1. Vypracujte odborné pojednání týkající se problematiky vysokonapěťových zdrojů napětí určených pro experimentální výzkum a laboratorní zkoušky elektrických strojů a zařízení (typy, specifické požadavky, vlastnosti).
2. Popište způsoby přímého a nepřímého měření vysokého napětí.
3. U vybraných zdrojů vysokého napětí navrhnete vhodnou metodu měření napětí s ohledem na technické požadavky (požadované napěťové rozsahy, regulace).
4. Proveďte kalibrační měření navržených nepřímých měřicích metod a ověřte chování (linearitu) vysokonapěťového zdroje při různých napěťových úrovních.
5. Experimentálně získané výsledky zpracujte ve formě grafů a vyhodnoťte.

0 Obsah

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:


1. **Veverka, A.: Technika vysokých napětí, SNTL, 1982**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Martínek, Ph.D.**  
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**  
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**

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



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

V Plzni dne 15. října 2012

0 Obsah

## **Anotace**

Diplomová práce se zabývá problematikou vysokonapěťových zdrojů. První část je zaměřena na zkušební zdroje vysokého napětí. Obsahuje rozdělení zkušebních zdrojů, jejich vlastnosti a použití. Druhá část se zabývá způsoby měření vysokého napětí. Jsou zde uvedeny rozdíly mezi přímou a nepřímou metodou měření. Popsány způsoby měření pomocí přímých měřicích metod a použití nepřímých měřicích metod. V třetí části jsou navrženy kalibrační metody pro laboratorní zdroje vysokého napětí. Je zde provedena kalibrace nepřímých metod měření pro dané zdroje s hlavním zaměřením na rázový generátor a vyhodnocení kalibračních křivek. Součástí práce jsou i přílohy s přeskokovými hodnotami napětí, zvětšené grafické zpracování a tabulkové vyhodnocení kalibračního měření.

## **Klíčová slova**

Zkušební zdroje vysokého napětí, zkušební transformátory, transformátorové kaskády, zkušební zdroje vysokých kmitočtů, elektronické generátory, rezonanční generátory, stejnosměrné kaskády, kenotrony, tyatrony, elektrostatické generátory, zkušební zdroje rázového napětí, Marxův generátor, trigatronové zařízení, atmosférický impulz, spínací impulz, přímé měření, nepřímé měření, napěťové děliče, kulové jiskřiště, průrazné napětí, rotační voltmetr, měřicí transformátor, klydonografy, kalibrační křivka.

**Abstract**

This diploma thesis deals with high voltage sources. The first part focuses on the testing of high voltage sources. It contains division of test sources, their properties and uses. The second part deals with ways of measuring high voltage. There are differences between the direct and the indirect method of measurement. The measurement methods are described there, using the direct and the indirect measurement methods. In the third part the calibration methods are designed for high voltage laboratory power supplies. The calibration of the indirect methods of measurement is made for the given sources with a focus on an impulse generator and evaluation of the calibration curves. The thesis also contains appendixes with discharge voltages, enhanced graphics and tabular evaluation of calibration measurements.

**Key words**

Test source of high voltage, testing transformers, cascade transformers, test source high-frequency, electronic generators, resonant generators, DC cascade, kenotrons, thyratrons, electrostatic generators, surge voltage test source , Marx generator, trigatron equipment, atmospheric impulse, switching impulse, direct measurement, indirect measurement, voltage divider, spherical spark gap, breakdown voltage, rotary voltmeter, measuring transformer, clydonograph, calibration curve.

## **Prohlášení**

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

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

V Plzni dne 30.4.2013

Bc. Lukáš Stupka

0 Obsah

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Martínkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.



0 Obsah

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>9</b>
<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>12</b>
<b>2 ZKUŠEBNÍ ZDROJE VYSOKÉHO NAPĚTÍ</b> .....	<b>13</b>
2.1 ZKUŠEBNÍ ZDROJE STŘÍDAVÉ .....	14
2.1.1 Zkušební transformátory.....	14
2.1.2 Transformátorové kaskády.....	17
2.1.3 Zkušební zdroje vysokých kmitočtů .....	18
2.2 STEJNOSMĚRNÉ.....	21
2.2.1 Stejnoseměrné kaskády .....	23
2.2.2 Elektrostatické generátory .....	24
2.2.2.1 Van de Graaffův generátor.....	25
2.3 RÁZOVÉ.....	27
2.3.1 Atmosférický impulz.....	27
2.3.2 Spínací impulz.....	29
2.3.3 Generátor rázového napětí .....	30
2.3.4 Generátor opakovaných rázů.....	33
<b>3 MĚŘENÍ VYSOKÉHO NAPĚTÍ</b> .....	<b>34</b>
3.1 PŘÍMÉ METODY MĚŘENÍ.....	34
3.1.1 Měřicí kulové jiskřiště.....	35
3.1.2 Elektrostatické voltmetry.....	38
3.1.2.1 Rotační voltmetr Kirkpatrickův .....	39
3.1.2.2 Rotační elektrostatický voltmetr .....	40
3.2 NEPŘÍMÉ METODY MĚŘENÍ .....	41
3.2.1 Děliče napětí.....	41
3.2.1.1 odporové děliče .....	42
3.2.1.2 kapacitní děliče .....	43
3.2.2 měřicí transformátor .....	45
3.2.3 Ampérmetr s vysoko ohmovým předřadníkem a vysokonapěťovým odporovým děličem .....	45
3.2.4 vrcholový voltmetr .....	49
3.3 INFORMATIVNÍ MĚŘENÍ.....	49
3.3.1 Klydonografy.....	49
<b>4 NÁVRH, MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ GRAFŮ MĚŘICÍ METODY</b> .....	<b>52</b>
4.1 VOLBA VHODNÉ METODY PRO MĚŘENÍ JEDNOTLIVÝCH ZDROJŮ.....	52
4.1.1 Kalibrace rázového generátoru .....	52
4.1.2 Kalibrace stejnosměrného zdroje.....	63
4.1.3 Kalibrace střídavého zdroje.....	70
4.2 ATMOSFÉRICKÉ KOREKČNÍ FAKTORY .....	74
<b>5 ZÁVĚR</b> .....	<b>75</b>
<b>6 POUŽITÁ LITERATURA</b> .....	<b>1</b>
<b>7 PŘÍLOHY</b> .....	<b>2</b>
7.1 TABULKA 1 - VRCHOLOVÉ HODNOTY PŘESKOKOVÝCH NAPĚTÍ.....	2
7.2 TABULKA 2 - VRCHOLOVÉ HODNOTY PŘESKOKOVÝCH NAPĚTÍ.....	5
7.3 KALIBRAČNÍ KŘIVKA 50% PŘESKOKOVÉHO TABULKOVÉHO NAPĚTÍ V ZÁVISLOSTI NA NABÍJECÍM NAPĚTÍ 1 STUPNĚ RÁZOVÉHO GENERÁTORU:.....	8
.....	8
7.4 KALIBRAČNÍ KŘIVKA 50% PŘESKOKOVÉHO TABULKOVÉHO NAPĚTÍ V ZÁVISLOSTI NA NABÍJECÍM NAPĚTÍ 1 STUPNĚ RÁZOVÉHO GENERÁTORU – POROVNÁNÍ ZMĚŘENÉ A VYPOČÍTANÉ HODNOTY: .....	9

## 0 Obsah

.....	9
7.5 KALIBRAČNÍ KŘIVKA 50% PŘESKOKOVÉHO TABULKOVÉHO NAPĚTÍ V ZÁVISLOSTI NA VRCHOLOVÉM NAPĚTÍ: .....	10
7.6 KALIBRAČNÍ KŘIVKA 50% PŘESKOKOVÉHO TABULKOVÉHO NAPĚTÍ V ZÁVISLOSTI NA VRCHOLOVÉM NAPĚTÍ – POROVNÁNÍ NAMĚŘENÉ A VYPOČÍтанÉ HODNOTY: .....	11
7.7 KŘIVKA 50% PŘESKOKOVÉHO NAPĚTÍ V ZÁVISLOSTI NA VZDÁLENOSTI ELEKTROD: .....	12
7.8 KŘIVKA ZÁVISLOSTI VÝSTUPNÍHO VRCHOLOVÉHO NAPĚTÍ NA VZDÁLENOSTI ELEKTROD: .....	13
7.9 KŘIVKA ZÁVISLOSTI NABÍJECÍHO NAPĚTÍ 1 STUPNĚ RÁZOVÉHO GENERÁTORU NA VZDÁLENOSTI ELEKTROD: .....	14
7.10 TABULKA HODNOT NABÍJECÍHO A VRCHOLOVÉHO NAPĚTÍ V ZÁVISLOSTI NA 50% PŘESKOKOVÉM NAPĚTÍ: 15	
7.11 KALIBRAČNÍ KŘIVKA STEJNOSMĚRNÉHO ZDROJE VYSOKÉHO NAPĚTÍ S MIKRO-AMPÉRMETREM A PŘEDŘADNÝM ODPOREM:.....	16
7.12 KŘIVKA STEJNOSMĚRNÉHO ZDROJE VYSOKÉHO NAPĚTÍ S MIKRO-AMPÉRMETREM PRO Kladnou POLARITU NAPĚTÍ V ZÁVISLOSTI NA VZDÁLENOSTI ELEKTROD: .....	17
7.13 KŘIVKA STEJNOSMĚRNÉHO ZDROJE VYSOKÉHO NAPĚTÍ S MIKRO-AMPÉRMETREM PRO Zápornou POLARITU NAPĚTÍ V ZÁVISLOSTI NA VZDÁLENOSTI ELEKTROD: .....	18
7.14 KALIBRAČNÍ KŘIVKA STEJNOSMĚRNÉHO ZDROJE VYSOKÉHO NAPĚTÍ S ODPOROVÝM DĚLIČEM A VOLTMETREM: .....	19
7.15 KŘIVKA STEJNOSMĚRNÉHO ZDROJE VYSOKÉHO NAPĚTÍ S ODPOROVÝM DĚLIČEM A VOLTMETREM PRO Kladnou POLARITU NAPĚTÍ V ZÁVISLOSTI NA VZDÁLENOSTI ELEKTROD: .....	20
7.16 KŘIVKA STEJNOSMĚRNÉHO ZDROJE VYSOKÉHO NAPĚTÍ S ODPOROVÝM DĚLIČEM A VOLTMETREM PRO Zápornou POLARITU NAPĚTÍ V ZÁVISLOSTI NA VZDÁLENOSTI ELEKTROD: .....	21
7.17 KALIBRAČNÍ KŘIVKA STRÍDAVÉHO VYSOKÉHO NAPĚTÍ S PŘIPOJENÝM VOLTMETREM, PŘES MĚŘICÍ TRANSFORMÁTOR: .....	22
7.18 KŘIVKA EFEKTIVNÍCH HODNOT AC NAPĚTÍ V ZÁVISLOSTI NA VZDÁLENOSTI ELEKTROD:.....	23
7.19 KŘIVKA PŘEPOČTENÝCH VRCHOLOVÝCH HODNOT AC NAPĚTÍ V ZÁVISLOSTI NA VZDÁLENOSTI ELEKTROD: .....	24

**SEZNAM OBRÁZKŮ:**

OBRÁZEK 1: SCHÉMA ZAPOJENÍ DESAUEROVI KASKÁDY .....	17
OBRÁZEK 2: SCHÉMA ZAPOJENÍ TŘÍSTUPŇOVÉ TRANSFORMÁTOROVÉ KASKÁDY .....	18
OBRÁZEK 3: NÁHRADNÍ SCHÉMA REZONANČNÍHO GENERÁTORU .....	20
OBRÁZEK 4: PRIMÁRNÍ A SEKUNDÁRNÍ PRŮBĚH NAPĚTÍ REZONANČNÍHO GENERÁTORU .....	20
OBRÁZEK 5: VLNITOST USMĚRNĚNÉHO NAPĚTÍ .....	23
OBRÁZEK 6: SCHÉMA ZAPOJENÍ TŘÍSTUPŇOVÉ KASKÁDY A PRŮBĚHY NAPĚTÍ V UZLECH .....	23
OBRÁZEK 7: PRINCIP GENERÁTORU .....	26
OBRÁZEK 8: ODSTRANĚNÍ KORÓNY POMOCÍ TŘECÍCH ELEKTROD .....	26
OBRÁZEK 9: PLNÝ ATMOSFÉRICKÝ IMPULZ .....	28
OBRÁZEK 10: ATMOSFÉRICKÝ IMPULZ USEKNUTÝ VE VRCHOLU .....	28
OBRÁZEK 11: ATMOSFÉRICKÝ IMPULZ USEKNUTÝ V TÝLU .....	28
OBRÁZEK 12: SPÍNACÍ IMPULZ .....	30
OBRÁZEK 13: NÁHRADNÍ SCHÉMA JEDNOSTUPŇOVÉHO RÁZOVÉHO GENERÁTORU .....	31
OBRÁZEK 14 : HODNOTY $T_2/T_1$ , $T_1/\theta$ A $HU_M/U_C$ JAKO FUNKCE A .....	32
OBRÁZEK 15: VERTIKÁLNÍ USPOŘÁDÁNÍ KULOVÝCH JISKŘIŠŤ .....	36
OBRÁZEK 16: HORIZONTÁLNÍ USPOŘÁDÁNÍ KULOVÝCH JISKŘIŠŤ .....	37
OBRÁZEK 17: SCHÉMA STEJNOSMĚRNÉHO ELEKTROSTATICKÉHO VOLTMETRU .....	38
OBRÁZEK 18: PRINCIP ELEKTROSTATICKÉHO VOLTMETRU S ROTUJÍCÍMI PŮLVÁLCI .....	40
OBRÁZEK 19: PRINCIP ELEKTROSTATICKÉHO VOLTMETRU S ROTUJÍCÍ CLONKOU A) STAV ZACLONĚNÍ C = C <sub>MIN</sub> B) STAV ODKRYTÍ C = C <sub>MAX</sub> .....	41
OBRÁZEK 20: NÁHRADNÍ SCHÉMA A ROZLOŽENÍ NAPĚTÍ PODĚL ODPOROVÉHO DĚLIČE .....	42
OBRÁZEK 21: KMITOČTOVÁ KOMPENZACE DĚLIČE .....	43
OBRÁZEK 22: NÁHRADNÍ SCHÉMA KAPACITNÍHO DĚLIČE      OBRÁZEK 23: NÁHRADNÍ SCHÉMA ŘETĚZOVÉHO KAPACITNÍHO DĚLIČE .....	43
OBRÁZEK 24: EKVIVALENTNÍ OBVOD FREKVENČNĚ KOMPENZOVANÉHO DĚLIČE .....	44
OBRÁZEK 25: VÝSTUPNÍ PRŮBĚHY PŘI ZMĚNÁCH TLUMÍCÍHO ODPORU .....	44
OBRÁZEK 26: DC MĚŘICÍ SYSTÉM .....	46
OBRÁZEK 27: RELATIVNÍ ZMĚNA ODPORU V ZÁVISLOSTI NA TEPLOTĚ .....	46

## 0 Obsah

OBRÁZEK 28: DC NAPĚŤOVÝ DĚLIČ .....	47
OBRÁZEK 29: AC MĚŘICÍ SYSTÉM .....	47
OBRÁZEK 30: AC NAPĚŤOVÝ DĚLIČ .....	48
OBRÁZEK 31: AC VRCHOLOVÝ MĚŘICÍ OBVOD .....	49
OBRÁZEK 32: KLYDONOGRAF .....	50
OBRÁZEK 33: ZÁPORNÉ NAPĚTÍ      OBRÁZEK 34: Kladné napětí      OBRÁZEK 35: Malé kladné napětí .....	50
OBRÁZEK 36: VELKÉ Kladné napětí .....	50
OBRÁZEK 37: KLYDONOGRAF PRO MĚŘENÍ OBOU POLARIT NAPĚTÍ .....	51
OBRÁZEK 38: SCHÉMA ZAPOJENÍ RÁZOVÉHO GENERÁTORU HAEFELY .....	53
OBRÁZEK 39: KALIBRAČNÍ KŘIVKA 50% PŘESKOKOVÉHO TABULKOVÉHO VRCHOLOVÉHO NAPĚTÍ V ZÁVISLOSTI NA NABÍJECÍM NAPĚTÍ I STUPNĚ RÁZOVÉHO GENERÁTORU .....	56
OBRÁZEK 40: KALIBRAČNÍ KŘIVKA 50% PŘESKOKOVÉHO TABULKOVÉHO VRCHOLOVÉHO NAPĚTÍ V ZÁVISLOSTI NA NABÍJECÍM NAPĚTÍ I STUPNĚ RÁZOVÉHO GENERÁTORU - POROVNÁNÍ ZMĚŘENÉ A VYPOČÍTANÉ HODNOTY ....	57
OBRÁZEK 41: KALIBRAČNÍ KŘIVKA 50% PŘESKOKOVÉHO TABULKOVÉHO VRCHOLOVÉHO NAPĚTÍ V ZÁVISLOSTI NA VÝSTUPNÍM VRCHOLOVÉM NAPĚTÍ GENERÁTORU .....	58
OBRÁZEK 42: VZTAH MEZI 50% PŘESKOKOVÝM NAPĚTÍM A VÝSTUPNÍM VRCHOLOVÝM NAPĚTÍM - POROVNÁNÍ ZMĚŘENÉ A VYPOČÍTANÉ HODNOTY .....	59
OBRÁZEK 43: ZÁVISLOST 50% PŘESKOKOVÉHO NAPĚTÍ NA VZDÁLENOSTI ELEKTROD - POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH A TABULKOVÝCH HODNOT .....	59
OBRÁZEK 44: KŘIVKA ZÁVISLOSTI VÝSTUPNÍHO VRCHOLOVÉHO NAPĚTÍ NA VZDÁLENOSTI ELEKTROD .....	60
OBRÁZEK 45: KŘIVKA NABÍJECÍHO NAPĚTÍ I STUPNĚ RG NA VZDÁLENOSTI ELEKTROD .....	60
OBRÁZEK 46: PLNÁ RÁZOVÁ VLNA - PŘESKOK NA KULOVÉM JISKŘIŠTI NENASTAL ( $U_{pv} = 240 \text{ kV}$ ) .....	61
OBRÁZEK 47: KUSÁ RÁZOVÁ VLNA - VZNIKL PŘESKOK NA KULOVÉM JISKŘIŠTI ( $U_{pv} = 243 \text{ kV}$ ) .....	61
OBRÁZEK 48: PARAMETRY RÁZOVÉ VLNY .....	62
OBRÁZEK 49: SCHÉMA ZAPOJENÍ LABORATORNÍHO ZDROJE STEJNOSMĚRNÉHO VYSOKÉHO NAPĚTÍ .....	64
OBRÁZEK 50: KALIBRAČNÍ KŘIVKA DC ZDROJE S MIKRO-AMPÉRMETREM A PŘEDŘADNÝM ODPOREM .....	65
OBRÁZEK 51: KŘIVKA DC NAPĚTÍ ZDROJE S MIKRO-AMPÉRMETREM PRO Kladnou polaritu napětí v ZÁVISLOSTI NA VZDÁLENOSTI ELEKTROD .....	66
OBRÁZEK 52: KŘIVKA DC NAPĚTÍ ZDROJE S MIKRO-AMPÉRMETREM PRO Zápornou polaritu napětí v ZÁVISLOSTI NA VZDÁLENOSTI ELEKTROD .....	66
OBRÁZEK 53: KALIBRAČNÍ KŘIVKA DC ZDROJE S ODPOROVÝM DĚLIČEM A VOLTMETREM .....	68
OBRÁZEK 54: KŘIVKA DC NAPĚTÍ ZDROJE S ODPOROVÝM DĚLIČEM A VOLTMETREM PRO Kladnou polaritu napětí v ZÁVISLOSTI NA VZDÁLENOSTI ELEKTROD .....	68
OBRÁZEK 55: KŘIVKA DC NAPĚTÍ ZDROJE S ODPOROVÝM DĚLIČEM A VOLTMETREM PRO Zápornou polaritu napětí v ZÁVISLOSTI NA VZDÁLENOSTI ELEKTROD .....	69
OBRÁZEK 56: SCHÉMA ZAPOJENÍ LABORATORNÍHO ZDROJE STŘÍDAVÉHO VYSOKÉHO NAPĚTÍ .....	71
OBRÁZEK 57: KALIBRAČNÍ KŘIVKA STŘÍDAVÉHO ZDROJE VYSOKÉHO NAPĚTÍ .....	72
OBRÁZEK 58: KŘIVKA EFEKTIVNÍCH HODNOT AC NAPĚTÍ ZDROJE V ZÁVISLOSTI NA VZDÁLENOSTI ELEKTROD .....	72
OBRÁZEK 59: KŘIVKA PŘEPOČTENÝCH VRCHOLOVÝCH HODNOT AC NAPĚTÍ V ZÁVISLOSTI NA VZDÁLENOSTI ELEKTROD .....	73

**SEZNAM TABULEK:**

TABULKA 1: CELKOVÁ KAPACITA RŮZNÝCH DRUHŮ ZÁTĚŽÍ .....	15
TABULKA 2: METODY MĚŘENÍ PRO RŮZNÉ DRUHY NAPĚTÍ .....	34
TABULKA 3: PARAMETRY JISKŘIŠŤ .....	38
TABULKA 4: PARAMETRY RÁZOVÉHO GENERÁTORU HAEFELY .....	54
TABULKA 5: NAMĚŘENÉ HODNOTY 4 STUPŇOVÉHO RÁZOVÉHO GENERÁTORU .....	55
TABULKA 6: NAMĚŘENÉ A VYPOČTENÉ HODNOTY PRO MIKRO-AMPÉRMETR S PŘEDŘADNÝM ODPOREM .....	65
TABULKA 7: NAMĚŘENÍ A VYPOČTENÉ KALIBRAČNÍ HODNOTY PRO ODPOROVÝ DĚLIČ .....	67
TABULKA 8: NAMĚŘENÍ A VYPOČTENÉ KALIBRAČNÍ HODNOTY PRO AC ZDROJ S PŘIPOJENÝM VOLTMETREM PŘES MĚŘICÍ VINUTÍ TRANSFORMÁTORU .....	71

## 1 Úvod

# 1 Úvod

Tato diplomová práce vznikla jako závěrečná práce na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Práce je rozdělena na 3 hlavní části:

- Druhy vysokonapěťových zdrojů
- Způsoby přímého a nepřímého měření
- Kalibrace laboratorního zdroje, zpracování naměřených hodnot, grafické zobrazení a zhodnocení měření.

První část pojednává o problematice vysokonapěťových zdrojů napětí používaných pro experimenty, výzkum a laboratorní zkoušky elektrických zdrojů a zařízení. Zkušební zdroje jsou zde rozděleny na zdroje střídavé, stejnosměrné a rázové. V těchto kapitolách jsou popsány zdroje zastupující jednotlivou skupinu, jejich vlastnosti, konstrukce, princip činnosti a možnosti jejich regulace.

Druhá část se zabývá způsoby měření vysokého napětí. Rozdíl mezi přímou a nepřímou metodou měření. Popisuje přímé měření vysokého napětí měřicím kulovým jiskřištěm, i elektrostatickým voltmetrem. Zabývá se použitím různých druhů nepřímých metod měření, jako jsou děliče napětí, měřicí transformátor, nebo ampérmetr s předřadníkem. Jako zajímavý způsob určování zejména polarity a amplitudy napětí, i když pouze informativní je zde popsána metoda pomocí klydonografů, která na fotocitlivý materiál zaznamenává rozvětvení a velikost výboje.

Třetí část je praktická, kde jsou navrženy kalibrační metody pro jednotlivé laboratorní zdroje, které jsou součástí laboratoře vysokého napětí katedry elektroenergetiky a ekologie. Na těchto zdrojích je provedena kalibrace nepřímých měřicích metod pomocí přímé metody přeskočků na kulovém jiskřišti a změřené hodnoty jsou graficky zobrazeny do kalibračních křivek. Hlavní zaměření je kladeno na kalibraci rázového generátoru, jehož kalibrační křivky jsou vytvořeny pro účely probíhajícího výzkumu zaměřeného na problematiku chování hybridních izolací, kde je požadavek nastavování výstupního napětí s krokem 5kV. Proto jsou výsledné korekční charakteristiky pro lepší přehlednost a rychlejší odečítání zpracovány i ve formě tabulky korekčních hodnot napětí.

## 2 Zkušební zdroje vysokého napětí

## 2 Zkušební zdroje vysokého napětí

Vysoké napětí se primárně používá pro přenos elektrické energie na velké vzdálenosti a sekundárně pro zkoušení elektrických zařízení. Jelikož zařízení jsou během provozu vystavena různým napěťovým stavům, především provoznímu, nebo atmosférickému přepětí, je potřeba zjistit, zda je izolace dostatečně dimenzována, aby nedošlo k izolačnímu průrazu a poškození zařízení. [7]

Každý vyrobený předmět nebo zařízení prochází zkouškami **kusovými** a **typovými**. Při zkoušce je důležité, aby předmět byl zkoušen v takovém prostorovém uspořádání, které odpovídá uspořádání, ve kterém bude provozován. Zkoušky se provádějí za sucha, za deště a při umělém znečištění. [1]

Zkoušky se provádějí v laboratořích pomocí zkušebních zdrojů vysokého napětí. Primárním zdrojem energie je nízké napětí (400V sdružených, nebo 230V fázových při frekvenci 50 Hz) ze kterého je potřeba získat napětí vysoké. Zkoušená izolace obvykle má velmi vysokou impedanci, kde se vyskytují malé proudy, proto zkušební vysokonapěťová zařízení obvykle nevyžadují velké množství energie. [7]

### Zkušební zdroje vysokého napětí lze rozdělit na tři skupiny:

1. zkušební zdroje střídavého vysokého napětí,
2. zkušební zdroje stejnosměrného vysokého napětí,
3. zkušební zdroje rázového napětí.

Zkušební zdroje v laboratořích a zkušebnách bývají často rozměrná a většinou drahá zařízení. Při jejich pořizování je nutné uvažovat i jejich využití do budoucna, k jakému účelu budou sloužit a pro jaké zařízení. Podle těchto hledisek se pak určují požadavky na jejich parametry. Ty lze shrnout do následujících bodů:

1. Zařízení má mít dostatečný výkon nebo energii pro provedení požadované zkoušky,
2. umožnit velikost požadované vrcholové hodnoty napětí, resp. proudu,
3. regulace napětí, resp. proudu, má být plynulá,
4. z ekonomického hlediska by nemělo být zařízení příliš drahé,
5. obsluha celého zařízení má být pokud možno jednoduchá, bezpečná a měření dostatečně přesné,

## 2 Zkušební zdroje vysokého napětí

6. při provozních stavech má být křivka napětí sinusová,
7. schéma i konstrukce celého zařízení mají být jednoduché a provozně spolehlivé. [1]

### 2.1 Zkušební zdroje střídavé

Vysoké střídavé napětí je pro naše přenosové a distribuční systémy nejrozšířenějším typem přenosu elektrické energie. Proto také zkoušky elektrické izolace střídavým napětím patří k nejčastějším typům zkoušek. [1]

Pro požadavky na zkušební napětí nižší než 300 kV, je možno použít při zkoušce jen jeden zkušební transformátor. Kromě nízkonapětového a vysokonapětového vinutí obsahuje zkušební transformátor i třetí terciální vinutí, pro připojení měřících přístrojů. [1]

Za účelem snížení nákladů na izolaci, která se pro zvyšující se napětí rychle zvětšuje, se pro napětí vyšší než 300 kV používají místo jednotlivých transformátorů transformátorové kaskády. Hodnota požadovaného napětí je pak dána počtem stupňů zapojených v kaskádě. [1,7]

Velikost výstupních napětí zkušebních zdrojů se pohybuje v rozsahu efektivních hodnot napětí od 10 kV až po víc než 1.5 MV. Přenosové systémy bývají většinou třífázové, ale zkušební napětí bývá obvykle jen jedna fáze proti zemi. Tvar vlny periody musí být téměř čistě sinusový. Dovolené odchylky jsou do 5 procent efektivní hodnoty napětí harmonických složek z efektivní hodnoty periody napětí. [1]

#### 2.1.1 Zkušební transformátory

Zkušební transformátor je při střídavých vysokonapětových zkouškách nejčastěji používaným zařízením. Transformátor se provozuje při frekvenci, která odpovídá pracovním kmitočtům zkoušených objektů (tj. 50 nebo 60 Hz).

Střídavé napětí poskytované zkušebním zdrojem má mít i při zatížení zkoušeným objektem sinusový průběh. Tvar vlny může být definován jako poměr základního kmitočtu a kmitočtů vyšších harmonických řádů. Pokud se poměr maximální a efektivní hodnoty napětí neliší od  $\sqrt{2}$  o více než  $\pm 5\%$  a pokud efektivní hodnota vyšších harmonických složek

## 2 Zkušební zdroje vysokého napětí

nepřesahuje 5% efektivní hodnoty základní harmonické složky, je možné takovýto průběh výstupního napětí považovat za vyhovující. [1]

Z hlediska tepelného dimenzování není velký rozdíl mezi zkušebním a výkonovým transformátorem. Zkušební transformátor se od výkonového transformátoru liší menší hustotou magnetického toku uvnitř jádra a tím i menšími magnetizačními proudy, které deformují napětí a přinášejí do napěťového regulátoru napájecího transformátoru vyšší harmonické složky. [1]

Z konstrukčního hlediska se zkušební transformátory od výkonových transformátorů pro stejná jmenovitá napětí už odlišují.

**Hlavními rozdíly jsou:**

- a) Poměry mezi vstupním a výstupním napětím mohou být u zkušebních transformátorů velmi vysoké, často větší než 250. Výkonové transformátory mívají většinou převodní poměr menší než 10.
- b) Koeficient bezpečnosti izolace vůči přepětí bývá nízký. Zkušební transformátory nebývají vystaveny účinkům vnějších přepětí a výkon při zkouškách nebývá velký, takže přeskoky napětí ve vzduchu nemají katastrofální následky, proto zcela postačuje hodnota koeficientu 1,2 až 1,3. Oproti tomu výkonové transformátory mívají tuto hodnotu vyšší než 2.
- c) Rozsah regulace napětí u zkušebních transformátorů bývá veliký ( $0 \div U_{\max}$ ), naproti tomu výkonové transformátory jsou buď úplně bez regulace, nebo jen několik procent.
- d) Výkonové zatížení zkušebních transformátorů je poměrně malé a bývá vždy kapacitního charakteru.
- e) Indukce jádra bývá u zkušebních transformátorů hluboko pod hranicí nasycení, aby deformace křivky napětí byla co nejmenší. [1]

**Tabulka 1: Celková kapacita různých druhů zátěží**

<b>Objekt (zařízení)</b>	<b>Celková kapacita zátěže [pF]</b>
Závěsné a podpěrné izolátory	8 ÷ 20
Průchodkové izolátory	150 ÷ 400
Měřicí transformátory proudu	200 ÷ 600
Výkonové transformátory do 1 MVA	cca 1 000
Výkonové transformátory nad 1 MVA	1 000 ÷ 8 000
Kabel vn – 10 m délky	1 500 ÷ 3 000
Rotační stroje nad 100 kVA	10 000 ÷ 100 000

[1]

## 2 Zkušební zdroje vysokého napětí

Celková kapacita zkušebního transformátoru, obvodu a zkoušeného předmětu by neměla být nižší, než 1000 pF, neboť zabraňuje poklesům napětí, ke kterým dochází při vzniku částečných výbojů na zkoušeném objektu. [1]

Důsledkem kapacitní zátěže zkoušených objektů, je výstupní napětí na transformátoru zvýšeno. Výstupní napětí  $U$  lze vypočítat poměrem vinutí, ale vlivem kapacitního zatížení je skutečná hodnota vyšší než vypočítaná. Zvýšení výstupního napětí je obvykle nežádoucí, ale pro zkušební testy může být tohoto jevu využito pro snížení vstupního napětí, nebo velikosti zkušebního vybavení. [1]

Nejčastějšími typy transformátorů jsou transformátory olejové. Jsou i transformátory se vzduchovou izolací, jejichž předností je snadná výměna cívek při poškození izolace a možnost vyvedení libovolného množství odboček pro odběr různých hodnot napětí. Transformátory se vzduchovou izolací mají horší odolnost vůči prachu a vnější vlhkosti, proto bývají instalovány v prostorách s uměle udržovanou malou vlhkostí. [1]

### **Regulace napětí**

Při zkouškách vysokým napětím je nezbytná přesná regulace napětí, pak lze očekávat správnost dosaženého výsledku. V opačném případě regulace zavádí do průběhu zkoušky chybu, která může způsobit, že výsledek zkoušky může být velmi vzdálen výsledku, jenž je očekáván. Je nutné zajistit, aby systémy regulace zkušebního systému byly nastaveny velmi pečlivě, a tak se zabránilo překročení požadovaného napětí. [1]

### **Regulace napětí se provádí na straně nižšího napětí a jsou pro ni použita různá zařízení:**

- 1) regulační rezistory a indukční cívky,
- 2) regulační autotransformátory,
- 3) regulační transformátory,
- 4) synchronní generátory,
- 5) speciální regulační soustrojí. [1]

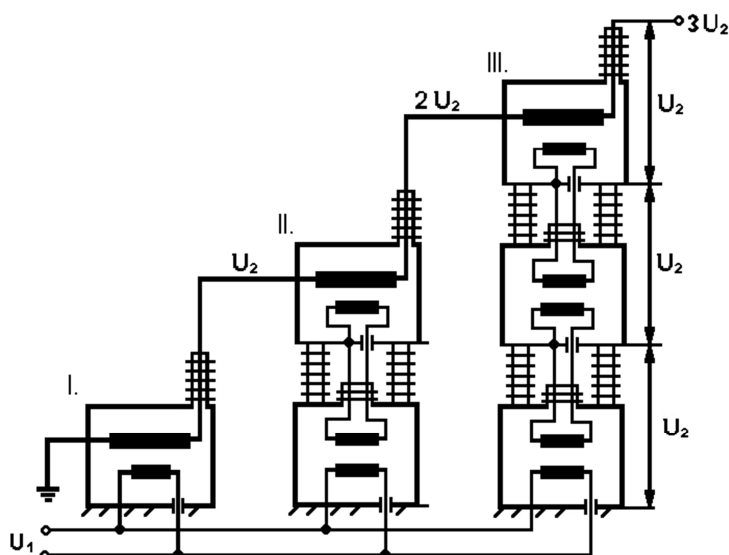


## 2 Zkušební zdroje vysokého napětí

## 2.1.2 Transformátorové kaskády

Transformátorové kaskády vznikají sériovým spojením sekundárních vinutí dvou nebo více transformátorových jednotek. Nejčastěji se používají 2 až 3 jednotky. Bývají dominantními zařízeními vysokonapěťových zkušebních laboratoří. Obrovskou výhodou přinášejí při transportu, kdy lze zařízení rozdělit na jednotlivé bloky, což usnadňuje dopravu i následnou montáž. [1]

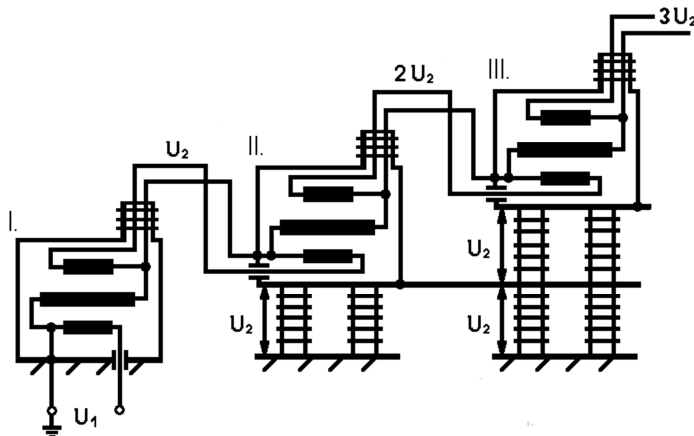
Starší a dnes málo používaný způsob kaskády je Desauerova kaskáda. Primární vinutí jsou připojena na regulované napájecí napětí 0 až  $U_{1\max}$  přes oddělovací transformátor nebo přímo. Sekundární vinutí jsou sériově pospojována. Účinnost této kaskády je 50%. [1]



Obrázek 1: Schéma zapojení Desauerovi kaskády

Dnešní způsob zapojení kaskády vychází z předchozího, ale funkce oddělovacích transformátorů je přenesena do základních transformátorů. Každá jednotka obsahuje kromě primárního a sekundárního vinutí ještě vinutí terciární, které slouží pro napájení dalšího stupně kaskády. Převod primárního a terciárního vinutí je 1:1. Každá transformátorová jednotka zároveň tvoří oddělovací transformátor pro vyšší stupně. [1]

## 2 Zkušební zdroje vysokého napětí



Obrázek 2: Schéma zapojení třístupňové transformátorové kaskády

Účinnost pro dvoustupňovou kaskádu je 66%, pro třístupňovou 50% a pro čtyřstupňovou 40%, proto není z ekonomického hlediska výhodné stavět kaskády s vyšším počtem stupňů.

Pro tři transformátorové jednotky je možno použít zapojení do hvězdy nebo trojúhelníku. Transformátory jsou lehké, kompaktní a tím je i snadná doprava a montáž. K dispozici jsou jak pro vnitřní, tak i pro venkovní použití.

Kaskádní transformátory jsou velmi drahé přístroje a složité na opravy, proto je třeba omezit vysoké zkratové proudy pomocí omezovací tlumivky ve vstupní části. Nabíjecí proud zkušebního přístroje se pohybuje od několika mA při megavoltovém rozsahu až do 10 mA při 100 kV. Velké testovací transformátory s výkonem více než 1 MVA a napětím 1 MV jsou určeny pouze pro venkovní použití. Jejich konstrukce zajišťuje uzavření jednotek kovovými prstenci a tím je zabráněno vzniku koróny. Přístroj je ukončen pomocí kulových elektrod. Moderní transformátory jsou postaveny tak, aby vydržely i přechodová napětí při přeskoku na zkoušeném objektu. [1]

### 2.1.3 Zkušební zdroje vysokých kmitočtů

Vysokonapětové zkušební zdroje o vysokých kmitočtech, jsou v elektrotechnice využívány pro výzkum elektrických výbojů a zkoušení izolace přístrojů výkonové vysokofrekvenční techniky, jako jsou např. frekvenční měniče. Význam vysokofrekvenčních testů spočívá v tom, že vysokofrekvenční oscilace způsobují selhání izolace při nižším napětí. Používají se i jako napájecí zdroje rentgenových přístrojů při vysokofrekvenčních nedestruktivních zkouškách materiálů. [1,7]

## 2 Zkušební zdroje vysokého napětí

**Mezi výhody těchto vysokofrekvenčních zdrojů patří:**

- 1) úspora nákladů a velikosti díky nepřítomnosti železných transformátorových jader,
- 2) čistý sinusový výstupní průběh,
- 3) rovnoměrné rozložení napětí na vinutí cívek,
- 4) pomalý nárůst napětí po dobu několika kmitů, proto nevznikají žádná poškození způsobená spínacím přepětím,
- 5) pokud dojde k poruše zkušebního vzorku, bude jeho kapacita vybita. To neumožní zapálení elektrického oblouku. Tato vlastnost je výhodná v kabelovém průmyslu, kde energie elektrického oblouku někdy vede k nebezpečné explozi kabelové koncovky.[1]

**Vysokofrekvenční vysoké napětí lze získat:**

- rezonančními transformátory
- elektronickými výkonovými generátory.

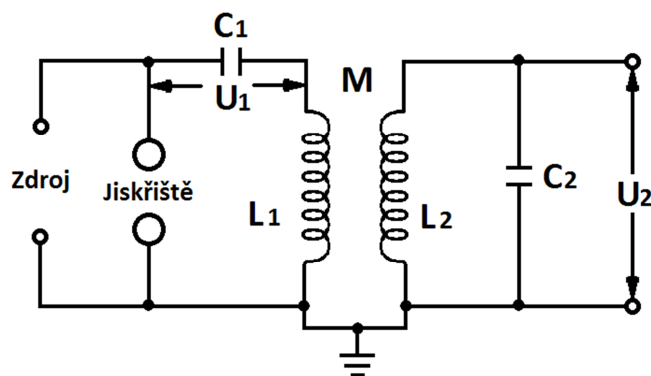
**Rezonanční transformátory**

Tyto transformátory se používají pro větší výkony při zkouškách vysokým napětím o vysokých kmitočtech. Do těchto zdrojů patří Teslův transformátor, který obsahuje dvakrát laděný rezonanční obvod. Primární napětí je 10 kV a sekundární může být od stovek kV až po několik MV.

Primární obvod je napájen z napájecího obvodu přes kondenzátor  $C_1$ . Primární i sekundární obvody pracují jako kmitavé. Pomocí jiskřiště v primárním obvodu se reguluje vrcholová hodnota výstupního napětí. Při dosažení přeskokového napětí jiskřiště na kondenzátoru dojde k výboji a primární obvod se rozkmitá s kmitočtem  $f_1$ . Vinutí  $L_1$  a  $L_2$  jsou magneticky vázané, proto se sekundární obvod rozkmitá s frekvencí  $f_2$ . [1]

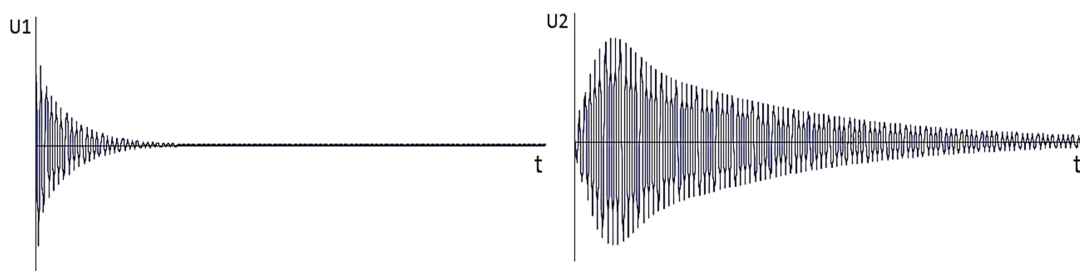
$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 \cdot C_1}} \qquad f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 \cdot C_2}}$$

## 2 Zkušební zdroje vysokého napětí



Obrázek 3: náhradní schéma rezonančního generátoru

Přenesením energie z primárního obvodu do sekundárního dochází k rychlému tlumení kmitů. Sekundární kmitů jsou tlumeny Joulovými ztrátami a ztrátami v dielektriku kondenzátoru  $C_2$  a připojeném zkoušeném předmětu. [1]



[7]

Obrázek 4: Primární a sekundární průběh napětí rezonančního generátoru

Pracovní režim transformátoru je v oblasti rezonance, kdy  $f_1 = f_2$  z čehož vyplývá, že  $L_1 C_1 = L_2 C_2$ . Změnou zkoušeného předmětu dojde ke změně kapacity  $C_2$  a tím i změně kmitočtu  $f_2$  obvod se proto musí doladit do rezonance pro každý zkoušený předmět pomocí změny indukčnosti  $L_1$ .

Vinutí transformátoru jsou laděny na 10 – 100kHz. Napětí na svorkách transformátoru je dáno hodnotou napětí na kondenzátoru a jeho velikost je dána vztahem. [1]

$$u_2 = u_1 \sqrt{\frac{C_1}{C_2}}$$

### Elektronické generátory

Tyto generátory se používají v laboratořích pro přesnější měření do výkonů 40 kVA o napětích 30 až 100kV. Vytvářejí netlumené kmitů o kmitočtech 300kHz až 1 MHz.

## 2 Zkušební zdroje vysokého napětí

### Obsahují 3 hlavní části:

- 1) oscilační obvod – bývá zapojen v dvojčinném zapojení s konstantním anodovým napětím.
- 2) zesilovače – mají regulované anodové napětí, kterým se řídí potřebný výstupní výkon.
- 3) indukční cívky výstupního napětí.

Zkušební obvod musí být v rezonanci s napájecím kmitočtem. Rezonance se nařídí pomocí vhodně zvolené odbočky a poté se doladí změnou napájecího kmitočtu. Tyto generátory bývají velmi složitá a drahá zařízení. [1]

## 2.2 Stejnoseměrné

Vysoké stejnosměrné napětí je hodně využíváno v oblasti fyziky (urychlovače, rentgenové záření). Generování vysokého stejnosměrného napětí je vyžadováno pro zkoušení přístrojů na stejnosměrný proud, dále pak zkoušení izolace kabelů, kondenzátorů, kde je střídavé napětí nepraktické, vzhledem k vysokým nabíjecím proudům. Vysoké stejnosměrné napětí je také používáno pro nabíjení rázového generátoru. V technické aplikaci se používají pro srážení a filtraci výfukových plynů v tepelných elektrárnách, elektrostatickému lakování, nebo komunikační elektronice (TV, vysílací stanice).

Jedním z nejjednodušších způsobů získávání vysokého stejnosměrného napětí je usměrněním střídavého proudu. Nejčastěji se používá jednocestné usměrnění, to se pak pomocí stejnosměrných kaskád vynásobí na požadovanou hodnotu a vyhladí vyhlazovacím kondenzátorem. Pro jednofázová zapojení je potřeba vyšší vyhlazovací kapacity, než u vícefázových zapojení, která už před vyhlazením mají menší zvlnění. Jednotlivé usměrňovače se od sebe odlišují fyzikálním principem usměrnění střídavého proudu. [1,7]

### Používají se:

- Kenotrony – vysoko-vakuové elektronkové usměrňovací ventily, které jsou vhodné pro usměrňování malých proudů při vysokém napětí.
- Tyatrony – elektrická výbojka plněná inertním plynem, nebo jejich směsí (nejčastěji rtuťové páry). Obsahuje řídicí mřížku. Používá se jako řízený usměrňovač.

## 2 Zkušební zdroje vysokého napětí

- Rtuťové usměrňovací ventily – základem usměrňování je nízkotlaký elektrický oblouk, jehož okamžik zapálení je možno řídit.
- Marxův obloukový usměrňovač – Byl vyvinut pro usměrňování velkých proudů při vysokých napětích. Usměrnění se provádí pomocí synchronně zapalovaného vysokotlakového oblouku.
- Usměrňovače kuproxidové a selénové – využívají usměrňovacího účinku mezi stykem polykrystalického polovodiče a kovu. Při vhodném zapojení se používají pro usměrnění malých proudů a vysokých napětí.
- Polovodičové usměrňovací ventily - využívají usměrňovacího účinku P-N přechodu monokrystalického polovodiče. Jedná se o usměrňovací ventily germaniové, křemíkové diody a tyristory.

Dnes se převážně využívá usměrnění pomocí polovodičových usměrňovačů, neboť nepotřebují žhavení jako vakuové ventily. Použití vysoko-vakuových a rtuťových ventilů zůstává v případech, kdy je potřeba usměrňovat velké proudy. [1]

**Střední hodnotu usměrněného napětí a hodnotu zvlnění určíme podle rovnic:**

$$\text{Střední hodnota napětí} \quad U_s = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt$$

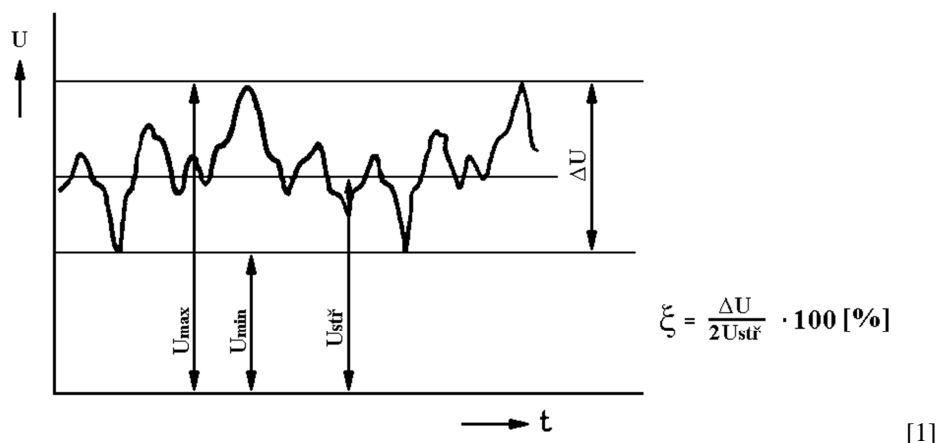
$$\text{Zvlnění napětí} \quad \delta U = \frac{U_{max} - U_{min}}{2}$$

- kde  $u(t)$  je časový průběh zvlněného výstupního napětí usměrňovače. [1]

Zvlnění nastává střídáním doby nabíjení kondenzátorů během vodivého stavu usměrňovacích ventilů a doby vybíjení kondenzátorů během nevodivého stavu usměrňovacích ventilů. Doba nabíjení bývá mnohem kratší než doba vybíjení a tím je i nabíjecí proud vyšší než svodový.

Hlavními parametry ovlivňující zvlnění jsou frekvence střídavého napájecího napětí, velikost vyhlazovací kapacity a proud zátěže. U stejnosměrných vysokonapěťových zdrojů se často určuje vlnitost napětí  $\xi$ . Vlnitost je definována jako poměr poloviny zvlnění stejnosměrného napětí k jeho střední hodnotě a vyjadřuje se v procentech. Dovolené zvlnění nesmí překročit hodnotu 5%. [1]

## 2 Zkušební zdroje vysokého napětí



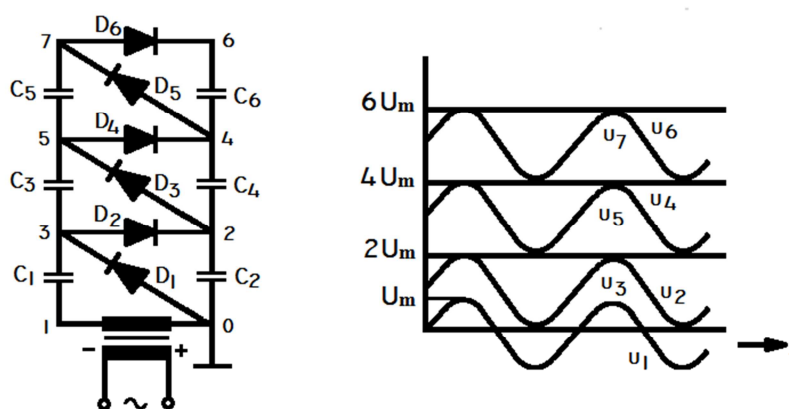
Obrázek 5: Vlnitost usměrněného napětí

Požadavky na zkušební zařízení jsou dány zkoušenými předměty, velikostí a průběhem dodávaného proudu. Kapacita zařízení a jmenovitý proud musí zajistit nabití kapacity zkoušeného předmětu, pokrývat proud odebíraný zkoušeným předmětem a dodat náboje částečných výbojů bez výrazných úbytků napětí, které by ovlivnily výsledek zkoušky.

Největší požadavky na zdroj jsou kladeny při znečišťujících testech, kde se zatěžovací proud může měnit velmi rychle v rozmezí od mA až po A. Pro tyto případy by napětí mělo být v daných mezích stabilní a to vyžaduje silný napájecí zdroj, velkou vyhlazovací kapacitu a rychlou regulaci systému. [1]

## 2.2.1 Stejnoseměrné kaskády

Princip nabíjení třístupňové stejnosměrné kaskády:



Obrázek 6: Schéma zapojení třístupňové kaskády a průběhy napětí v uzlech

## 2 Zkušební zdroje vysokého napětí

Budeme-li uvažovat, že v první půlperiodě je polarita zdroje dána dle obrázku 1, pak dioda  $D_1$  je zapojena v propustném směru a protékající proud nabíjí kondenzátor  $C_1$  na hodnotu napětí téměř  $U_m$ . V další půlperiodě, se napětí na kondenzátoru  $C_1$  a zdroje sečtou a přes otevřenou diodu  $D_2$  nabíjejí kondenzátor  $C_2$  na napětí téměř  $2U_m$ . Ve třetí půlperiodě se sériově spojí napětí zdroje, napětí na kondenzátoru  $C_1$  a napětí na kondenzátoru  $C_2$  a přes diodu  $D_3$  nabíjí kondenzátor  $C_3$ . Současně přes diodu  $D_1$  dochází k dobíjení kondenzátoru  $C_1$ . Ve čtvrté půlperiodě dojde k sériovému spojení napětí zdroje a na kondenzátorech  $C_1, C_2, C_3$  a součet těchto napětí nabíjí přes diodu  $D_4$  kondenzátor  $C_4$  na napětí téměř  $2U_m$ . Současně přes diodu  $D_2$  dochází k dobíjení kondenzátoru  $C_2$ . V páté půlperiodě k sériovému spojení napětí zdroje a na kondenzátorech  $C_1, C_2, C_3, C_4$  a součet těchto napětí nabíjí před diodu  $D_5$  kondenzátor  $C_5$  na napětí téměř  $2U_m$ . Současně přes diodu  $D_3$  dochází k dobíjení kondenzátoru  $C_3$ . V šesté půlperiodě k sériovému spojení napětí zdroje a na kondenzátorech  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$  a součet těchto napětí nabíjí přes diodu  $D_6$  kondenzátor  $C_6$  na napětí téměř  $2U_m$ . Současně přes diodu  $D_4$  dochází k dobíjení kondenzátoru  $C_4$ .

Pokud výstupní svorky budou připojeny mezi body 0 a 6 bude výstupní napětí stejnosměrné kaskády dosahovat velikosti  $U_2 \leq 6U_m$ .

Zvlnění na výstupu stejnosměrné kaskády lze vyjádřit vztahem 
$$\delta U = \frac{I}{f} \left( \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_4} + \frac{1}{C_6} \right)$$

Kondenzátory ve vyšších stupních musejí ze zdroje přijímat a odevzdávat větší náboj, což vede ke zvýšení zvlnění. To se dá odstranit tím, že kondenzátory vyšších stupňů budou mít vyšší kapacitu určenou vztahem  $C_s = s.C$ ,  $s = 1, 2, \dots, n$ .

Stejnosemné kaskády se vyrábějí od napětí 10 kV po více než 2 MV a proudu od 10  $\mu$ A do 100 mA. Zdroje o síťové frekvenci 50/60 Hz velmi omezují účinnost, proto se pro napájení používají zdroje vyšší frekvence. Dominantními jsou elektronické zdroje o frekvenci 10 kHz.[1]

### 2.2.2 Elektrostatické generátory

Stejnosemné vysoké napětí lze získat i pomocí elektrostatických generátorů. Elektrostatické generátory přímo mění mechanickou energii na elektrickou energii. Stejnosemné vysoké napětí dosahuje až do 25 MV.



## 2 Zkušební zdroje vysokého napětí

Tyto zdroje dosahují malého výkonu, neboť i přes dosažení vysokého napětí vytvářejí jen malý iontový proud. V technické praxi je lze využít např. v elektrostatických odlučovačích popílku, nebo při nanášení práškových barev a laků. [1]

### **Elektrostatický generátor se skládá z 3 hlavních částí:**

- nabíjecí systém – zařízení zabezpečující nabuzení nábojů na nosiči,
- transportér – umožňuje přenos náboje,
- sběrací systém – elektrody sbírající náboj z transportéru.

Nabuzení nábojů na nosiči se může uskutečnit:

- pomocí tření vhodného tělesa o transportér,
- elektrostatickou indukci,
- přenášením nábojů na nosič z pomocného stejnosměrného zdroje, ionizačního zařízení, nebo radioaktivního zářiče.

Elektrostatické generátory lze rozdělit na generátory:

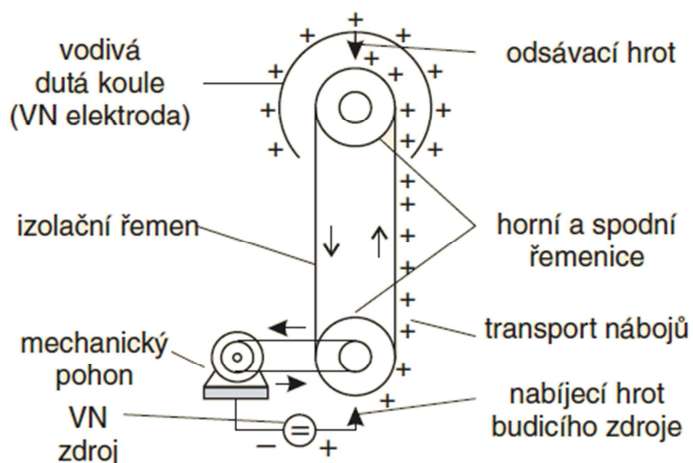
- |                       |                          |
|-----------------------|--------------------------|
| - s nevodivým nosičem | - pásové (Van de Graaff) |
|                       | - kotoučové              |
|                       | - válcové                |
| - s vodivým nosičem   | - kondenzátorové [1]     |

### **2.2.2.1 Van de Graaffův generátor**

Van de Graaffův generátor je jednou z možností jak získat vysoké stejnosměrné napětí až do cca 10 MV. Je to elektrostatický zdroj malého výkonu (několik kW) jelikož je schopen dodat jen malé proudy.

Generátor se skládá z pásu a duté vysokonapětové kovové elektrody, která je dobře izolovaná od země a na kterou je přenášen náboj pomocí obíhajícího izolačního pásu. Náboj je na obíhající pás přiveden z pomocného stejnosměrného VN zdroje vytvářející na hrotu sršící korónu. Pomocí pohyblivého pásu je náboj dopraven k horní duté elektrodě. Uvnitř elektrody je hrot, kterým je náboj sbírán. Dutá elektroda vytváří Faradayovu klec, proto náboj může být snadno pomocí hrotu odstraněn z pásu a hromaděn na povrchu elektrody. Povrchový náboj se proti zemi neustále zvyšuje až do přeskočení nebo sršivého výboje. [1,7]

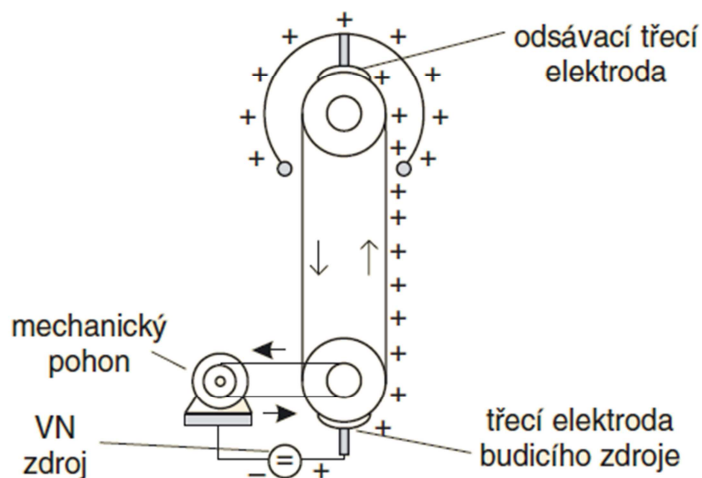
## 2 Zkušební zdroje vysokého napětí



Obrázek 7: Princip generátoru

Velkou nevýhodou tohoto typu generátoru je způsob jeho nabíjení. Korónovým nabíjením dochází totiž v okolí sršícího hrotu ke vzniku jedovatého ozonu. [1]

Možné odstranění koróny je vidět na obrázku 8.



Obrázek 8: Odstranění koróny pomocí třecích elektrod

## 2 Zkušební zdroje vysokého napětí

### 2.3 Rázové

Přístroje a zařízení připojená do elektrické soustavy jsou během poruch často vystavována 2 druhům přechodných napětí, jejichž amplituda často výrazně překračuje maximální hodnotu normálního provozu.

Atmosférická přepětí vznikají úderem blesku do fázových vodičů nebo přípojnic venkovních rozvodů a dosahují obvykle amplitudy 1000kV i více.

Spínací přepětí je způsobeno přechodovými jevy v soustavě a tvar spínací vlny je ovlivněn impedancí systému. Nárůst bývá pomalejší, ale přesto nebezpečný pro různé izolační systémy, zejména pro atmosférický vzduch.

Všechna zařízení určená pro přenos a rozvod elektrické energie, jsou podrobena rázovým zkouškám, které se provádí přiložením vysokonapětového impulsu ke zkoušenému zařízení.

Impulzy s dobou čela do 20  $\mu\text{s}$ , se nazývají atmosférické a impulzy s delší dobou čela spínací. Elektrická pevnost závisí na tvaru impulsu, proto je tvar atmosférického i spínacího impulsu pro zkoušky předepsán normou. [1]

#### 2.3.1 Atmosférický impuls

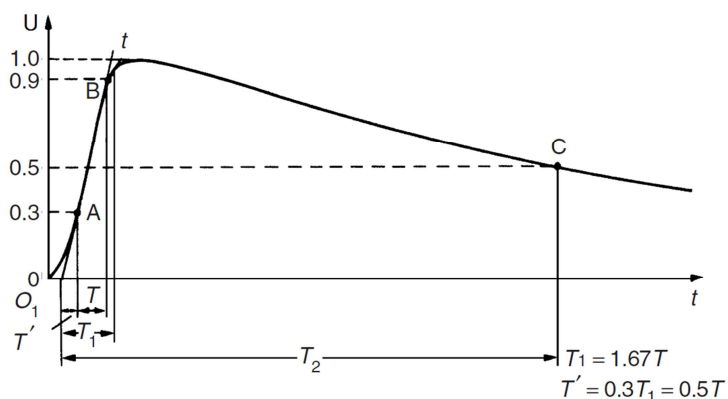
Atmosférické přepětí vzniká mezi fází a zemí, nebo mezi fázemi v daném místě, které je zasaženo bleskem. Vzniká buď přímým úderem blesku do fázového vodiče, nebo nepřímým úderem blesku do zemních lan a stožárů vlivem elektrostatické a elektromagnetické indukce od blesku, který přímo nezasáhl vedení. Amplituda tohoto přepětí bývá až 1000kV (někdy i vyšší) při proudu až 200 kA.

Atmosférický impuls je napětí aperiodického průběhu ve tvaru vlny. Jedná se o jednosměrnou vlnu vzrůstající rychle na vrcholovou hodnotu a poté pomalu klesající k nule. Je určena polaritou, vrcholovou hodnotou  $U_{\text{max}}$  (kV) a tvarem, který je určen dobou čela  $T_1(\mu\text{s})$  a dobou půl-týlu  $T_2(\mu\text{s})$ . Atmosférické a spínací impulzy se odlišují dobou trvání čela vlny.

Impulzy napětí a proudu jsou při vysokonapětových zkouškách získávány pomocí rázových generátorů, jejichž tvar je předepsán normou, která vychází ze skutečného tvaru vlny přepětí zjištěné v sítích vn, vvn a zvn. [1]

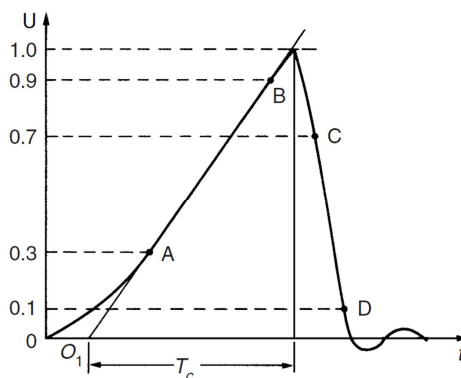
## 2 Zkušební zdroje vysokého napětí

**Plný atmosférický impulz** je ten, který není během svého trvání přerušen přeskokem nebo průrazem.

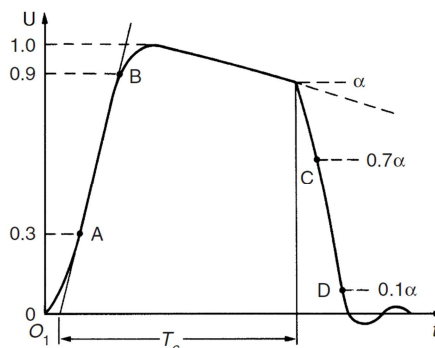


Obrázek 9: Plný atmosférický impulz

**Kusý atmosférický impulz** je přerušen přeskokem nebo průrazem, který vyvolá prudký pokles napětí zpravidla na hodnotu blízkou nule. Přeskok nebo průraz může nastat ve stoupající části vlny, vrcholu, nebo klesající části.



Obrázek 10: Atmosférický impulz useknutý ve vrcholu



Obrázek 11: Atmosférický impulz useknutý v týlu

## 2 Zkušební zdroje vysokého napětí

Doba čela  $T_1$  je parametr definovaný jako 1,67 násobek intervalu  $T$ , který představuje dobu mezi 30% a 90% vrcholovou hodnotou napětí.

Skutečný počátek  $O_1$  je doba předcházející dobu v bodě A o čas  $0,3 T_1$  a je dán průsečíkem přímky proložené body A a B v čele impulzu s časovou osou.

Doba půl-týlu je časový interval mezi skutečným počátkem  $O_1$  a časem při kterém napětí pokleslo na polovinu vrcholové hodnoty.

Doba useknutí  $T_c$  je časový interval mezi skutečným počátkem  $O_1$  a okamžikem useknutí impulzu.

Napěťový pokles je definován body C a D, které odpovídají 70% a 10% napětí při useknutí. Doba poklesu je dána 1,67 násobku časového intervalu mezi body C a D. [1]

### Normalizovaný atmosférický impulz

Je plný atmosférický impulz, kde doba čela je  $1,2\mu\text{s}$  a doby půl-týlu  $50\mu\text{s}$ . Označuje se jako impulz 1,2/50.

### Hodnoty tolerancí částí atmosférického impulzu jsou dány pro:

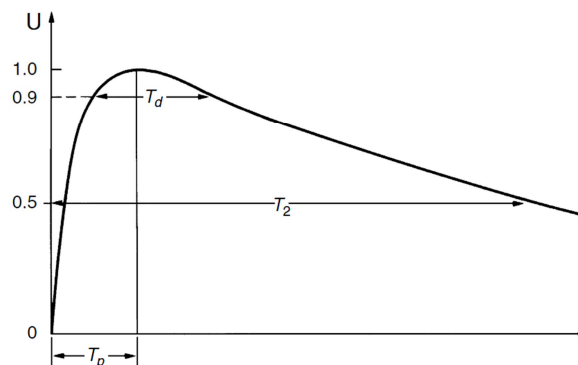
- vrcholová hodnota:  $\pm 3\%$
- doba čela:  $\pm 30\%$
- doba půl-týlu:  $\pm 20\%$  [1]

### 2.3.2 Spínací impulz

Spínací impulz je napětí aperiodického průběhu ve tvaru vlny. Je to jednosměrná vlna rychle vzrůstající na vrcholovou hodnotu a poté pomalu zanikající. Je určena polaritou, vrcholovou hodnotou  $U_{\text{max}}(\text{kV})$  a tvarem, který je dán dobou čela  $T_1(\mu\text{s})$  a dobou půl-týlu  $T_2(\mu\text{s})$ .

Spínací přepětí je přechodné napětí vytvořené v systému následkem náhlého sepnutí nebo vypnutí spínače případně jističe, nebo vznikem elektrického oblouku na porušené části v systému. [1]

## 2 Zkušební zdroje vysokého napětí



Obrázek 12: Spínací impuls

Doba  $T_p$  je časový interval mezi skutečným počátkem spínací vlny a okamžikem dosažení vrcholové hodnoty.

Doba půl-týlu  $T_2$  je časový interval mezi skutečným počátkem  $O_1$  a časem při kterém napětí pokleslo na polovinu vrcholové hodnoty.

Spínací přepětí lze považovat za pomalu rostoucí impuls s dobou čela 0,1 až 10 ms a dobu týlu od jednoho, až po několik ms. Proto také energie spínacího přepětí je vyšší než u atmosférického. [1]

**Normalizovaný spínací impuls**

Je plný spínací impuls, kde doba čela je  $250\mu\text{s}$  a doba půl-týlu  $2500\mu\text{s}$ , vytvářený pomocí impulzního generátoru. Označuje se jako impuls 250/2500.

**Hodnoty tolerancí částí spínacího impulsu jsou dány pro:**

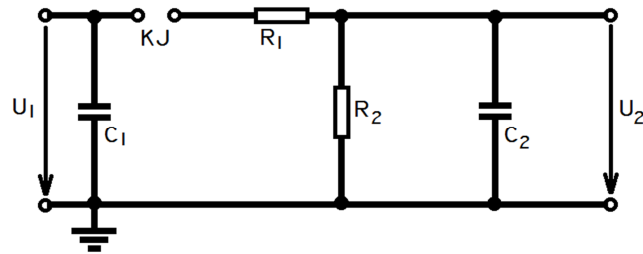
- vrcholová hodnota:  $\pm 3\%$
- doba čela:  $\pm 20\%$
- doba půl-týlu:  $\pm 60\%$  [1]

**2.3.3 Generátor rázového napětí**

Rázové generátory by měli mít přehledné uspořádání a nepatrnou indukčnost. Musejí umožňovat snadné přizpůsobení požadovaným podmínkám a pokud možno zabírat málo místa. Jejich energie závisí na druhu zkoušeného předmětu  $\frac{1}{2} (C_1 U_c^2)$ .

## 2 Zkušební zdroje vysokého napětí

Rázové generátory napětí se používají pro zkoušení izolací a určování rázových charakteristik. Další jejich využití je pro zjišťování ochrany vodičů zemnicími lany a studium výbojů vysokého napětí. [1]



Obrázek 13: Náhradní schéma jednostupňového rázového generátoru

Obrázek 13 znázorňuje jednoduché zapojení rázového generátoru. Kapacita  $C_1$  značí činnou kapacitu,  $C_2$  kapacitu zatěžovací,  $R_1$  čelní odpor a  $R_2$  týlní odpor. Kondenzátor  $C_1$  se nabije ze stejnosměrného zdroje a přes jiskřiště vybijí do obvodu  $R_1$ ,  $C_2$ ,  $R_2$ . Tvar čela rázové vlny je dán čelním odporem a zatěžovací kapacitou, která se přes tento odpor nabíjí. Tvar tylu vlny je dán napětím vytvořeným vybíjecím proudem činné kapacity na týlním odporu. Jednostupňový generátor se používá pro nižší napětí (do 300 kV). Pro vyšší napětí se využívá několikastupňového uspořádání (Marxův generátor).

Marxův generátor je sestaven z několika stupňů rázového generátoru. Jednotlivé kondenzátory jsou nabíjeny paralelně na požadované napětí. Poté pomocí jiskřišť dojde k sériovému propojení a výstupní napětí je pak rovno velikosti nabíjecího napětí 1 stupně vynásobeného počtem stupňů generátoru. V reálném obvodu nejsou kondenzátory nabíjeny na stejnou hodnotu vlivem sériové řady nabíjecích odporů, které nejsou ve srovnání se svodovými odpory kondenzátorů. [1,7]

### Pro spuštění jiskřišť mohou být použity 2 metody:

#### Spuštění při konstantním napětí

Pro první metodu by jiskřiště mělo mít vzdálenost větší než je přeskoková vzdálenost pro požadované napětí, pak budou kondenzátory nabíjeny paralelně až do požadovaného napětí. Když jsou všechny kondenzátory plně nabité, jiskřiště se sobě přiblíží a dojde k přeskoku, který pak sériově propojí nabitě kapacity.

## 2 Zkušební zdroje vysokého napětí

**Spuštění při konstantní vzdálenosti**

Druhá metoda je používaná častěji. Jiskřiště jsou mírně nastaveny na vyšší přeskovou hodnotu. Trigatronové zařízení sleduje průběh nabíjení a při dosažení požadované hodnoty vyše pomocný napěťový zdroj impulz několika kV na první zapalovací jiskřiště. Dojde k přeskoku a vzniklé přepětí spustí přeskoky v dalších stupních generátoru. Celkové napětí je pak dáno počtem zapojených stupňů. Tato metoda má vysokou spolehlivost, která je nezbytná pro rázové zkoušky. [1]

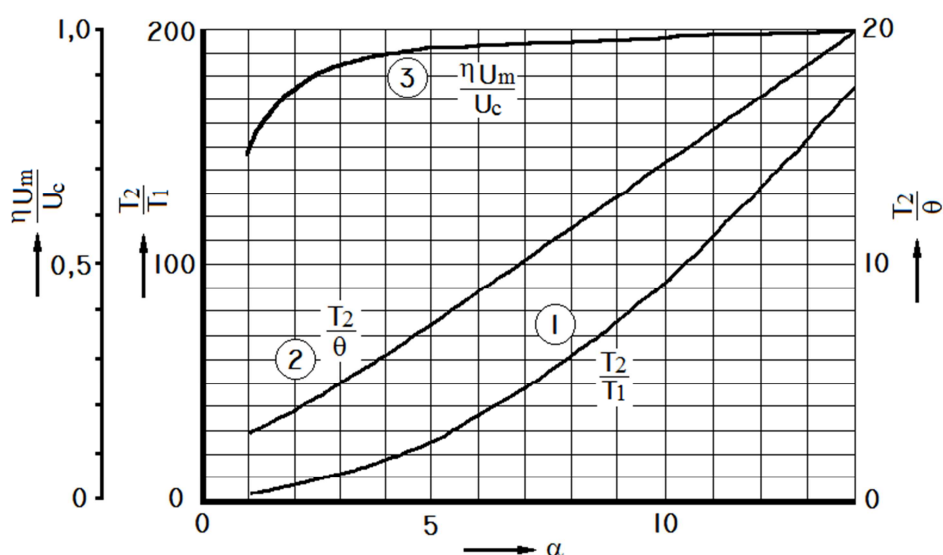
Parametry rázové vlny se mění hodnotami čelního a týlního odporu a činné kapacity.

**Určení konstant rázového generátoru pro danou vlnu napětí**

Nejčastěji bývají velikosti kapacit pevně dané a tvar vlny se nastavuje pomocí změny odporů. Nejdříve je třeba určit poměr doby trvání čela vlny a půl-týlu. Z křivky 1 na obrázku 19 se pak k tomuto poměru určí parametr  $\alpha$ . Na křivce 2 k této hodnotě je dána hodnota  $T_2/\theta$ .  $T_2$  je dáno, proto lze vypočítat hodnota  $\theta$ . Hodnota odporů se pak vypočítá podle následujících vzorců: [1]

$$X = \frac{1}{\alpha^2} \left(1 + \frac{C_2}{C_1}\right) \quad R_1 = \frac{\alpha\theta}{C_2} (1 - \sqrt{1 - X}) \quad R_2 = \frac{\alpha\theta}{C_1 + C_2} (1 + \sqrt{1 - X}) \quad \eta = 1 + \frac{C_2}{C_1} \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$$

Konstanty  $\alpha, \eta$  jsou bezrozměrné, konstanta  $\theta$  má charakter času ( $\mu\text{s}$ )



Obrázek 14 : Hodnoty  $T_2/T_1$ ,  $T_1/\theta$  a  $\eta U_m/U_c$  jako funkce  $\alpha$



## 2 Zkušební zdroje vysokého napětí

**Příklad výpočtu:** [1]

Vypočteme odpory  $R_1$  a  $R_2$  pro rázový generátor s normalizovaným tvarem vlny 1,2/50.

Je dáno:  $C_1 = 50 \cdot 10^{-3} \mu\text{F}$   
 $C_2 = 4 \cdot 10^{-3} \mu\text{F}$

Vypočteme poměr  $T_1/T_2$ :

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{50}{1,2} \cong 41,7$$

Na křivce 1 zjistíme, že této hodnotě odpovídá parametr  $\alpha$  o velikosti 6,5. Na křivce 2 odečteme parametr  $T_2/\theta = 9,5$  a vypočteme  $\theta$ .

$$\theta = \frac{50}{9,5} \cong 5,26 \mu\text{s}$$

Vypočteme pomocný činitel  $X$

$$X = \frac{1}{\alpha^2} \left( 1 + \frac{C_2}{C_1} \right) = \frac{1}{6,5^2} \left( 1 + \frac{4 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 10^{-3}} \right) = 0,0255$$

Dopočteme odpory  $R_1$  a  $R_2$

$$R_1 = \frac{\alpha \theta}{C_2} (1 - \sqrt{1 - X}) = \frac{6,5 \cdot 5,26}{4 \cdot 10^{-3}} (1 - \sqrt{1 - 0,0255}) \cong 110 \Omega$$

$$R_2 = \frac{\alpha \theta}{C_1 + C_2} (1 + \sqrt{1 - X}) = \frac{6,5 \cdot 5,26}{50 \cdot 10^{-3} + 4 \cdot 10^{-3}} (1 + \sqrt{1 - 0,0255}) \cong 1258 \Omega$$

Dále vypočteme  $\eta$

$$\eta = 1 + \frac{C_2}{C_1} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) = 1 + \frac{4 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 10^{-3}} \left( 1 + \frac{110}{1258} \right) \cong 1,087$$

Z křivky 3 odečteme  $\eta(U_m/U_c)$  a vypočteme využití vlny

$$\frac{U_m}{U_c} = \frac{0,975}{1,087} = 0,89$$

**2.3.4 Generátor opakovaných rázů**

Rázové jevy vyvolané výbojem, jsou jevy velice rychlémi, jejichž průběh se zaznamenává katodovým osciloskopem. I přes poměrně velkou setrvačnost stínítka osciloskopu je pozorování rázových jevů poměrně obtížné. Tento problém se dá odstranit pomocí generátoru opakovaných rázů, což je zařízení vyrábějící napěťové vlny o vrcholové hodnotě obvykle do 1 kV. Vhodným uspořádáním lze rázový jev v krátkých časových intervalech opakovat tak, že následující obrazy se na stínítku kryjí a vytváří stojící obraz, který je možno i fotografovat. [2]

## 3 Měření vysokého napětí

**3 Měření vysokého napětí**

Při průmyslových zkouškách a ve výzkumných laboratořích, je nezbytné, aby měření napětí a proudů probíhalo při zajištění perfektní bezpečnosti personálu a vybavení. Proto osoby manipulací se zkušebními zařízeními, nebo i měřicími zařízeními musí být chráněny proti přepětí a také proti jakémukoli naindukovanému napětí. Proto je velmi důležité umístění a uspořádání všech používaných zařízení. Pro vysoké napětí mimo rozsahy zařízení neplatí lineární extrapolace výsledků. Vážným problémem při měření impulsního napětí je elektromagnetické rušení, kterému je potřeba se vyhnout nebo ho minimalizovat. I když principy měření mohou být stejné pro měření nízkého i vysokého napětí, tak přístroje pro měření vysokých napětí se značně liší. Různá zařízení používaná pro měření vysokého napětí jsou uvedeny v následující tabulce. [10]

**Tabulka 2: Metody měření pro různé druhy napětí**

	Napětí		
	Stejnoseměrná	Střídavá	Rázová
Metoda	Mikro-ampérmetr s předřadníkem	Ampérmetr s předřadníkem	Odporové děliče
	Odporové děliče	Odporové děliče	Kapacitní děliče
	Kulová a jiná jiskřiště	Kapacitní děliče	Vrcholové voltmetry
		Měřicí transformátory	Kulová jiskřiště
		Elektrostatické voltmetry	
		Kulová jiskřiště	

[10]

**Metody měření vysokých napětí lze rozdělit do 3 kategorií:**

- 1) Metody přímého měření
- 2) Metody nepřímého měření
- 3) Metody informativní

**3.1 Přímé metody měření**

Přímé měřicí metody jsou měřicí metody bez transformace napětí na nižší hladinu a kromě korekce na tlak, teplotu a vlhkost se při nich nepoužívá žádný přepočet. Mezi přímé měřicí metody patří měření pomocí kulových jiskřišť a tabulkových hodnot, ale i užití elektrostatického voltmetru připojeného přímo na měřenou napěťovou hladinu.

### 3 Měření vysokého napětí

#### 3.1.1 Měřicí kulové jiskřiště

Měřicí jiskřiště se používá pro měření vysokého napětí přibližně od 10 kV výše, kde izolace je tvořena atmosférickým vzduchem. Fyzikální princip jiskřiště je využíván i v oblasti přepětových ochran (ochranné jiskřiště). Rychlý přechod z vysoce izolačního stavu do vodivého stavu ve vzduchové mezeře, který je výsledkem zkratu mezi kontakty vytvořeným přeskokem jiskry, je využit pro určení velikosti napětí. Pro svoji jednoduchost a spolehlivost měřicí jiskřiště pravděpodobně zůstanou součástí zařízení ve vysokonapěťových laboratořích. Geometrie jiskřiště je rozhodujícím faktorem pro jeho použití. Po několik desetiletí mezinárodní i národní normy doporučují kulová jiskřiště, která nejlépe zajišťují spolehlivost měření. Kromě měření napětí se jiskřiště používají i pro cejchování měřicích přístrojů a zařízení měřicí napětí. [3,4]

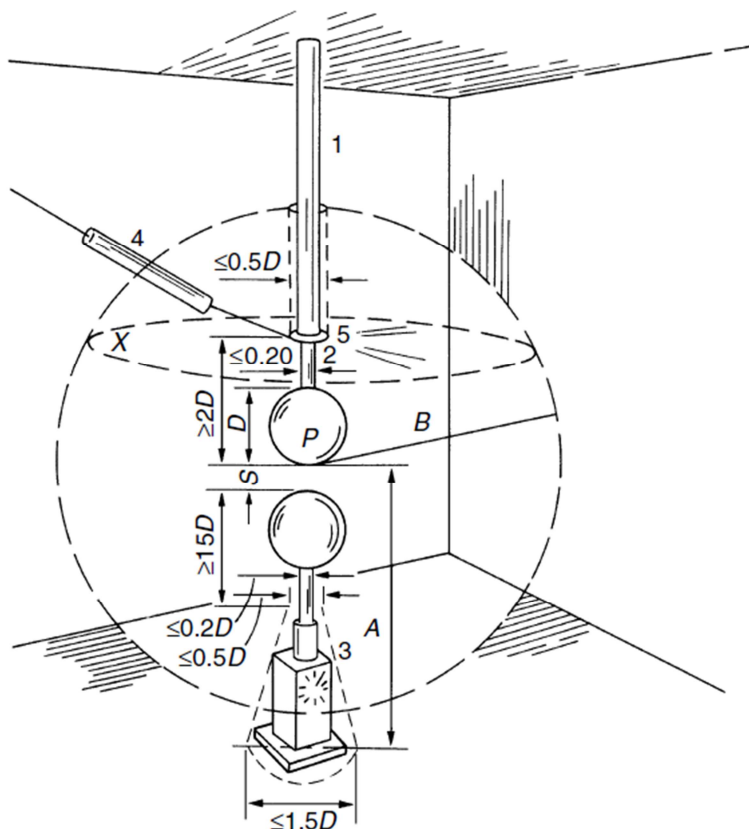
##### **Kulové jiskřiště:**

Měřicí kulové jiskřiště patří k nejdůležitějším měřicím přístrojům ve vysokonapěťových laboratořích. Dvě kovové koule stejného průměru s omezenou vzdáleností tvoří kulové jiskřiště pro měření vrcholové hodnoty střídavého, stejnosměrného, nebo rázového napětí. Omezení vzdálenosti mezery, mezi kulovými elektrodami zajišťuje poměrně homogenní rozložení elektrického pole, tak že nevznikají předvýboje ani korona. Jedna koule je přímo uzemněna a druhá kvůli omezení proudů při přeskoku a tím i poškozování koulí, je k přívodu připojena přes předřadný odpor. Předřadný odpor též zamezuje na jiskřišti vzniku vysokofrekvenčních kmitů, které by se mohly stát příčinou nenormálních přeskoků. [2,3]

##### **Tolerance pro velikost, tvar a povrch koule:**

Koule musí být provedeny tak, aby jejich povrch byl hladký a pokud možno jejich zakřivení stejná. Průměr koule se nikde nesmí lišit o více než 2% z nominální hodnoty. V oblasti jiskřících bodů by měli být zbaveny nerovností. Povrchy v jiskřící oblasti nemusí být leštěné, ale musí být čisté, suché, bez jakéhokoli laku, oleje, nebo ochranného nátěru. Pokud jsou však příliš zhrublé, je potřeba je vyměnit, nebo dát přebrousit. Dalším omezením je vysoká relativní vlhkost, kdy při hodnotách nad 90% může dojít ke kondenzaci vlhkosti na povrchu kulových elektrod a tím snížení přesnosti měření. [2,3]

## 3 Měření vysokého napětí



Obrázek 15: Vertikální uspořádání kulových jiskřišť

**1** – izolující držák, **2** – dílek koule, **3** – ovládací zařízení, **4** – přívod vysokého napětí s předřadným rezistorem, **5** – stínící elektroda, **P** – bod doskoku na kouli s vysokým napětím, **A** – výška bodu **P** nad uzemněnou rovinou, **B** – poloměr prostoru, v němž nesmí být žádný cizí předmět, **X** – část 4 nesmí procházet touto rovinou ve vzdálenosti menší než **B** od bodu **P**. [4]

**Průraz napětí**

K průrazu napětí dochází při překročení maximálního napětí, které je dáno průměrem použitých koulí a jejich vzdáleností. Průraz vzduchu, jehož elektrická pevnost je 30 kV/cm, nastává působením silného elektrického pole mezi elektrodami.

- Hodnoty průrazných napětí jsou uvedeny v příloze Tabulka 1 a Tabulka 2:

**Rozsah použití jiskřiště**

Přesnost měření závisí jednak na druhu měřeného napětí, ale také na velikosti doskoku  $S$ . Pro střídavé a rázové napětí je pro přesné měření doskok volen v rozmezí  $0.05 D$  až  $0.5 D$ , kde  $D$  je průměr použité kovové koule. Pro doskoky menší než  $0.05 D$  a doskoky v rozmezí  $0.5 D$  až  $0.75 D$ , lze jiskřiště také použít k měření, ale je potřeba počítat s horší přesností. Během měření stejnosměrného napětí dochází k větším chybám, než je tomu u střídavého nebo rázového napětí, proto se maximální doskok pro přesné měření snižuje do  $0.4 D$ , za



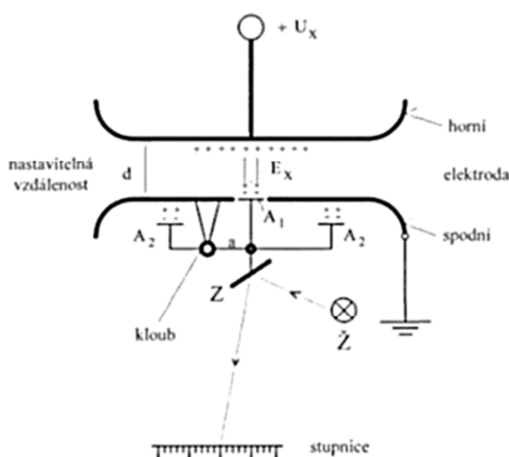
## 3 Měření vysokého napětí

Tabulka 3: Parametry jiskřišť

Průměr koulí D [cm]	Nejmenší hodnota a1	Největší hodnota a1	Nejmenší hodnota a2
do 6,25	7D	9D	14d
10 až 15	6D	8D	12d
25	5D	7D	10d
50 a 75	4D	6D	8d
100 a 125	3,5D	5D	7d
150 a 200	3D	4D	6d

## 3.1.2 Elektrostatické voltmetry

Elektrostatické voltmetry pracují na principu Coulombova zákona, kdy elektrické pole vytváří silové pole. U elektrostatických voltmetrů je silové pole vytvářeno napětím přivedeným na dvě ploché elektrody. [2]



Obrázek 17: Schéma stejnosměrného elektrostatického voltmetru

Na horní elektrodu je přivedeno kladné napětí a druhá elektroda je uzemněna. Vlivem elektrostatické indukce se mezi horní elektrodou a elektrodou A1 je vytvořeno velmi homogenní elektrické pole. Mezi elektrodou A1 a horní plošnou elektrodou působí přitažlivá elektrostatická síla  $F = Q \cdot E$ , kde  $E = \frac{U}{d}$ . Q je indukovaný náboj na elektrodě A1. Vzniká elektrostatická síla na ramenu a vytvoří ohybový moment M a natočení zrcátka. Tím dochází k lomu světelného paprsku na stupnici. Měřicí systém je opatřen dvojicí elektrod, jejichž ohybové momenty působí proti sobě a zabraňují během pohybu vibracím zrcátka. Volba měřicího rozsahu se provádí změnou vzdálenosti mezi horní a dolní plošnou elektrodou. [6]

### 3 Měření vysokého napětí

Obvykle elektrostatické voltmetry mají malou kapacitu (5 až 50 pF) a vysoký izolační odpor ( $R \geq 10^{13} \Omega$ ). Proto jsou považovány za zařízení s velkou vysokou vstupní impedancí a tím mají velmi nízký vliv na měřený obvod.

Některé přístroje jsou konstruovány jako zapouzdřené. Bývají plněny stlačeným vzduchem, CO<sub>2</sub>, nebo dusíkem. Tlak plynu může dosahovat až 15 atm. Pro namáhání tak vysoký jako 100 kV/cm může být použit elektrostatický přístroj vakuový. Přístroje se stlačeným plynem, nebo vakuové dosahují menších rozměrů. [10]

Elektrostatické voltmetry mohou být použity pro měření stejnosměrných a střídavých vysokých napětí. Obvykle se elektrostatický voltmetr používá do napětí 100 kV (některé typy až 200 kV). Měření napětí nižšího než 50 V je nemožné, jelikož je vytvořeno velmi malé silové pole. [2,6]

#### **Horní frekvenční pásmo při měření střídavých napětí určují následující podmínky:**

- 1) vlastní frekvence pohyblivého systému
- 2) rezonanční frekvence zátěže a rozptylových reaktancí s měřením kapacity
- 3) na chování opěrné, nebo řídicí pružiny (vlivem třecího odporu a pružnosti).

Frekvenční hranice bývá okolo 1 MHz. Přesnost měření pro střídavá napětí bývá  $\pm 0,25\%$  a pro stejnosměrná napětí  $\pm 0,1\%$  nebo i lepší. [10]

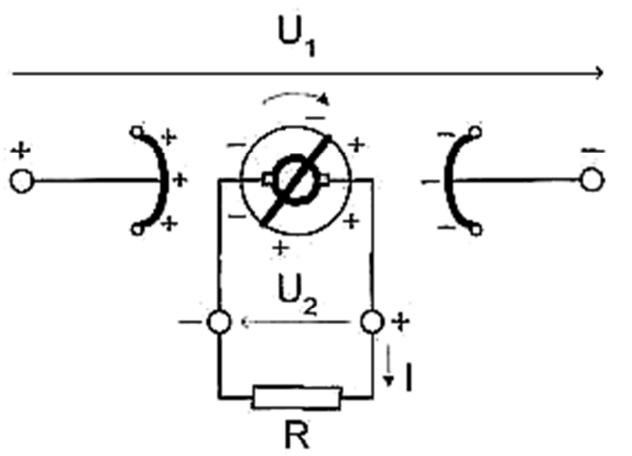
I přes výhody těchto zařízení se dnes od jejich použití při vysokonapěťových zkouškách ustupuje. Pro měření stejnosměrných napětí bývají často elektrostatické voltmetry doplňovány odporovými děliči, nebo měřicími rezistory, kdy vysoká vstupní impedance není nutná. Pro měření střídavého napětí kdy je skutečná hodnota pro dielektrické zkoušky méně důležitá mohou být použity kapacitní děliče společně s nízkonapěťovými zařízeními, které poskytují přijatelnou malou nejistotu. Současné užití těchto zařízení je velmi omezováno. [2]

#### **3.1.2.1 Rotační voltmetr Kirkpatrikův**

Rotační voltmetr je přímo připojen k měřenému vysokému napětí, které je přivedeno na dvě plošné elektrody. Přivedením vysokého napětí se mezi elektrodami vytvoří elektrické pole, ve kterém je umístěn rotující válec, který je složen ze dvou polovin. Na každé polovině válce se naindukuje elektrický náboj  $Q = C \cdot U$ , kde C je vzájemnou kapacitou mezi

## 3 Měření vysokého napětí

polovinou válce a elektrodou. Pro obě poloviny teda platí, že  $Q = 2C \cdot U$ . Naindukované elektrické náboje z rotujícího válce jsou odváděny do zátěže pomocí komutátoru a kartáčků.[6]



Obrázek 18: Princip elektrostatického voltmetru s rotujícími půlválci

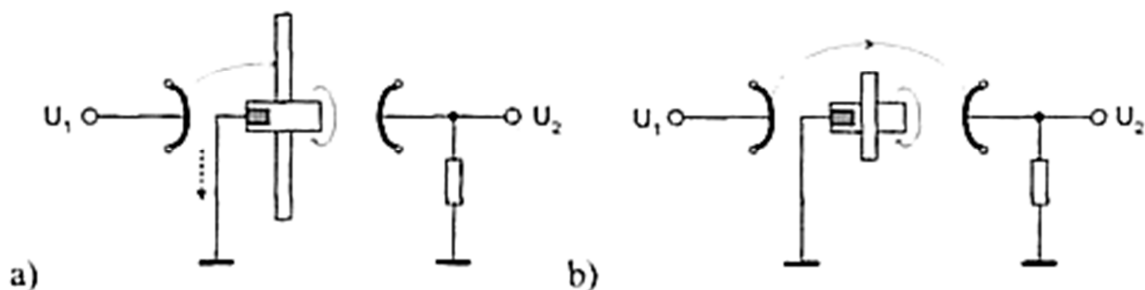
Změna elektrického náboje je závislá na rychlosti otáčení válce. Při konstantních otáčkách  $n$  je proud přiváděný do zátěže dán vztahem:  $I = 2C \cdot n \cdot U_1$ . Změna rozsahu rotačního voltmetru je prováděna změnou otáček  $n$ , nebo změnou vzdálenosti mezi elektrodami, čímž se mění vzájemná kapacita. Odběr ze zdroje měřeného napětí je zanedbatelný, jelikož je využíván pouze pro indukci elektrického náboje. Mechanické ztráty jsou hrazeny motorkem pohánějícím rotující válec. Rotační voltmetr je možno použít pro měření stejnosměrného i střídavého napětí. Má rovnoměrně dělenou stupnici a dosažitelnou přesnost 1 %. [6]

### 3.1.2.2 Rotační elektrostatický voltmetr

Rotační elektrostatický voltmetr má podobné uspořádání jako rotační Kirkpatrickův voltmetr. Při rotaci dochází mezi plošnými elektrodami k časové změně kapacity  $n$ . Změna kapacity  $\Delta C = C_{max} - C_{min}$ . Proud přiváděný do zátěže je dán vztahem:  $I = U \cdot \frac{dC}{dt}$ , kde napětí  $U$  je rovno měřenému napětí  $U_1$ . Po dosazení vyjde pro proud vztah:  $I = n \cdot \Delta C \cdot U_1$  [6]



## 3 Měření vysokého napětí



Obrázek 19: Princip elektrostatického voltmetru s rotující clonkou a) stav zaclonění  $C = C_{\min}$  b) stav odkrytí  $C = C_{\max}$

### 3.2 Nepřímé metody měření

Nepřímá měřicí metoda vyhodnocuje měřené napětí na nižší napětové hladině, než je napětová hladina měřeného signálu. Patří sem například voltmetr připojený k děliči, měřicímu vinutí transformátoru, mikro-ampérmetr s předradníkem atd. Kalibrace nepřímých měřicích systémů se provádí pomocí přímých měřicích metod.

#### 3.2.1 Děliče napětí

Děliče napětí se používají jednak k rozšiřování měřicího rozsahu elektronických přístrojů, ale také pro snížení napětí vysokonapětových zdrojů tak, aby bylo možno napětí změřit. Často se jedná o napětí řádově stovky kV, nebo MV, přičemž na vstup přístroje je možno přivést napětí 10-ky až 100-ky volt.

**Dělič napětí musí splňovat tyto podmínky:**

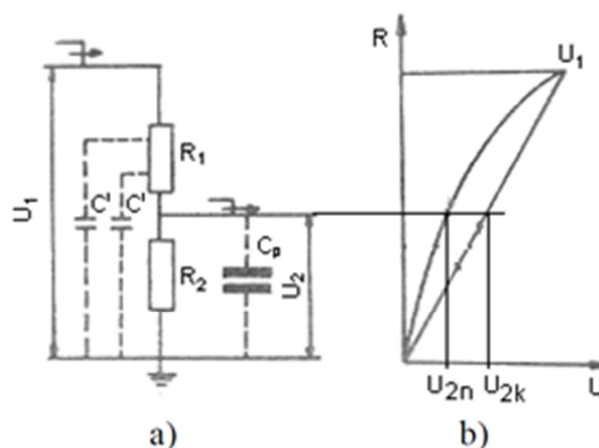
- 1) Působení děliče na měřené napětí musí být zanedbatelné
- 2) Na výstupu děliče má být napětí, které je zmenšeným obrazem měřeného vstupního napětí a je stejného tvaru. To znamená, že dělič má být frekvenčně nezávislý a napětí je pro všechny frekvence zmenšeno ve stejném poměru.

Děliče napětí mohou být odporové, kapacitní nebo kombinované. [2,4]

## 3 Měření vysokého napětí

**3.2.1.1 odporové děliče**

Odporový dělič je jednoduchý, je složen z 2 rezistorů spojených do série. Rezistory bývají na keramickém tělísku navinuty bifilárně, a tím se odstraní indukčnost odporového vodiče. Nejvyšší přesnosti dělič dosahuje při měření stejnosměrných napětí, které neobsahují střídavou složku. Při použití pro měření rychlých jevů se mohou vyskytnout velké chyby. Vliv parazitních kapacit děliče vůči zemi způsobuje nerovnoměrné rozložení elektrického pole a tím i nerovnoměrné rozdělení napětí na dělič. Skutečný dělicí poměr se pak liší od vypočítaného z hodnot odporů. Odporové děliče bývají doplněny kruhovými elektrodami připojenými na konci děliče. Pomocí parazitních proudů částečně kompenzují proudy přitékající přes kapacitu stínění k děliči a zmenšují parazitní kapacitu a tím snižují zkreslení. Obrázek 20b ukazuje průběh zakřivený průběh napětí na odporovém děliči při rychlých změnách napětí a lineární průběh při pomalých změnách napětí.



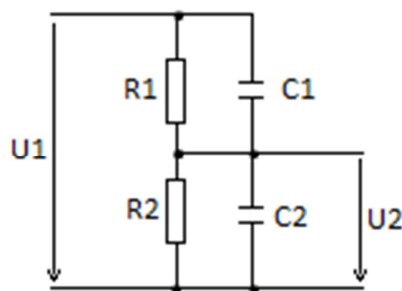
Obrázek 20: Náhradní schéma a rozložení napětí podél odporového děliče

Dělicí poměr je definován jako poměr měřeného napětí a výstupního napětí z děliče. Při měření vysokých napětí je potřeba, aby dělicí poměr byl 1 000 až 10 000. [2,4,6]

$$d = \frac{u_2(t)}{u_1(t)} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Vliv parazitních kapacit děliče je také možno odstranit kmitočtovou korekcí použitím smíšeného děliče. Smíšený dělič (dělič RC) je odporovým děličem, kde ke každému odporu je paralelně připojena kapacita. Při rychlých změnách měřených napětí se dělič chová jako kapacitní a při pomalých jako odporový. [2,4]

## 3 Měření vysokého napětí



Obrázek 21: Kmitočtová kompenzace děliče

**Napětový přenos:**

$$F(p) = \frac{\frac{R_1}{R_2}}{\frac{R_1}{R_2} + \left( \frac{1 + j\omega R_2 C_2}{1 + j\omega R_1 C_1} \right)}$$

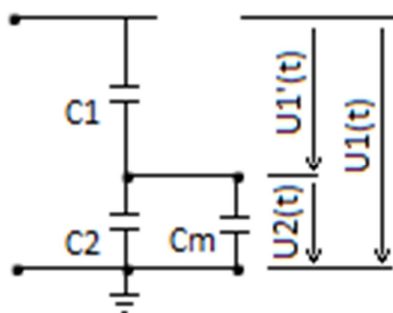
**Kmitočtovou nezávislost lze zajistit volbou časových konstant  $T_1 = T_2$**

$$T_1 = R_1 \cdot C_1$$

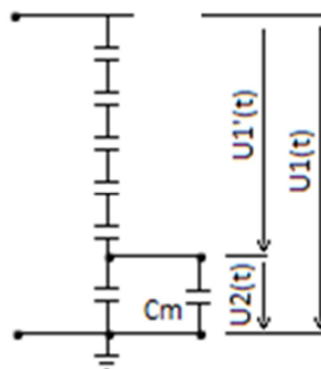
$$T_2 = R_2 \cdot C_2$$

### 3.2.1.2 kapacitní děliče

Kapacitní dělič se dá použít pro rychlé i pomalé změny napětí. Je složen z 2 sériově spojených kapacit, nebo jako řetězový dělič. Je-li možno zanedbat vliv indukčnosti a odporu, pak jeho chyba závisí na kapacitě proti zemi. Použitelnost pro velmi vysoká napětí je omezena vysokými náklady na výrobu. Vzhledem k pořizovací ceně se často místo kapacitního děliče používá dělič odporový. Kapacitní dělič nelze použít pro měření stejnosměrných vysokých napětí, neboť vlivem různých izolačních odporů by nedošlo k rozdělení napětí v obráceném poměru hodnot kapacit, ale v poměru jejich izolačních odporů a měření by bylo chybné. [2,4,6]



Obrázek 22: Náhradní schéma kapacitního děliče



Obrázek 23: Náhradní schéma řetězového kapacitního děliče

## 3 Měření vysokého napětí

Dělicí poměr je definován jako poměr měřeného napětí a výstupního napětí z děliče.

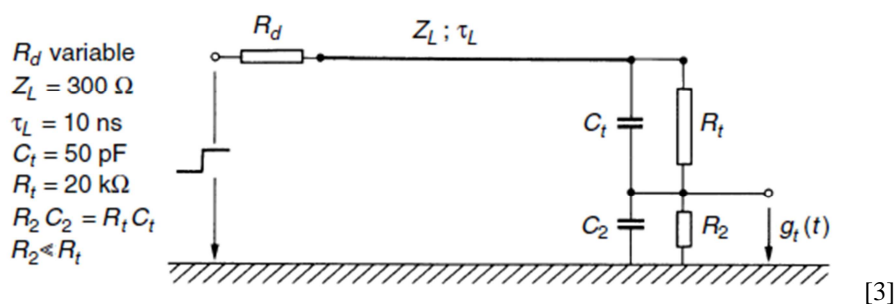
$$d = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{C_1 + C_2 + C_m}{C_1}$$

$C_m$  je kapacita měřicího přístroje a jeho přívodu.

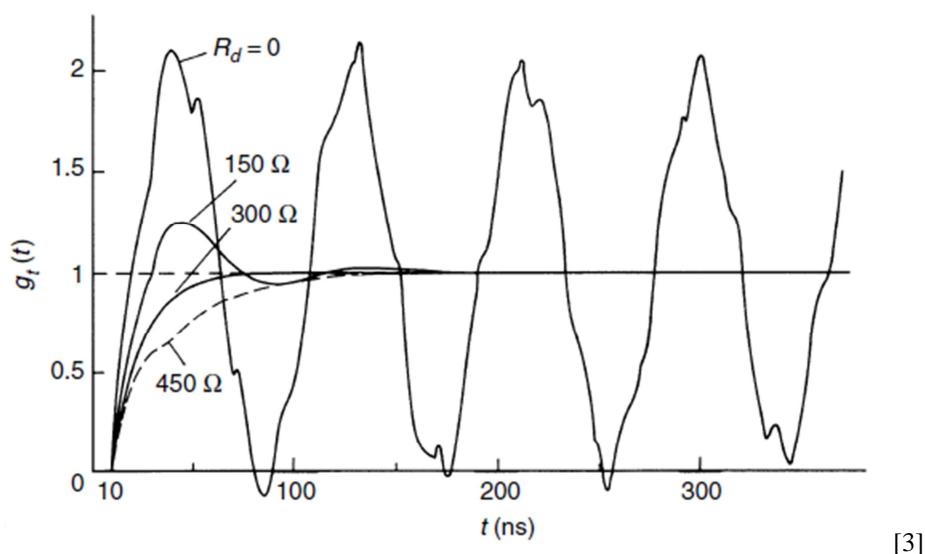
Dělicí poměr by měl být v rozmezí 1 000 až 10 000.

Samotné kondenzátorové děliče jsou citlivé na měřené napětí s krátkou dobou náběhu a výstupní napětí pak může oscilovat s neoscilujícím vstupním měřeným napětím. Proto samotné kapacitní děliče nejsou vhodné pro měření impulzů se strmým náběhem, jako jsou atmosférické rázové vlny, nebo rychlé přechodné jevy. Vylepšení kapacitního děliče se provádí sériovým zařazením rezistorů. Hodnota rezistorů není vysoká a slouží jako tlumení oscilací. [3]

**Jako ukázkou vlivu tlumícího odporu zobrazuje následující příklad:**



Obrázek 24: Ekvivalentní obvod frekvenčně kompenzovaného děliče



Obrázek 25: Výstupní průběhy při změnách tlumícího odporu

### 3 Měření vysokého napětí

#### 3.2.2 měřicí transformátor

Měřicí transformátory jsou nejstarší zařízení pro měření střídavých napětí. Mají jednoduchou konstrukci a mohou být navrženy pro jakákoli napětí. Napětový převod je dán poměrem závitů primárního vinutí  $N_1$  a sekundárního vinutí  $N_2$  a tím i poměrem primárního napětí  $U_1$  a sekundárního napětí  $U_2$ . Odchyšky měření jsou dány rozptylovou reaktancí vinutí transformátoru a je možno je kompenzovat nastavováním odboček vinutí na straně vyššího napětí pod zatížením. Napětové měřicí transformátory s dostatečnou přesností měří harmonické napětí, ale neumožňují měřit rychle rostoucí přechodné jevy, nebo napětí obsahující vysokofrekvenční složky. Jelikož měřicí transformátor pracuje na principu elektromagnetické indukce, která je závislá na frekvenci, je s měřicím transformátorem možno měřit pouze napětí o frekvenci, pro kterou byl transformátor navržen. Kromě transformace napětí na měřitelnou hodnotu měřicí transformátory i galvanicky oddělují obvody od vysokého napětí. Měřicí transformátor je do obvodu připojen paralelně a na výstupu zatížen vysokou impedancí tak, aby pracoval blízko stavu naprázdno. Měřicí transformátor má malý vnitřní odpor, proto je potřeba zamezit vzniku zkratu na sekundárním vinutí, kterým by došlo k poškození měřicího transformátoru. [8,10]

#### 3.2.3 Ampérmetr s vysoko ohmovým předřadníkem a vysokonapětovým odporovým děličem

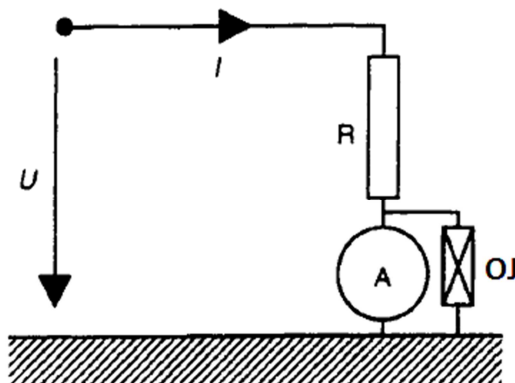
##### Stejnoseměrné napětí

Pomocí Ohmova zákona lze snížit vysoké napětí na měřitelnou hodnotu. Nejjednodušší metoda využívá mikro-ampérmetr v sérii s vysoko ohmovým rezistorem.

$$u(t) = R \cdot i(t)$$

Proud protékající přes odpor je úměrný napětí, za předpokladu, že odpor měřicího přístroje je zanedbatelný. Představuje totiž pouze několik ohmů ve srovnání s několika stovkami megaohmů rezistoru  $R$ . [2,9,10]

## 3 Měření vysokého napětí

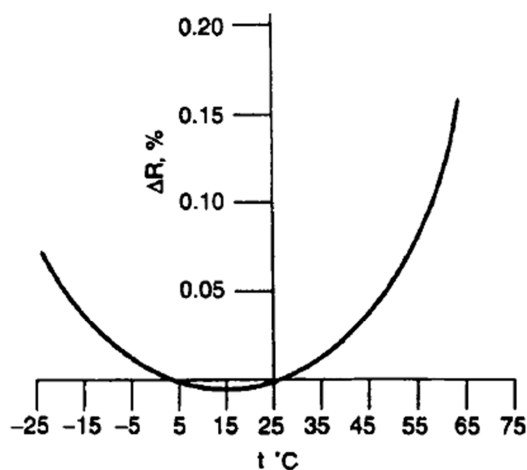


Obrázek 26: DC měřicí systém

$U$  = DC napětí,  $I$  = DC proud,  $R$  = vysokonapěťový rezistor,  $OJ$  = ochranné jiskřiště

Na obrázku 26 je zobrazeno ekvivalentní schéma obvodu. Paralelně na ampér-metr je připojen svodič přepětí, který slouží pro ochranu měřidla při odpojení měřicího kabelu, nebo v případě vysokonapěťového přeskočení přes rezistor, kdy by se plné napětí dostalo na měřicí zařízení. Vysokonapěťový rezistor je obvykle složen z několika dílčích rezistorů, které jsou navzájem sériově propojeny. Celý řetězec bývá upevněn v izolační trubici a tím získá mechanickou pevnost a zajistí se potřebná vzdálenost mezi vysokým potenciálem a uzemněním. Izolační trubice řetězce je ukončena koncovkami zabraňujícími vzniku koróny. Ohmická hodnota řetězce se volí tak, aby protékající proud se pohyboval v rozmezí od 1 do  $10\mu\text{A}$ . Odporový materiál bývá nejčastěji z uhlíkové slitiny s teplotním koeficientem  $10^{-4}/^\circ\text{C}$ . Je používán také uhlík a jiné kovy. Odporové řetězce jsou vyráběny až do napětí 500 kV stejnosměrných. [9,10]

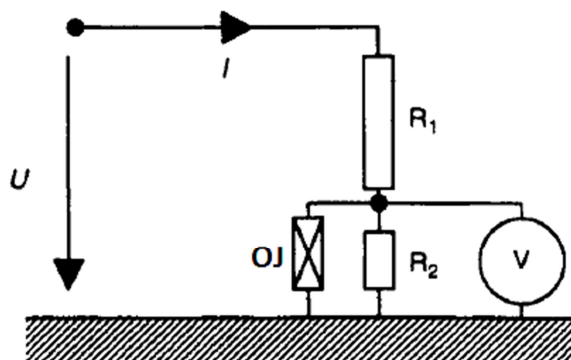
Za normálních podmínek napěťové a teplotní koeficienty nemají velký význam. Pro velmi malé nejistoty je potřeba uvažovat teplotní koeficient, jelikož má větší vliv, než napěťový.



Obrázek 27: Relativní změna odporu v závislosti na teplotě

## 3 Měření vysokého napětí

Obrázek 27 ukazuje příklad změny odporu na teplotě. Relativní změna odporu je menší než 0,05% v rozmezí teplot od  $-15^{\circ}\text{C}$  do  $50^{\circ}\text{C}$ . Této malé odchylky je možno dosáhnout pouze pečlivým výběrem rezistoru v souladu s teplotním koeficientem. Další možností kompenzování vlivu napětí a teplotního koeficientu je zobrazen na obrázku 28. Tento obvod je ve vysokonapětové technice často využíván.

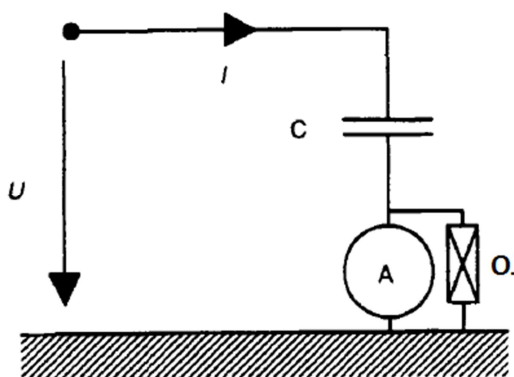


Obrázek 28: DC napětový dělič

$U$  = DC napětí,  $I$  = DC proud,  $R_1$  = vysokonapětový rezistor,  $R_2$  = nízkonapětový rezistor, OJ = ochranné jiskřiště

## Střídavé napětí

Rezistor, nebo odporový dělič, je možno také použít pro střídavé napětí v případě, že výkonová ztráta není příliš vysoká. Pro střídavé napětí se obvykle místo rezistoru používá kondenzátor, nebo kapacitní dělič.



Obrázek 29: AC měřicí systém

$U$  = AC napětí,  $I$  = AC proud,  $C$  = vysokonapětový kapacitor, OJ = ochranné jiskřiště

Vysoké napětí se určuje pomocí frekvence a změřeného proudu podle rovnice:

$$I = U\omega C$$

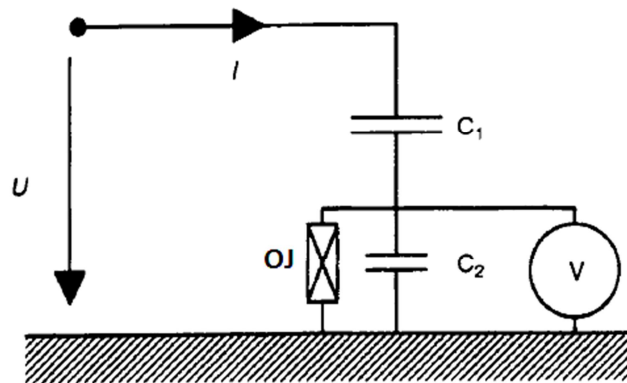
## 3 Měření vysokého napětí

Kde  $\omega$  je úhlová rychlost měřeného napětí. V Případě, že přístroj měří efektivní hodnotu, pak hodnota napětí je dána rovnicí  $U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots}$  ale proud vlivem vyšších harmonických je vyšší, než pro první harmonickou. Kapacitní dělič se obvykle používá pro střídavá měření, která nejsou ovlivněna teplotou a napětovým koeficientem kondenzátoru.

Obrázek 30 zobrazuje možnost potlačení vlivu teploty a napětového koeficientu kondenzátoru pomocí vysoko-impedančního kapacitního děliče. Výstupní napětí je dáno rovnicí

$$U_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_i}$$

Kde  $C_i$  je kapacita měřidla.



Obrázek 30: AC napětový dělič

$U$  = AC napětí,  $I$  = AC proud,  $C_1$  = vysokonapětový kapacitor,  $C_2$  = nízkonapětový kapacitor, OJ = ochranné jiskřiště

Dielektrická pevnost izolačního materiálu závisí na vrcholové hodnotě napětí. Pro sinusový průběh je možno vrcholovou hodnotu spočítat z efektivní hodnoty vynásobením  $\sqrt{2}$ . V případě jiného průběhu tento postup není možný. Za předpokladu, že neharmonický průběh, který protéká přes měřicí přístroj má symetrický tvar, je možno pro určení maximálního napětí použít zapojení dle obrázku 31 a určit proud tekoucí měřicím přístrojem jako aritmetický průměr pomocí integrálu první poloviny kladné periody podle rovnice:

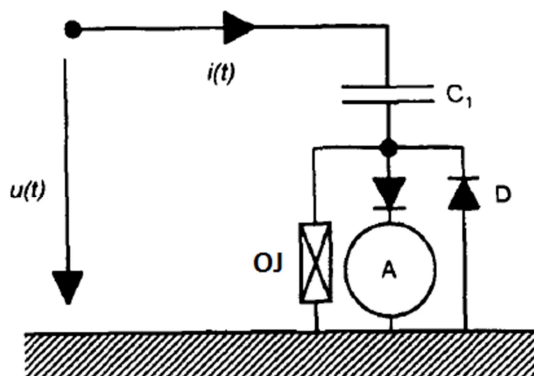
$$i_m = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} C \frac{du(t)}{du} dt = 2 f C U_m$$

Vrcholová hodnota napětí se poté určí z proudu podle následující rovnice:

$$U_m = \frac{i_m}{2 f C}$$



## 3 Měření vysokého napětí



Obrázek 31: AC vrcholový měřicí obvod

$u(t)$  = AC napětí,  $i(t)$  = AC proud,  $C1$  = vysokonapětový kapacitor,  $D$  = dioda,  $OJ$  = ochranné jiskřiště

## 3.2.4 vrcholový voltmetr

Vrcholový voltmetr slouží k měření neopakujících se vrcholových napětíových impulzů, zejména rázových napětí. V rámci mezí také měří stejnosměrné napětí a vrchol střídavého napětí. Přístroj měří nejvyšší hodnotu přivedeného napětí a je možno přepínat mezi zobrazením kladné a záporné polarity.

S použitím vstupního děliče přístroje ( $\times 1$ ,  $\times 2$ ,  $\times 4$ ,  $\times 8$ ) je možno měřit maximální napětí od 200 až po 1600V. Pro měření od několika KV musí být k sekundární jednotce připojen odporový nebo kapacitní dělič. Měřicí zařízení má vstupní impedanci  $1\text{M}\Omega / 50\text{pF}$ .

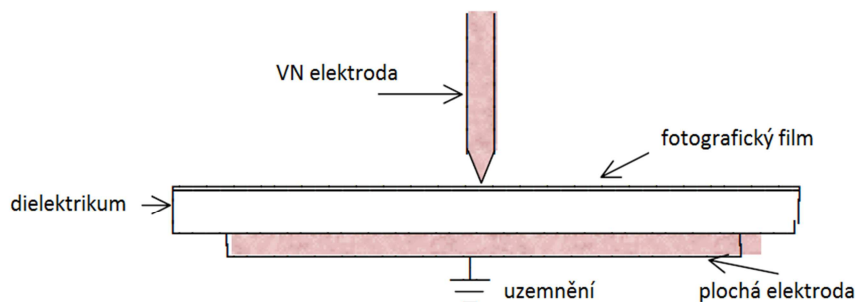
Přístroj je navržen pro vysokou odolnost před přímým elektromagnetickým rušením a hlukem způsobeným napájecím zdrojem [11]

## 3.3 Informativní měření

## 3.3.1 Klydonografy

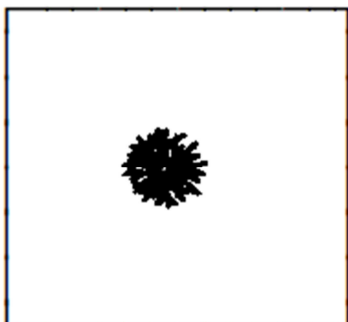
Klydonograf slouží pro informativní stanovení polarity, amplitudy a částečně i tvaru rázové napětíové vlny. Na dielektrickém povrchu (nejčastěji sklo) je umístěn fotografický film, který je vložen mezi 2 elektrody. Spodní plochá elektroda je uzemněna a na hrotovou elektrodu je přivedeno vysoké napětí. [2]

## 3 Měření vysokého napětí

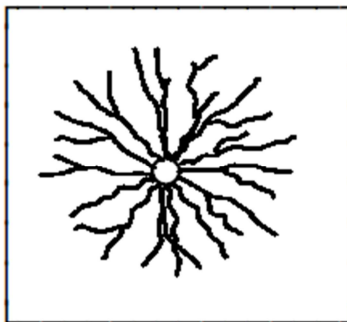


Obrázek 32: Klydonograf

Přístroj je umístěn v temném boxu, aby nedošlo o osvětlení fotocitlivého filmu. Při dopadu rázové vlny se na povrchu dielektrika vytvoří výboj, který se zachytí na fotocitlivém filmu a vytváří tzv. Lichtenbergovy obrazce. Napětí má být tak velké, aby se vytvořil jen korónový výboj. Pokud je napětí kladné polarity, vznikají rozvětvené výbojové kanálky uspořádané do hvězdicovitého tvaru. Při záporném napětí se výboje nevětví a mají neurčitý okraj. Průměr rozpětí paprsků je závislý na vrcholové hodnotě přivedeného napětí. Se vzrůstající rychlostí nárůstu napětí se zvyšuje počet rovnoměrně rozdělených výbojových paprsků. Maximální napětí, které je možno klydonografem zobrazovat, závisí na tloušťce dielektrického materiálu. Podle tvaru, průměru a množství paprskových výbojů lze určit vrcholové napětí, polaritu a strmost vlny. Klydonografů se používá k informativnímu měření přepětí na vedení a transformovnách. [2,7]



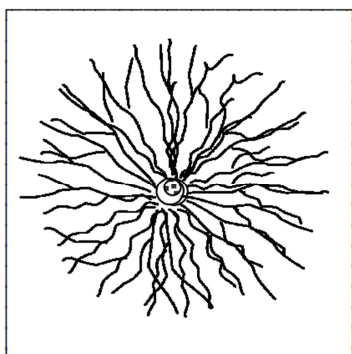
Obrázek 33: Záporné napětí



Obrázek 34: Kladné napětí



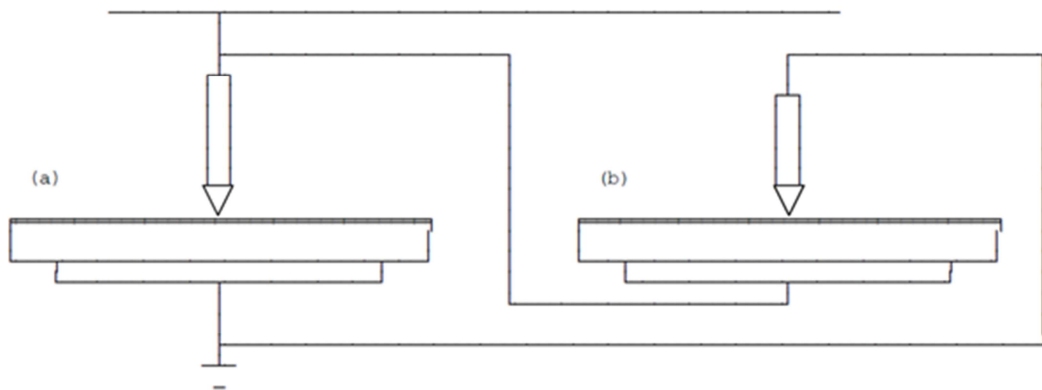
Obrázek 35: Malé kladné napětí



Obrázek 36: Velké kladné napětí

## 3 Měření vysokého napětí

V případě atmosférického přepětí, které může být kladné i záporné polarity, je modifikací přístroje možno zobrazovat i obě polarity zároveň.



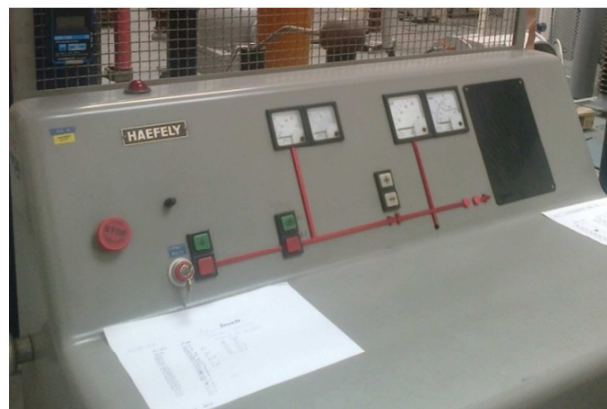
**Obrázek 37: Klydonograf pro měření obou polarit napětí**

4 Návrh, měření a zpracování grafů měřicí metody

## 4 Návrh, měření a zpracování grafů měřicí metody

### 4.1 Volba vhodné metody pro měření jednotlivých zdrojů

#### 4.1.1 Kalibrace rázového generátoru

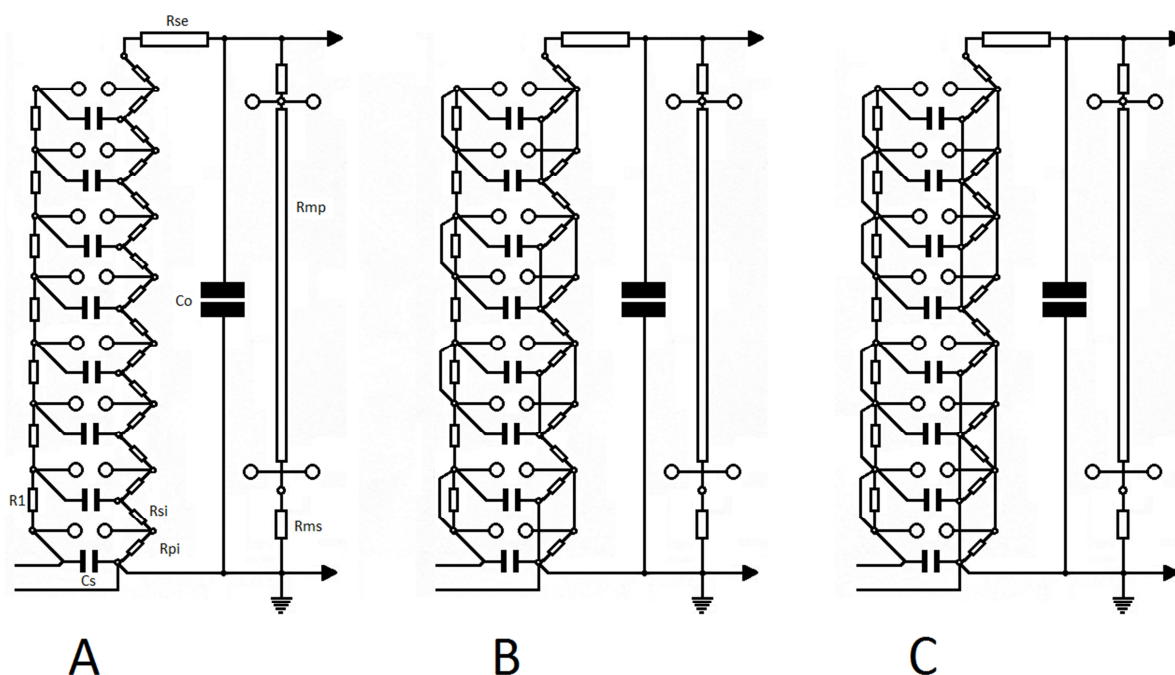


Fotografie na této straně jsou autorovy vlastní

## 4 Návrh, měření a zpracování grafů měřicí metody

Korekční charakteristiky rázového generátoru jsou vytvořeny pro zadané požadavky probíhajícího výzkumu zaměřeného na problematiku chování hybridních izolací. Pro zkoušení elektrické pevnosti bylo potřeba kalibrovat rázový generátor pro požadovaný měřicí rozsah od cca 60 kV do cca 200 kV. Podle požadovaného zkušebního napětí bylo zvoleno 4 stupňové zapojení rázového generátoru s maximálním rozsahem rázového napětí 300 kV. Toto zapojení bylo zvoleno s ohledem na pozdější využití korekčních charakteristik pro účely výzkumu, kde je požadavek nastavovat výstupní rázové napětí s krokem po 5 kV. Maximální rozsah generátoru 300 kV plně vyhovuje požadavkům a oproti 8 stupňovému zapojení, které umožňuje maximální rázové napětí 600 kV, poskytuje přesnější nastavování výstupního napětí. Kalibrační měření nepřímých měřících metod a vysokonapětového zdroje je vypracováno jako potřebný materiál projektu, a proto není provedena kalibrace v celém napětovém rozsahu zdroje, ale pouze v požadovaném napětovém rozsahu pro měření elektrické pevnosti plynného izolantu.

Kalibrace je provedena pro rázový generátor Haefely 600 kV – 4 kJ.



Obrázek 38: Schéma zapojení rázového generátoru Haefely

## 4 Návrh, měření a zpracování grafů měřicí metody

Tabulka 4: Parametry rázového generátoru Haefely

Zapojení		A	B	C
Maximální rázové napětí	U	600 kV	300 kV	150 kV
Sériové stupně		8	4	2
Paralelní stupně		1	2	4
Rázová kapacita	Cs	22,5 nF	60 nF	360 nF
Zatěžovací kapacita	Co	2 nF	2 nF	2 nF
Odporový dělič	Rpm	20 kΩ	20 kΩ	20 kΩ
Rázová rychlost	k	6/min.	6/min.	6/min.
Rázová vlna 1,2 / 50				
Zatížitelnost	Cb	0 - 1000 pF	0 - 1100 pF	0 - 1400 pF
Externí sériový odpor	Rse	150 Ω	150 Ω	150 Ω
Zatížitelnost	Cb	700 - 2700 pF	1100 - 3000 pF	1400 - 3800 pF
Externí sériový odpor	Rse	90 Ω	90 Ω	90 Ω
Indukčnost	L	29 μH	16 μH	13 μH
Sériový odpor stupně	Rsi	10 Ω		
Paralelní odpor stupně	Rpi	430 Ω		
Nabíjecí odpor stupně	R1	7 kΩ		

Hodnoty nabíjecího napětí jednoho stupně generátoru jsou snímány na odporovém děliči, který je složen z rezistorů TR 131 s maximálním provozním napětím 15 kV a ztrátovým výkonem 2 W. Odporový dělič je tvořen sériovým zapojením 10 x 20MΩ a snímací částí, která je tvořena paralelním spojením rezistorů 5 x 1MΩ. Toto paralelní zapojení je použito z důvodu ochrany připojeného měřicího zařízení pro případ přerušení odporové dráhy rezistoru.

**Výkonová ztráta 1 rezistoru:**

$$P_{\max} = 2W$$

$$R = 20 M\Omega$$

$$P_{\max} = R \cdot I_{\max}^2 \rightarrow I_{\max} = \sqrt{\frac{P_{\max}}{R}} = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot 10^7}} = 3,16227766 \cdot 10^{-4} [A]$$

$$U_{\max} = R \cdot I_{\max} = 20M\Omega \cdot I_{\max} = 6324,55 V$$

$$U_{\max \text{ snímací}} = R \cdot I_{\max} = 200k\Omega \cdot I_{\max} = 63,2 V$$

Při dodržení maximální výkonové ztráty vysokonapěťových rezistorů celého řetězce je možno připojit maximální napětí 10 x 6324,55 + 63,2 = 63308,7 V.

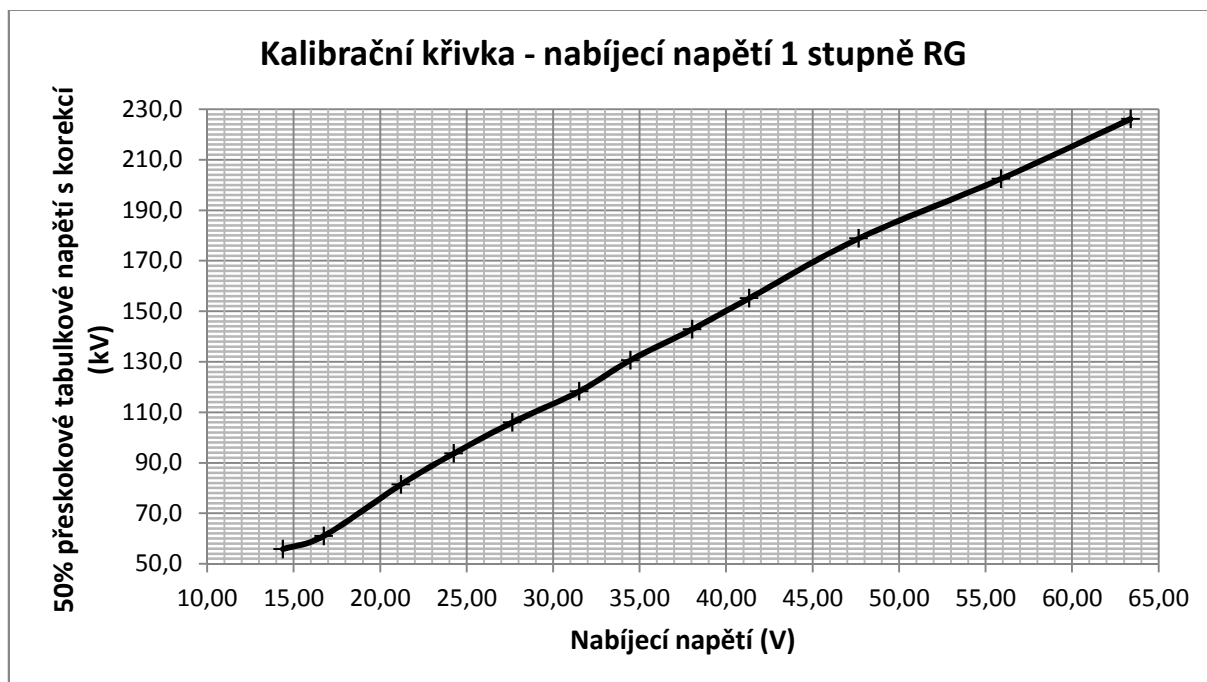
## 4 Návrh, měření a zpracování grafů měřicí metody

Měřicí obvod je složen z čtyřstupňového rázového generátoru, měřicího kulového jiskřiště, digitálního voltmetru METRA Hit 14S, odporového děliče s dělicím poměrem 1:1000, vrcholového voltmetru typ 64 a osciloskopu LeCroy 3GHz WAVEPRO7K pro zobrazení průběhu impulzu. Celý obvod je kalibrován přímou metodou pomocí kulového jiskřiště a korekce naměřených hodnot. Naměřené hodnoty a vynesené grafy jsou zpracovány v jednotkách, které zobrazují použité měřicí přístroje. Pro stanovení skutečného výstupního vrcholového napětí je potřeba hodnoty na výstupu generátoru vynásobit x4, což je nastavený rozsah přístroje a převodem rázového generátoru x530.

Tabulka 5: Naměřené hodnoty 4 stupňového rázového generátoru

$d_{50\%}$ (mm)	Nastavený doskok uvažující korekci: + 2 mm (mm)	4 stupňový rázový generátor - 500 mm kulová elektroda - jedna elektroda uzemněna				Korekce 50% kladné vrcholové hodnoty vybíjecího napětí		
		Nabíjecí napětí jednoho stupně $U_{charge}$ (V)	Vrcholový voltmetr $U_{PV}$ (V) /rozsah x4/	T (°C)	p (kPa)	$U_{50TAB}$ (kV)	korekční factor $k_H$	$U_{50KOR}$ (kV)
20	18	14,38	27,78	25,8	97,82	59,0	0,95	55,8
22	20	16,74	31,92	25,8	97,82	64,5	0,95	61,0
30	28	21,20	39,58	25,8	97,82	86,0	0,95	81,4
35	33	24,26	45,26	25,8	97,82	99,0	0,95	93,7
40	38	27,64	50,9	25,8	97,82	112,0	0,95	106,0
45	43	31,50	56,32	25,8	97,82	125,0	0,95	118,3
50	48	34,46	62,3	25,8	97,82	138,0	0,95	130,6
55	53	38,04	68	25,8	97,82	151,0	0,95	142,9
60	58	41,34	75,4	25,8	97,82	164,0	0,95	155,2
70	68	47,66	85,14	25,8	97,82	189,0	0,95	178,8
80	78	55,90	98,02	25,8	97,82	214,0	0,95	202,5
90	88	63,38	109,98	25,8	97,82	239,0	0,95	226,1

## 4 Návrh, měření a zpracování grafů měřicí metody

**Kalibrační křivka 50% přeskokového tabulkového vrcholového napětí v závislosti na nabíjecím napětí 1 stupně rázového generátoru:**

**Obrázek 39: Kalibrační křivka 50% přeskokového tabulkového vrcholového napětí v závislosti na nabíjecím napětí 1 stupně rázového generátoru**

Kalibrační křivka 50% přeskokového tabulkového napětí je lineárně závislá na vstupním nabíjecím napětí jednoho stupně rázového generátoru. Je patrné mírné zvlnění průběhu pravděpodobně způsobeného obtížným nastavením 50% přeskoků a přesností odečítání nabíjecího napětí z měřicího přístroje. Plná velikost kalibrační křivky je uvedena v příloze 7.3 a tabulkové zpracování v příloze 7.10.

Matematické vyjádření kalibrační křivky je dáno směrnicovou rovnicí přímky  $y = k \cdot x + q$ . Dosazením 2 bodů změřené kalibrační křivky získáme soustavu 2 rovnic o 2 neznámých, ze kterých určíme koeficient  $k$  a koeficient  $q$ .

$$y_1 = k \cdot x_1 + q$$

$$y_2 = k \cdot x_2 + q$$

$$14,5 = k \cdot 55 + q$$

$$53,3 = k \cdot 195 + q$$

$$q = 14,5 - k \cdot 55$$

$$53,3 = k \cdot 195 + 14,5 - k \cdot 55$$

$$38,8 = k \cdot 140$$

$$k = 0,2771$$

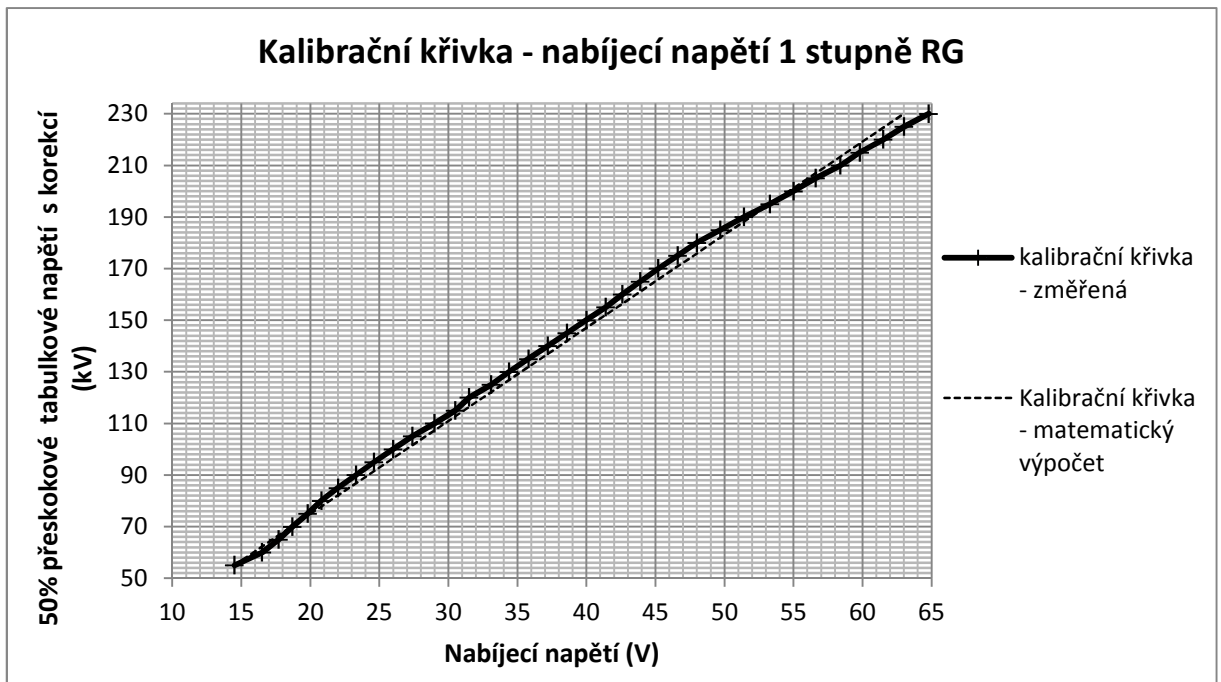
$$q = 14,5 - 0,2771 \cdot 55 = -0,7428$$

Rovnice kalibrační přímky pro závislost 50% přeskokového vrcholového napětí na vstupním nabíjecím napětí je:

$$y = 0,2771 \cdot x - 0,7428$$



## 4 Návrh, měření a zpracování grafů měřicí metody



**Obrázek 40:** Kalibrační křivka 50% přeskokového tabulkového vrcholového napětí v závislosti na nabíjecím napětí 1 stupně rázového generátoru - porovnání změřené a vypočítané hodnoty

Plná velikost kalibrační křivky, je uvedena v příloze 7.4

## 4 Návrh, měření a zpracování grafů měřicí metody

**Kalibrační křivka 50% přeskokového tabulkového vrcholového napětí v závislosti na výstupním vrcholovém napětí generátoru:**

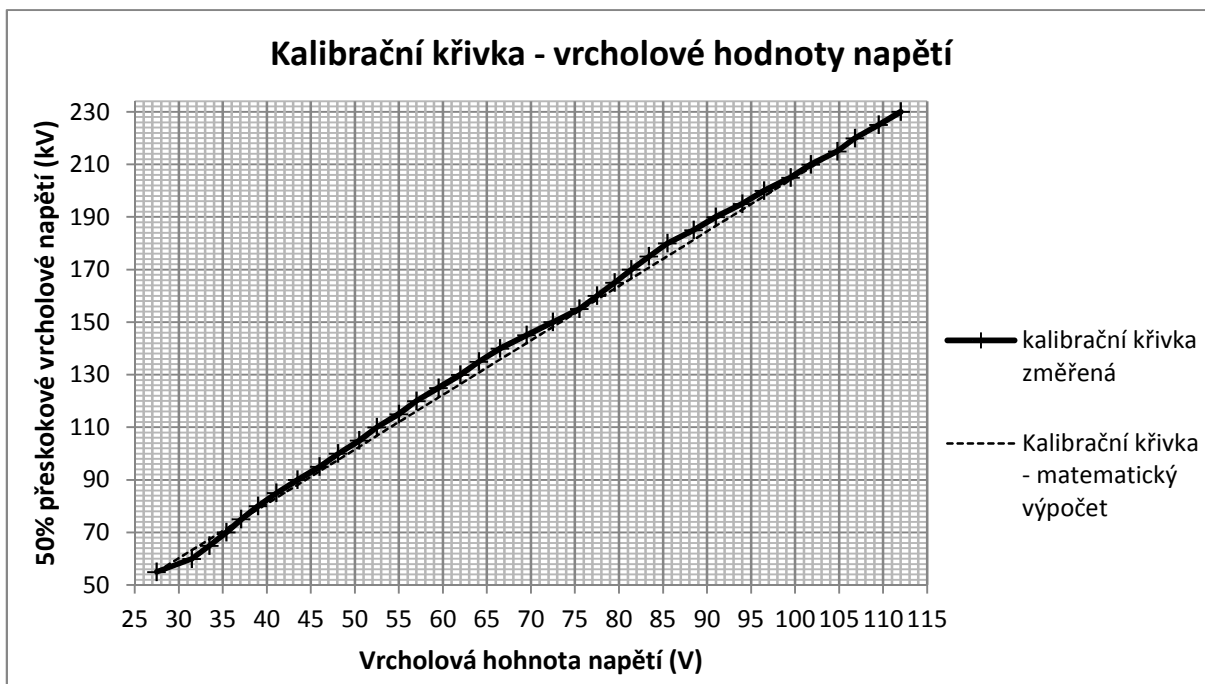
**Obrázek 41: Kalibrační křivka 50% přeskokového tabulkového vrcholového napětí v závislosti na výstupním vrcholovém napětí generátoru**

Kalibrační křivka zobrazuje vztah mezi 50% přeskokovým tabulkovým napětím a vrcholovým výstupním napětím. Průběh křivky je lineární s mírným zvlněním. Plná velikost kalibrační křivky, je uvedena v příloze 7.5 a tabulkové zpracování v příloze 7.10.

Matematické vyjádření kalibrační křivky je dáno směrnicovou rovnicí přímky:

$$y = 0,84285 \cdot x + 0,9428$$

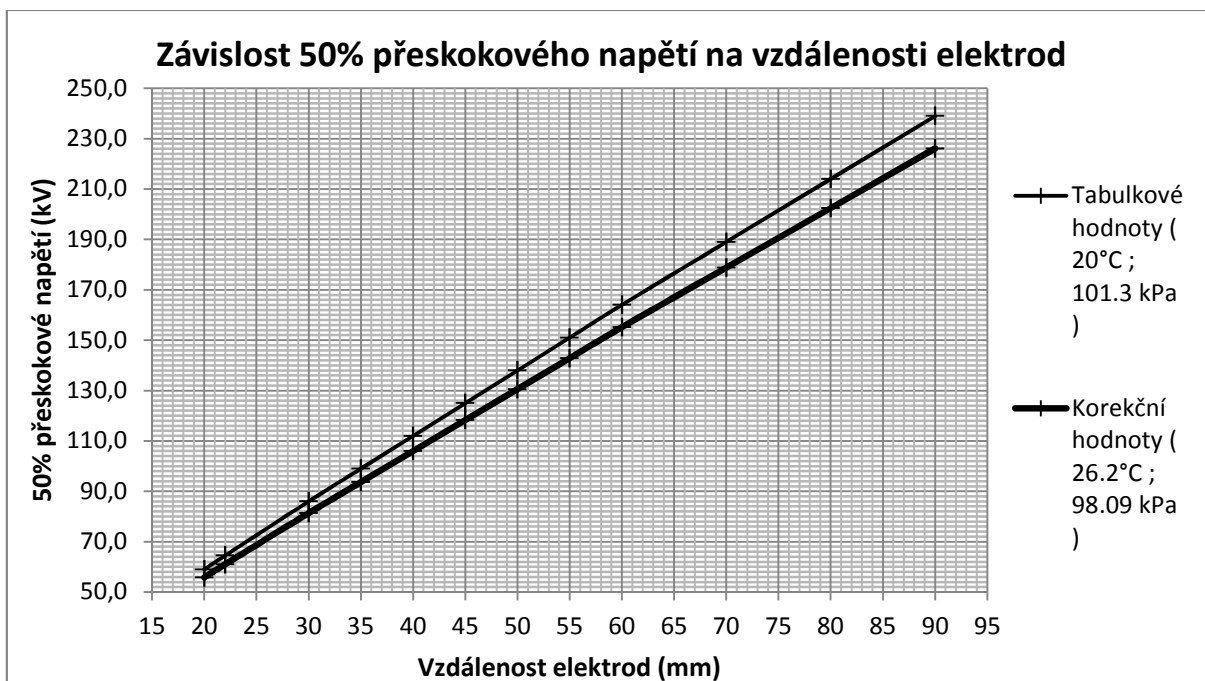
## 4 Návrh, měření a zpracování grafů měřicí metody



**Obrázek 42:** Vztah mezi 50% přeskovým napětím a výstupním vrcholovým napětím - porovnání změřené a vypočítané hodnoty

Plná velikost kalibrační křivky, je uvedena v příloze 7.6

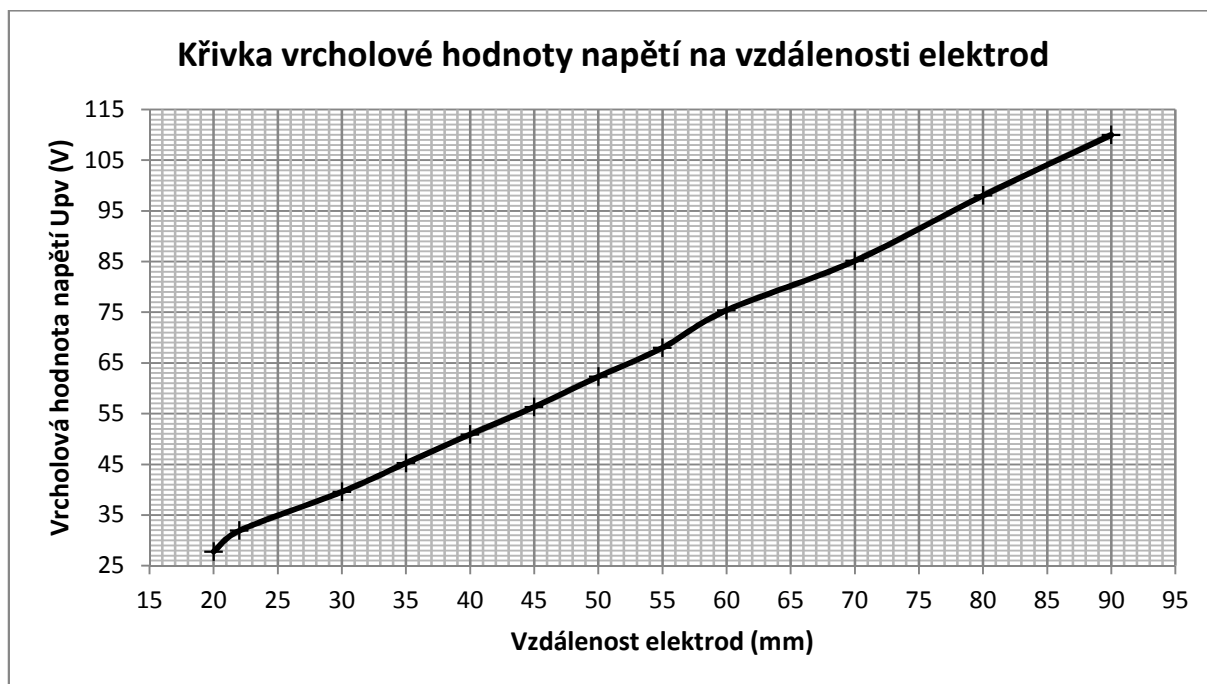
**Křivka 50% přeskového napětí v závislosti na vzdálenosti elektrod:**



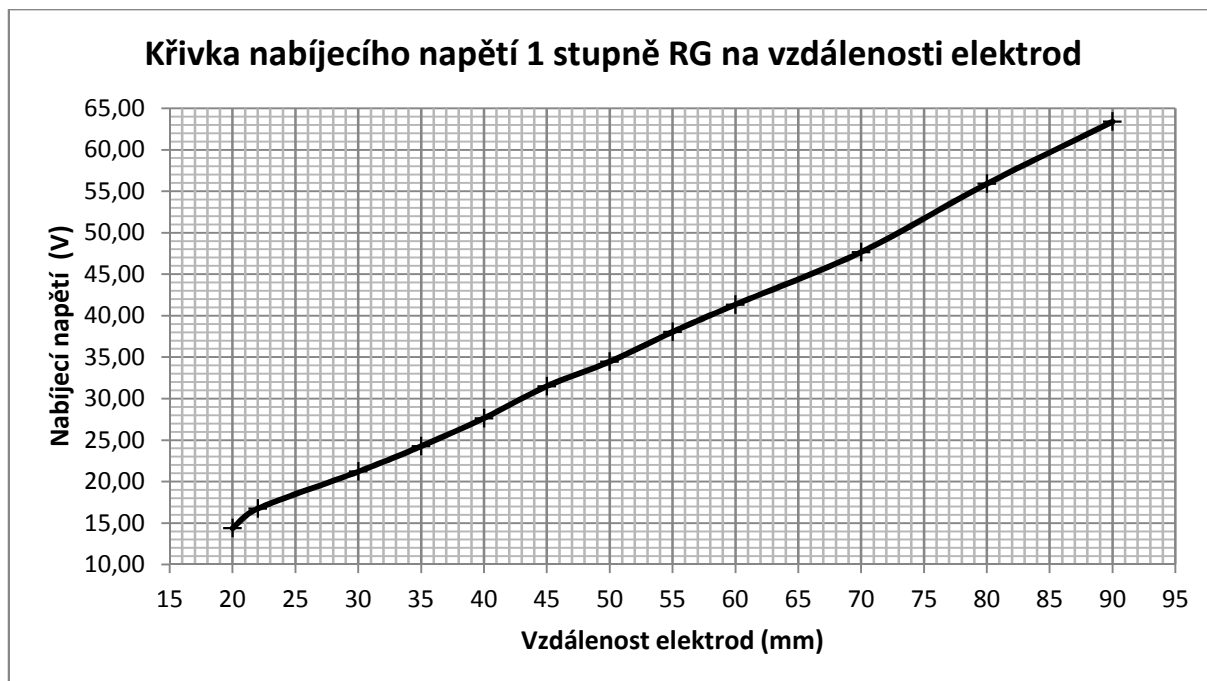
**Obrázek 43:** Závislost 50% přeskového napětí na vzdálenosti elektrod - porovnání naměřených a tabulkových hodnot

Maximální odchylka změřené a tabulkové hodnoty dosahuje 5,4% při doskoku 90 mm. Plná velikost křivky, je uvedena v příloze 7.7

## 4 Návrh, měření a zpracování grafů měřicí metody

**Křivka závislosti výstupního napětí vrcholového voltmetru na vzdálenosti elektrod:****Obrázek 44:** Křivka závislosti výstupního vrcholového napětí na vzdálenosti elektrod

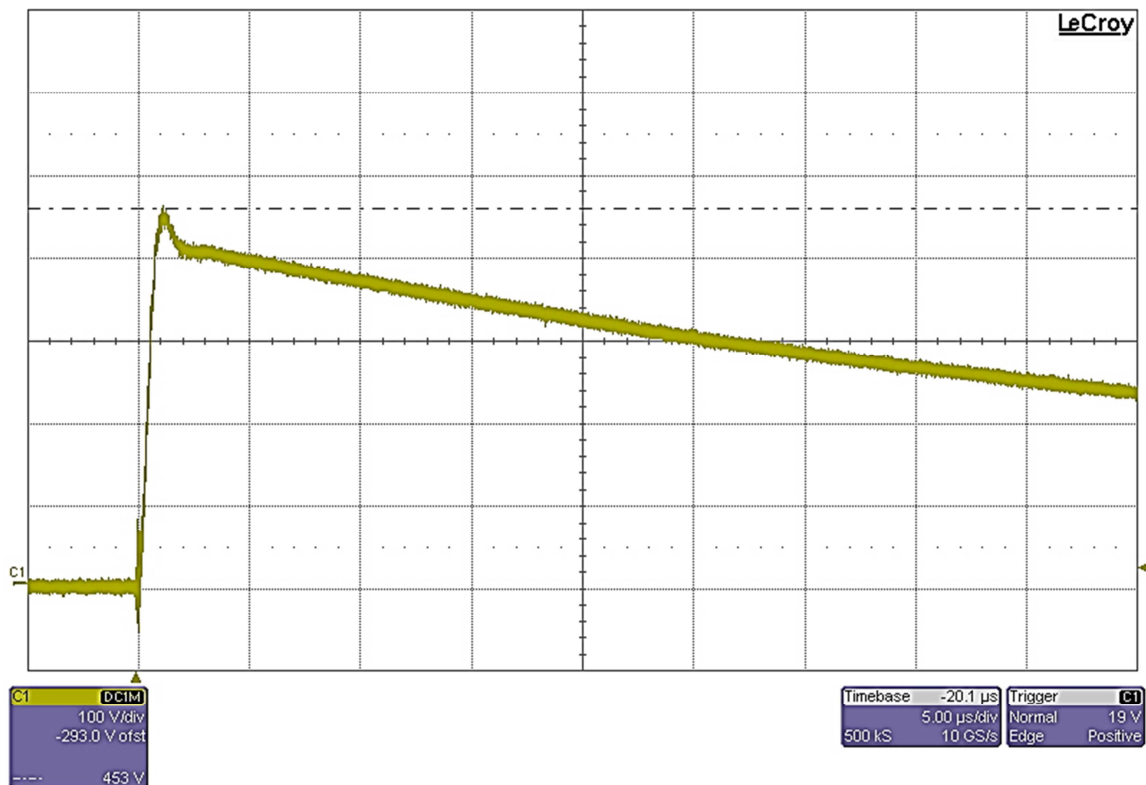
Plná velikost křivky, je uvedena v příloze 7.8

**Křivka závislosti nabíjecího napětí 1 stupně rázového generátoru na vzdálenosti elektrod:****Obrázek 45:** Křivka nabíjecího napětí 1 stupně RG na vzdálenosti elektrod

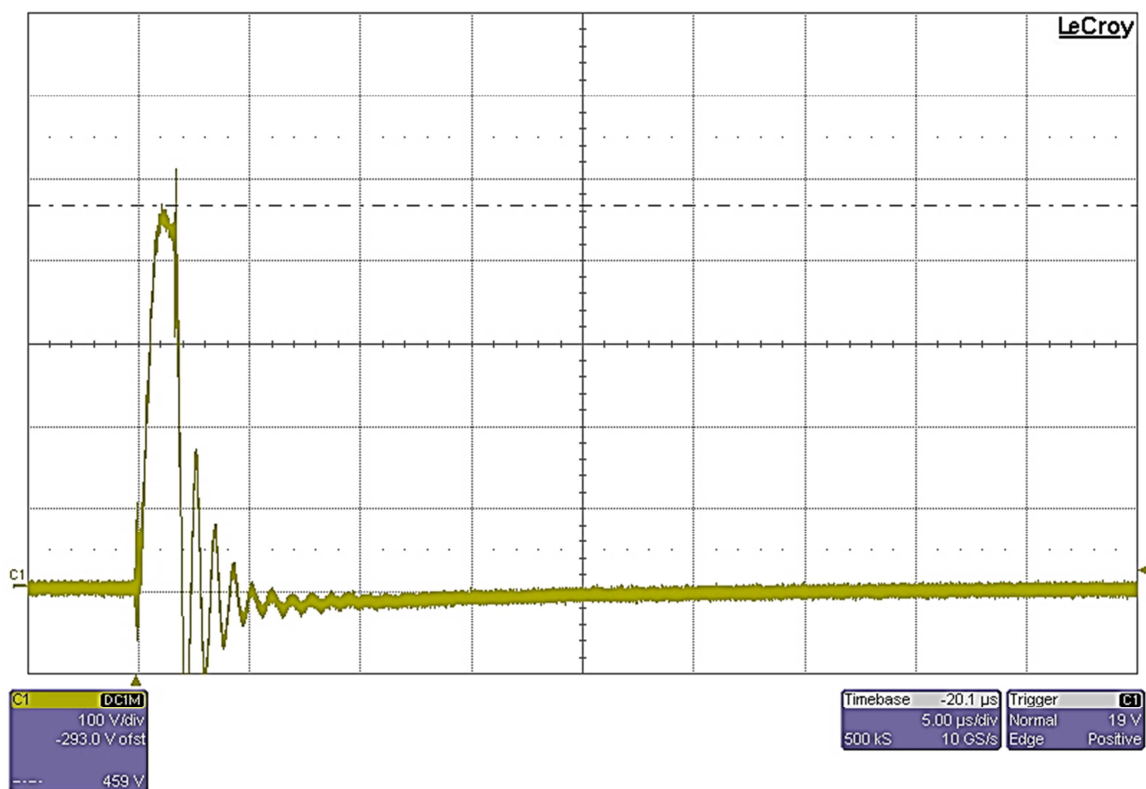
Plná velikost křivky, je uvedena v příloze 7.9

## 4 Návrh, měření a zpracování grafů měřicí metody

**Průběh kladné polarity napětí na osciloskopu pro plnou a kusou rázovou vlnu, při vzdálenosti elektrod 9 cm:**

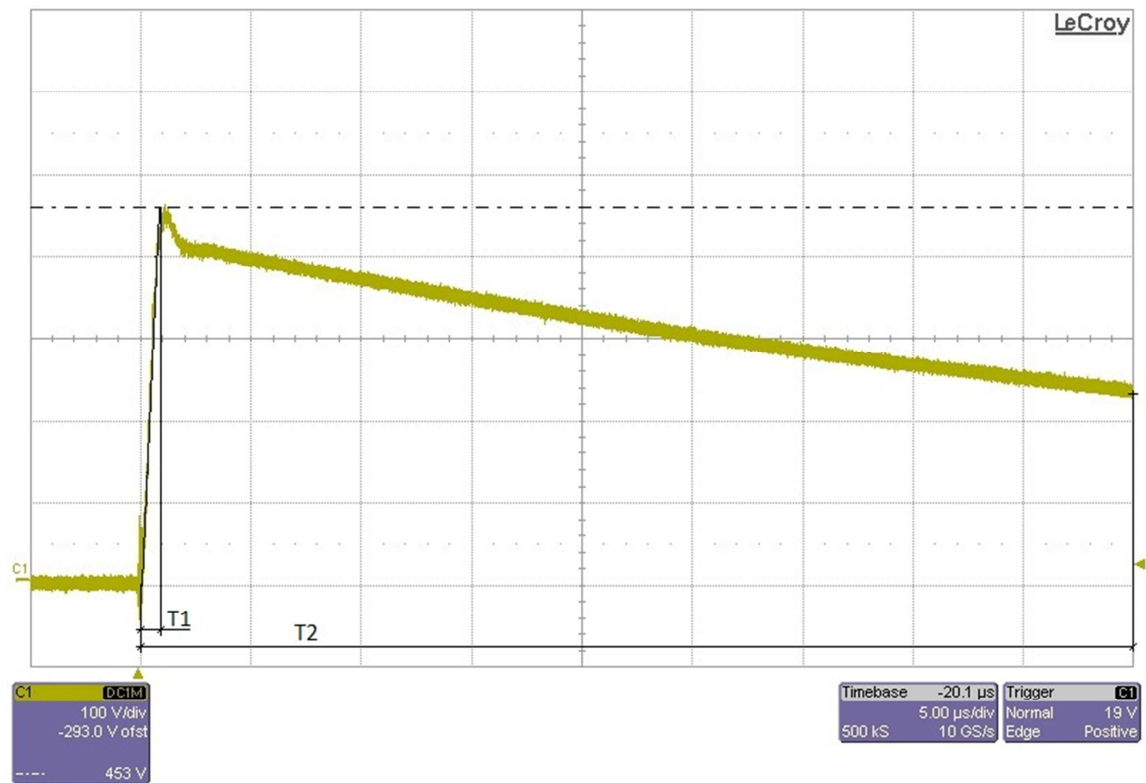


**Obrázek 46: Plná rázová vlna - přeskok na kulovém jiskřišti nenastal (  $U_{pv} = 240$  kV )**



**Obrázek 47: Kusá rázová vlna - vznikl přeskok na kulovém jiskřišti (  $U_{pv} = 243$  kV )**

## 4 Návrh, měření a zpracování grafů měřicí metody

**Parametry rázové vlny:****Obrázek 48: Parametry rázové vlny**

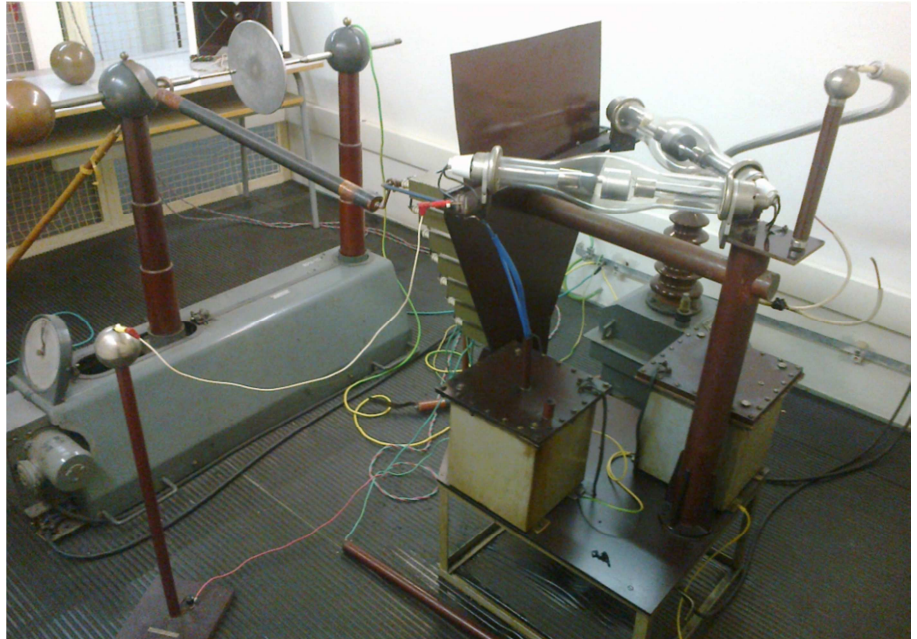
Normalizované hodnoty:      doba čela  $1,2 \mu\text{s} \pm 30\%$   
    doba půl-týlu  $50 \mu\text{s} \pm 20\%$

Parametry zkušební rázové vlny:      doba čela  $T1 = 0,95 \mu\text{s}$   
    doba půl-týlu  $T2 = 45 \mu\text{s}$

Doba čela zkušební rázové vlny odpovídá 79% době čela normalizovaného průběhu a doba půl-týlu odpovídá 90% doby půl-týlu normalizovaného průběhu. Parametry zkušební rázové vlny odpovídají přípustným tolerancím normalizovaného průběhu.

4 Návrh, měření a zpracování grafů měřicí metody

4.1.2 Kalibrace stejnosměrného zdroje



Fotografie na této straně jsou autorovy vlastní

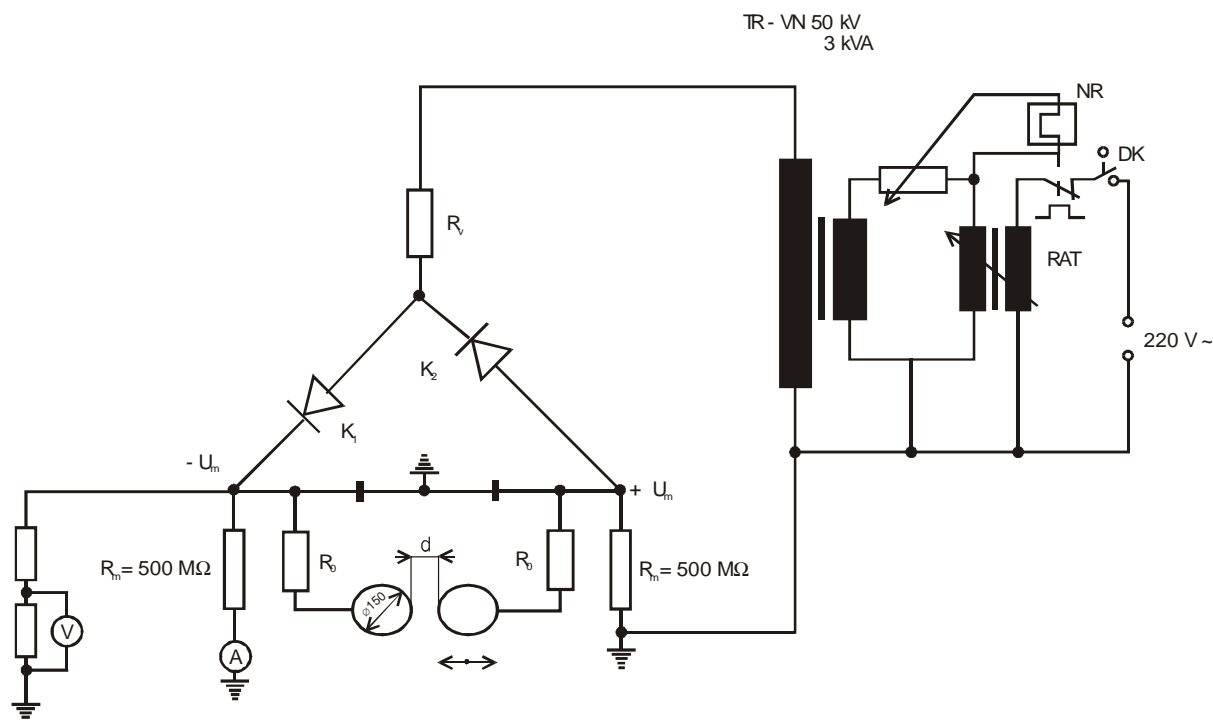
## 4 Návrh, měření a zpracování grafů měřicí metody

Zdrojem stejnosměrného napětí pro kalibraci nepřímé metody měření je kenotronový usměrňovač-zdvojovač, napájený z transformátoru TUR PEO 3/50 50 kV, 50 Hz, 3 kVA, 0,06 A. Vysokonapětový transformátor je napájen přes regulační autotransformátor RAT s ručním pohonem. Za kenotrony K1, K2 je výstupní stejnosměrné napětí  $\pm U_m$ , které je symetrické proti zemi. Zdvojené stejnosměrné napětí je vyhlazeno baterií kondenzátorů a přivedeno přes ochranný rezistor  $R_o$  na dvě kulové elektrody s průměrem 15 cm.

**Kalibrace je provedena pro dvě nepřímé měřicí metody:**

- 1) Mikro-ampérmetr s předřadníkem
- 2) Odporový dělič je složený z rezistorů TR 131, který byl již použit pro kalibraci rázového generátoru + digitální voltmetr.

Kalibrace je provedena pro kladnou i zápornou polaritu při teplotě 26,3 °C a atmosférickém tlaku 98,19 kPa. Korekční činitel  $k_H = 0,948$ .



**Obrázek 49:** Schéma zapojení laboratorního zdroje stejnosměrného vysokého napětí

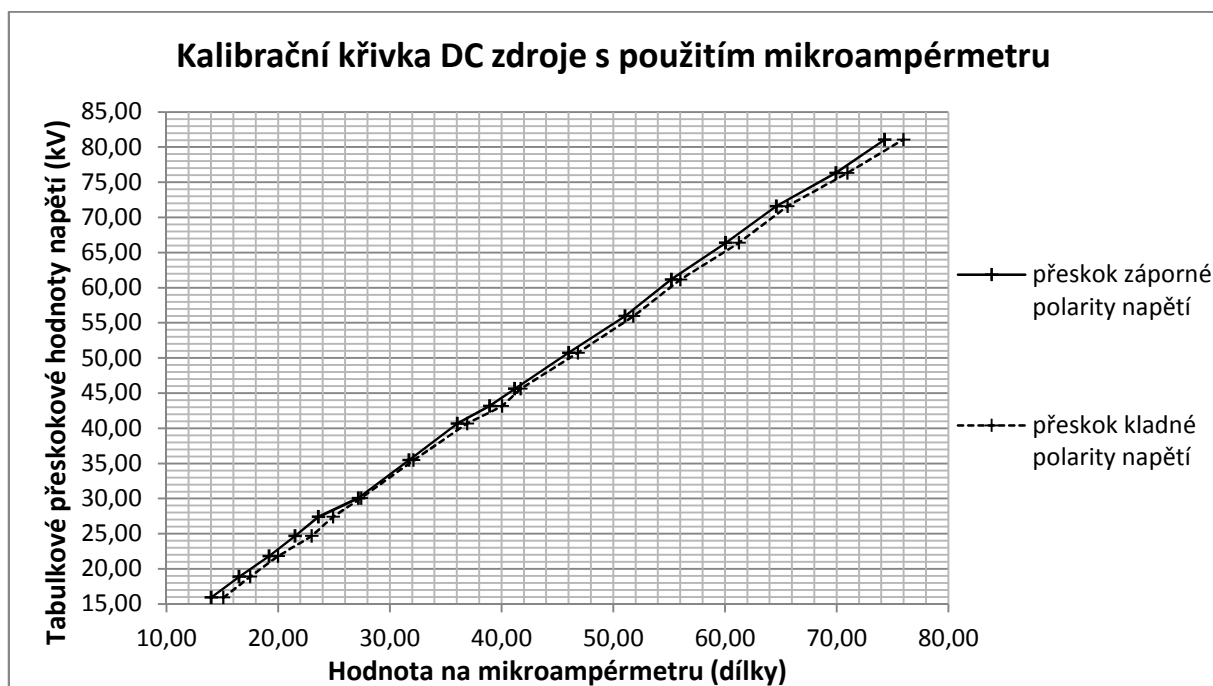


## 4 Návrh, měření a zpracování grafů měřicí metody

**Kalibrace pro mikro-ampérmetr s předřadným odporem**

Tabulka 6: Naměřené a vypočtené hodnoty pro mikro-ampérmetr s předřadným odporem

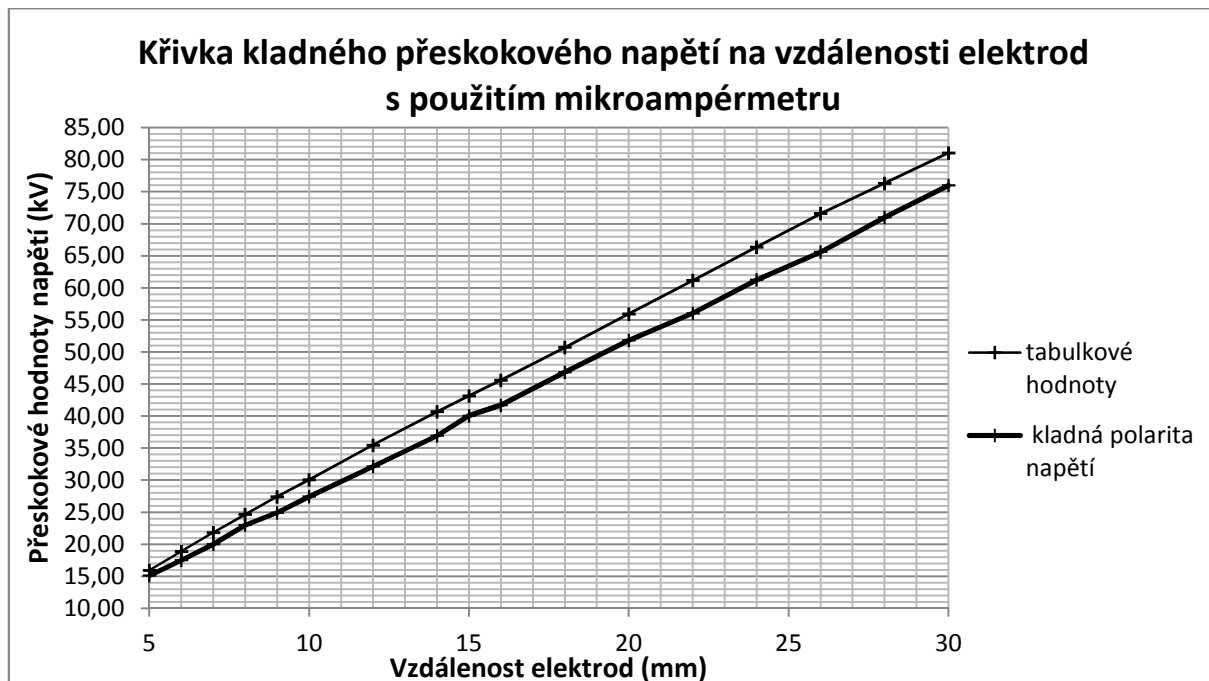
d (mm)	U tab (kV)	U kor (kV)	U - kladná polarita					$\overline{U}_+$	U - záporná polarita					$\overline{U}_-$
			(div)					(div)	(div)					(div)
5	16,8	15,93	15,5	15,0	15,0	15,0	15,0	15,10	14,0	14,0	14,0	14,0	14,0	14,00
6	19,9	18,87	17,5	17,5	17,5	17,5	17,5	17,50	16,5	16,5	16,5	16,5	16,5	16,50
7	23,0	21,81	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,00	19,5	19,5	19,0	19,0	19,0	19,20
8	26,0	24,65	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,00	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,50
9	28,9	27,40	25,0	24,9	24,9	24,9	24,9	24,92	24,0	23,5	23,5	24,0	23,0	23,60
10	31,7	30,06	27,5	27,5	27,3	27,4	27,5	27,44	27,4	27,0	27,5	27,0	27,0	27,18
12	37,4	35,46	32,2	32,2	32,2	32,0	32,0	32,12	31,5	32,0	31,5	32,0	31,5	31,70
14	42,9	40,67	37,0	36,9	36,9	36,9	36,9	36,92	36,0	36,0	36,0	36,2	36,0	36,04
15	45,5	43,14	40,0	40,0	40,1	40,1	40,0	40,04	39,0	39,0	39,0	38,8	38,8	38,92
16	48,1	45,60	41,5	42,0	41,5	41,5	42,0	41,70	41,5	41,0	41,0	41,2	41,2	41,18
18	53,5	50,72	46,8	47,0	46,8	46,8	46,8	46,84	46,0	46,0	46,1	46,0	45,9	46,00
20	59,0	55,94	52,0	52,0	51,5	52,0	51,5	51,80	51,0	51,0	51,0	51,0	51,2	51,04
22	64,5	61,15	56,0	56,0	56,1	56,0	56,0	56,02	55,5	55,5	55,0	55,0	55,0	55,20
24	70,0	66,37	61,0	61,5	61,2	61,5	61,0	61,24	60,0	60,0	60,1	60,2	60,0	60,06
26	75,5	71,58	65,5	65,5	65,5	65,5	66,0	65,60	64,5	64,5	65,0	64,5	64,5	64,60
28	80,5	76,32	71,0	71,0	71,0	71,1	70,8	70,98	70,0	70,0	69,9	69,9	69,9	69,94
30	85,5	81,06	76,0	76,0	76,0	75,9	76,0	75,98	74,5	74,5	74,0	74,0	74,5	74,30

**Kalibrační křivka stejnosměrného zdroje vysokého napětí s mikro-ampérmetrem a předřadným odporem**

Obrázek 50: Kalibrační křivka DC zdroje s mikro-ampérmetrem a předřadným odporem

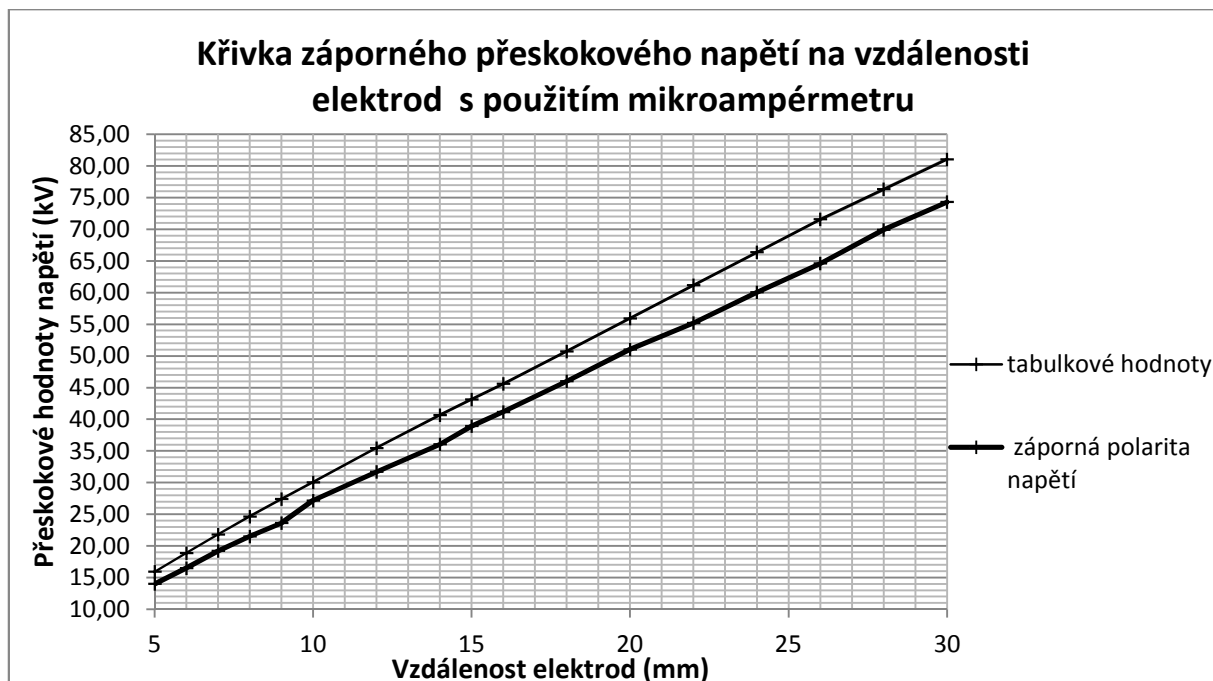
## 4 Návrh, měření a zpracování grafů měřicí metody

**Křivka stejnosměrného zdroje vysokého napětí s mikro-ampérmetrem pro kladnou polaritu napětí v závislosti na vzdálenosti elektrod.**



Obrázek 51: Křivka DC napětí zdroje s mikro-ampérmetrem pro kladnou polaritu napětí v závislosti na vzdálenosti elektrod

**Křivka stejnosměrného zdroje vysokého napětí s mikro-ampérmetrem pro zápornou polaritu napětí v závislosti na vzdálenosti elektrod.**



Obrázek 52: Křivka DC napětí zdroje s mikro-ampérmetrem pro zápornou polaritu napětí v závislosti na vzdálenosti elektrod

## 4 Návrh, měření a zpracování grafů měřicí metody

Maximální odchylka změřené a tabulkové hodnoty pro mikro-ampérmetr s předřadným odporem dosahuje 8,35% při doskoku 26 mm pro kladnou polaritu napětí a 8,34% při doskoku 30mm pro zápornou polaritu napětí.

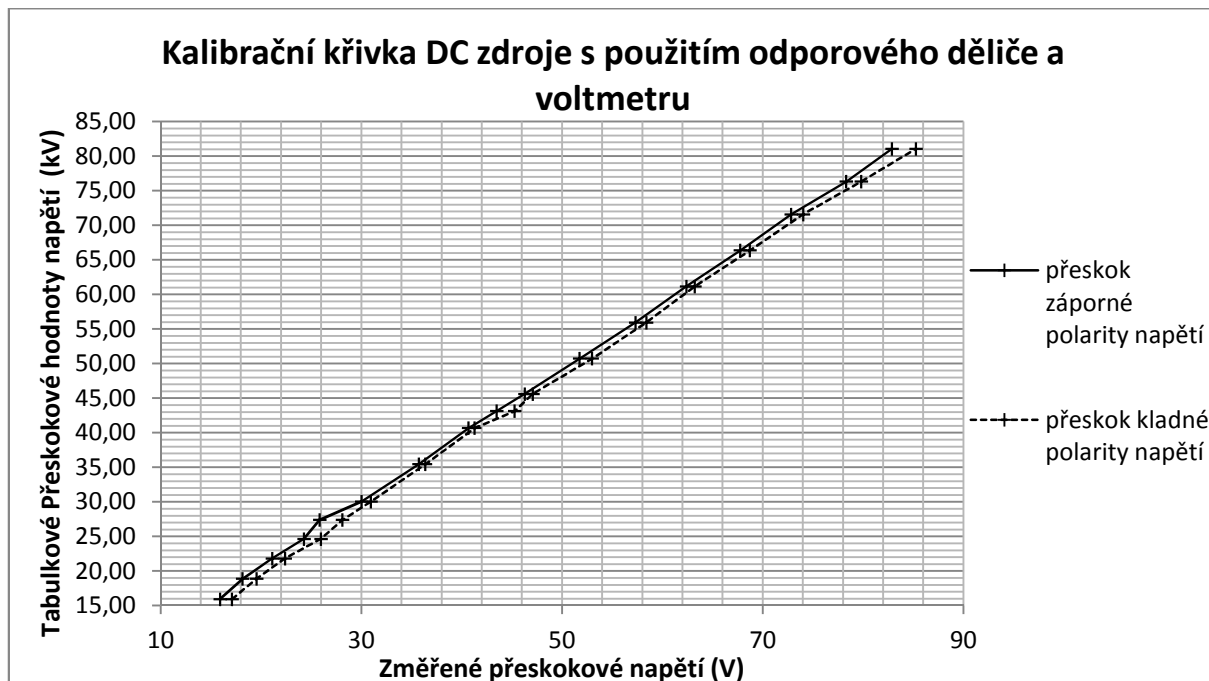
Křivky stejnosměrného vysokonapětového zdroje s mikroampérmetrem a předřadným odporem odpovídají lineárnímu průběhu. Mírné zvlnění může být způsobeno chybou odečtu hodnot z měřicích přístrojů. Při porovnání přeskoků z křivek kladné a záporné polarity, je vidět, že při záporné polaritě dochází k přeskoku při nižším napětí, což je patrně způsobeno odchylkou nastavování vzdálenosti elektrod při měření, nebo opotřebením stejnosměrného zdroje, jelikož hodnoty přeskoků pro obě polarity na kulové elektrodě v homogenním poli mají být stejné. Plná velikost křivek je uvedena v příloze 7.11, 7.12, a 7.13.

**Kalibrace pro odporový dělič**

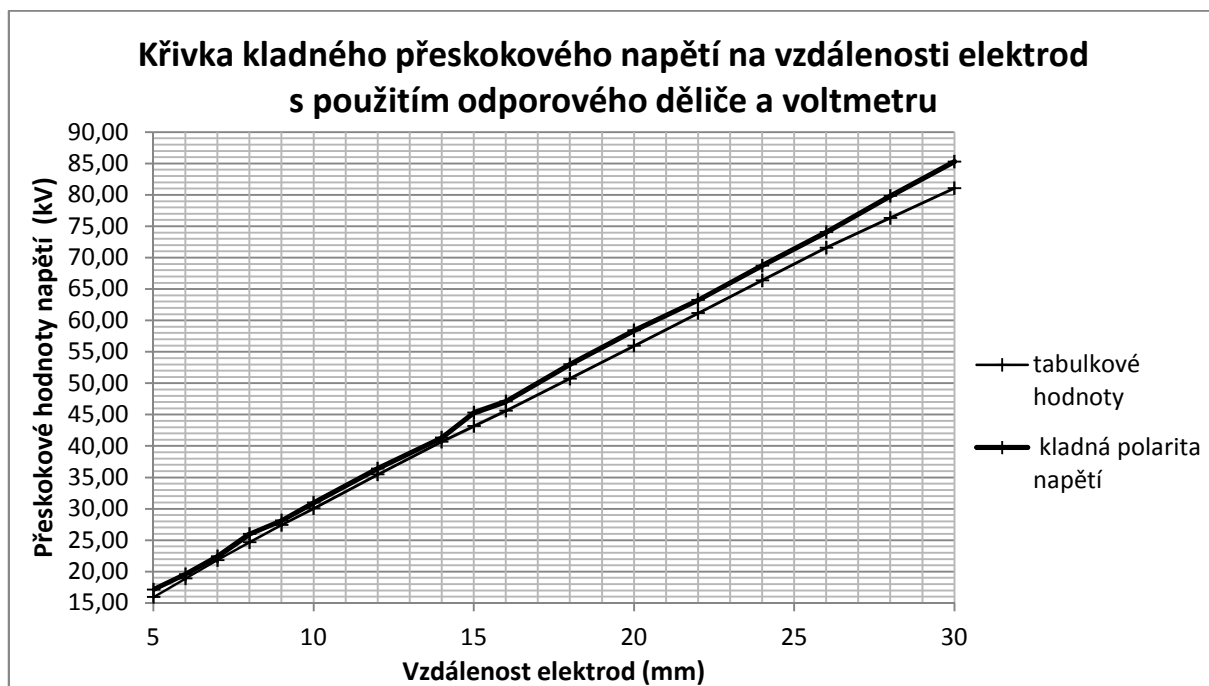
Tabulka 7: Naměření a vypočtené kalibrační hodnoty pro odporový dělič

d (mm)	U tab (kV)	U kor (kV)	U - kladná polarita (V)					$\bar{U}_+$ (V)	U - záporná polarita (V)					$\bar{U}_-$ (V)
5	16,8	15,93	8,5	8,5	8,6	8,6	8,6	8,56	7,9	7,9	7,9	8,1	8	7,96
6	19,9	18,87	9,8	9,7	9,8	9,8	9,8	9,78	9,3	9	9,1	9	9	9,08
7	23,0	21,81	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	10,6	10,6	10,7	10,4	10,5	10,56
8	26,0	24,65	12,9	13	13	13	13	12,98	12,1	12,1	12,15	12,15	12,2	12,14
9	28,9	27,40	14	14,1	14,1	14,1	14	14,06	12,9	12,9	12,9	12,8	13,1	12,92
10	31,7	30,06	15,4	15,5	15,5	15,5	15,5	15,48	15	15	15,1	15	15	15,02
12	37,4	35,46	18,1	18,2	18,2	18,2	18,25	18,19	18	17,8	17,8	17,9	17,8	17,86
14	42,9	40,67	20,6	20,6	20,7	20,7	20,65	20,65	20,4	20,4	20,3	20,2	20,4	20,34
15	45,5	43,14	22,7	22,7	22,6	22,5	22,7	22,64	21,9	21,5	21,9	21,8	21,6	21,74
16	48,1	45,60	23,5	23,5	23,6	23,6	23,5	23,54	23,2	23,1	23	23,3	23,1	23,14
18	53,5	50,72	26,4	26,5	26,5	26,5	26,6	26,5	25,9	25,8	25,9	25,9	25,9	25,88
20	59,0	55,94	29,3	29,3	29,2	29,1	29,1	29,2	28,7	28,5	28,8	28,6	28,7	28,66
22	64,5	61,15	31,5	31,7	31,6	31,6	31,7	31,62	30,9	31,2	31,3	31,3	31,3	31,2
24	70,0	66,37	34,2	34,4	34,4	34,4	34,4	34,36	33,9	33,9	33,8	33,9	33,9	33,88
26	75,5	71,58	37	37	37	37,1	37	37,02	36,4	36,4	36,5	36,4	36,4	36,42
28	80,5	76,32	39,8	39,8	39,9	40	40	39,9	39	39,1	39,3	39,2	39,2	39,16
30	85,5	81,06	42,5	42,6	42,7	42,7	42,7	42,64	41,4	41,5	41,4	41,3	41,6	41,44

## 4 Návrh, měření a zpracování grafů měřicí metody

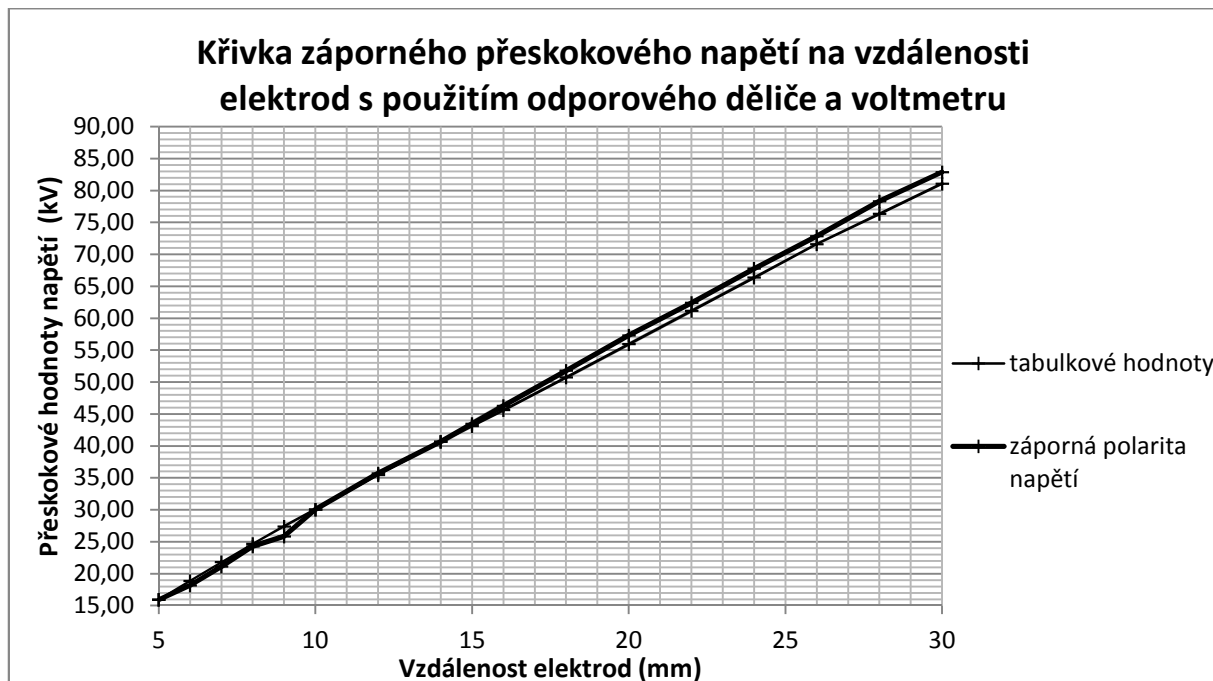
**Kalibrační křivka stejnosměrného zdroje vysokého napětí s odporovým děličem a voltmetrem.**

Obrázek 53: Kalibrační křivka DC zdroje s odporovým děličem a voltmetrem

**Křivka stejnosměrného zdroje vysokého napětí s odporovým děličem a voltmetrem pro kladnou polaritu napětí v závislosti na vzdálenosti elektrod.**

Obrázek 54: Křivka DC napětí zdroje s odporovým děličem a voltmetrem pro kladnou polaritu napětí v závislosti na vzdálenosti elektrod

## 4 Návrh, měření a zpracování grafů měřicí metody

**Křivka stejnosměrného zdroje vysokého napětí s odporovým děličem a voltmetrem pro zápornou polaritu napětí v závislosti na vzdálenosti elektrod.**

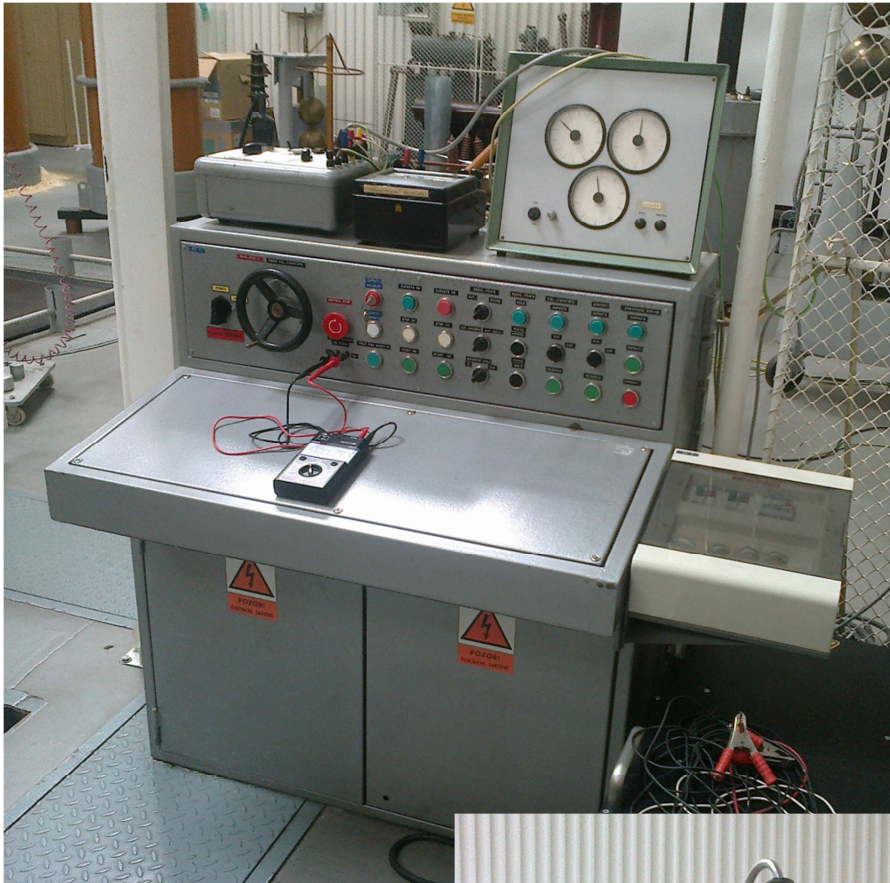
**Obrázek 55:** Křivka DC napětí zdroje s odporovým děličem a voltmetrem pro zápornou polaritu napětí v závislosti na vzdálenosti elektrod

Maximální odchylka změřené a tabulkové hodnoty pro odporový dělič dosahuje 5,2% při doskoku 30 mm pro kladnou polaritu napětí a 2,62% při doskoku 28mm pro zápornou polaritu napětí.

Křivky stejnosměrného vysokonapěťového zdroje s odporovým děličem a voltmetrem odpovídají lineárnímu průběhu. Mírné zvlnění, které je patrnější než u mikro-ampérmetru s předředníkem, může být způsobeno nepřesností odečtu hodnot z digitálního voltmetru. Porovnáním kladné a záporné polarity je opět vidět, že při záporné polaritě dochází k přeskoku při nižším napětí. Plná velikost křivek je uvedena v příloze 7.14, 7.15, a 7.16.

4 Návrh, měření a zpracování grafů měřicí metody

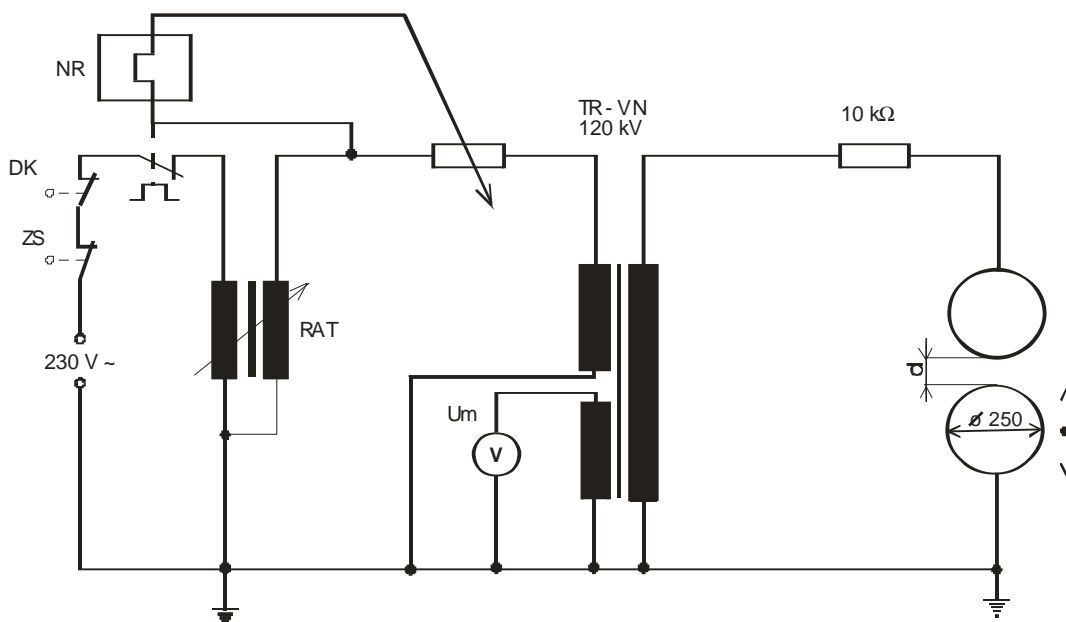
4.1.3 Kalibrace střídavého zdroje



Fotografie na této straně jsou autorovy vlastní

## 4 Návrh, měření a zpracování grafů měřicí metody

Zdrojem vysokého napětí je zkušební transformátor ČKD 120 kV, 10 kVA s měřicím vinutím, napájený z regulačního autotransformátoru RAT. Zdroj jistí nadproudové relé. Výstupní napětí je přes ochranný rezistor přivedeno na kulové jiskřiště o průměru 25 cm a přes měřicí vinutí transformátoru je připojen voltmetr. Korekční činitel  $k_H = 0,962$ .



Obrázek 56: Schéma zapojení laboratorního zdroje střídavého vysokého napětí

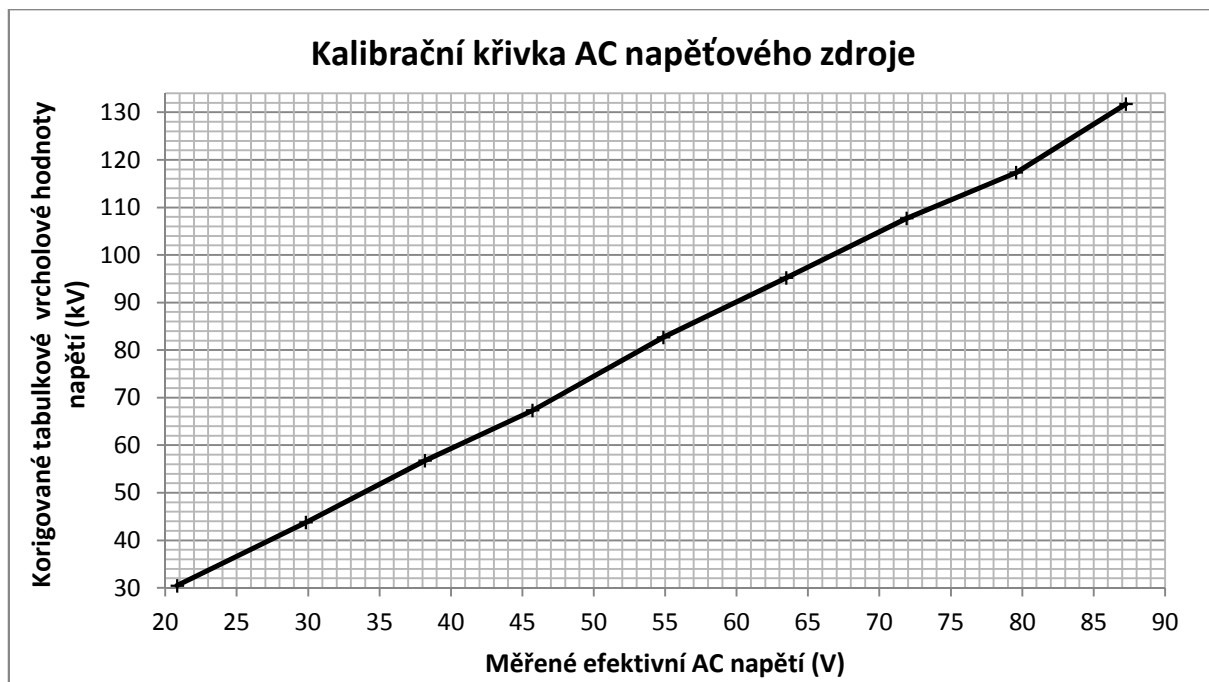
## Kalibrace AC zdroje s připojeným voltmetrem přes měřicí vinutí transformátoru

Tabulka 8: Naměření a vypočtené kalibrační hodnoty pro AC zdroj s připojeným voltmetrem přes měřicí vinutí transformátoru

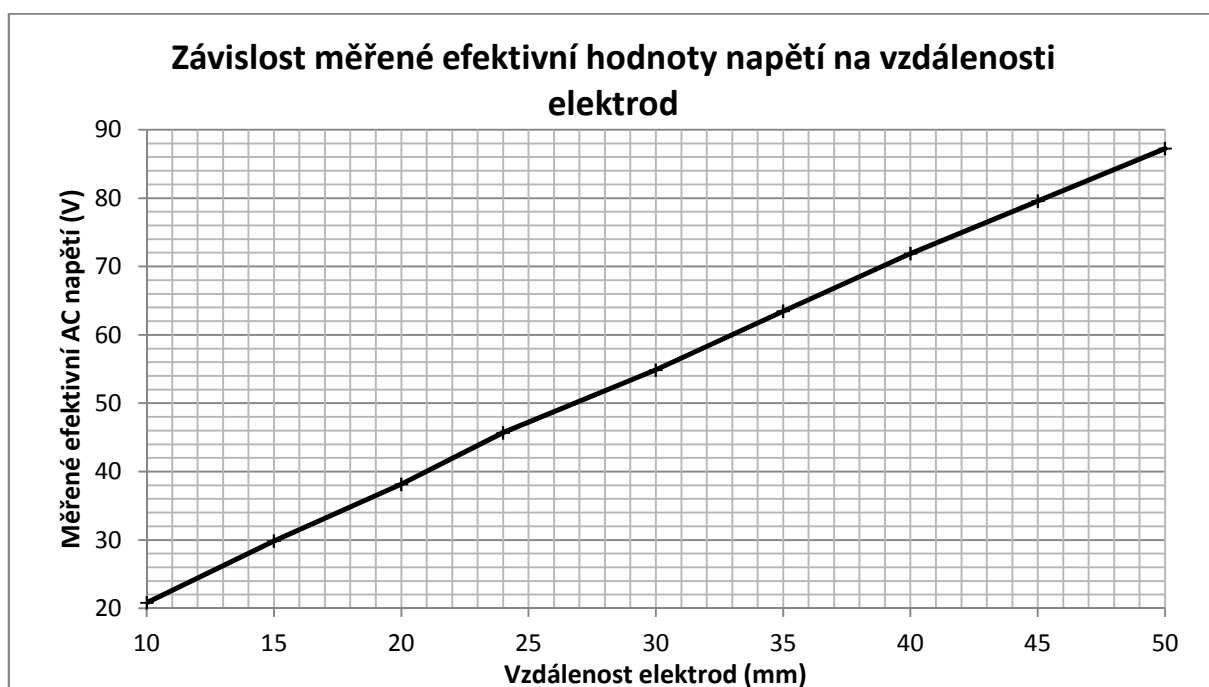
d (cm)	Um tab (kV)	Um kor. (kV)	U - kladná polarita (kV)										$\bar{U}$ (kV)
			20,90	20,89	20,85	20,77	20,80	20,76	20,60	20,94	20,85	20,90	
1,0	31,7	30,48	20,90	20,89	20,85	20,77	20,80	20,76	20,60	20,94	20,85	20,90	20,83
1,5	45,5	43,75	29,74	29,79	29,83	29,85	29,95	29,90	30,02	29,85	29,87	29,72	29,85
2,0	59,0	56,73	38,20	38,30	38,70	38,30	37,40	38,30	37,40	37,90	38,80	38,40	38,17
2,4	70,0	67,31	45,80	45,10	44,60	44,60	44,60	44,40	54,00	45,30	44,40	44,30	45,71
3,0	86,0	82,70	55,40	53,90	53,70	55,50	55,40	55,40	54,40	54,70	55,40	55,00	54,88
3,5	99,0	95,20	63,60	62,80	61,40	63,50	64,30	63,50	64,40	63,80	63,70	63,70	63,47
4,0	112,0	107,70	72,20	71,70	72,40	72,10	71,70	71,60	72,20	71,60	71,80	71,70	71,90
4,5	122,0	117,31	80,70	82,00	79,10	79,90	79,90	78,10	78,10	79,60	79,30	79,10	79,58
5,0	137,0	131,74	87,70	87,10	87,00	87,00	87,10	87,70	87,00	87,20	87,50	87,20	87,25

Naměřené hodnoty a vynesené grafy jsou zpracovány v jednotkách, které zobrazují použité měřicí přístroje, které jsou ke skutečné hodnotě napětí v poměru 1:1000. Přeskokové napětí je dopočteno ze změřeného efektivního střídavého napětí vynásobením  $\sqrt{2}$

## 4 Návrh, měření a zpracování grafů měřicí metody

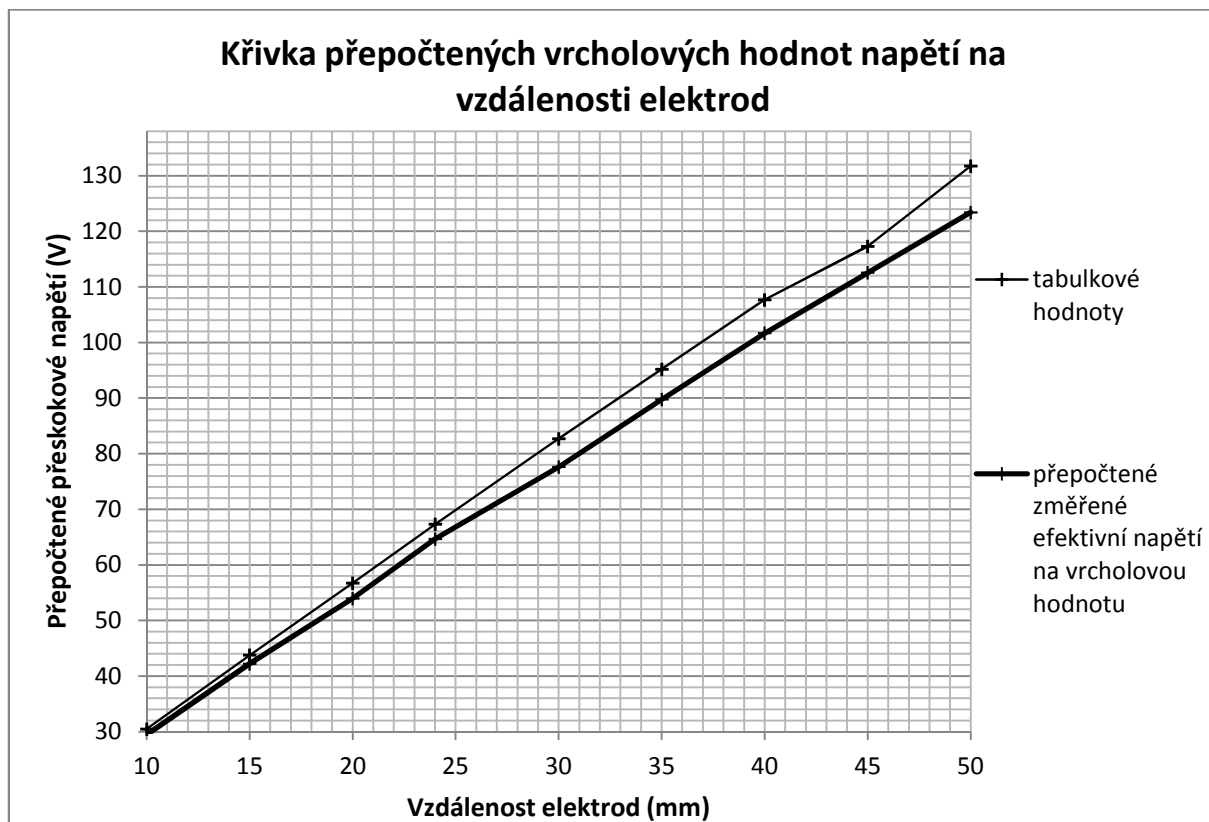
**Kalibrační křivka střídavého vysokého napětí s připojeným voltmetrem, přes měřicí transformátor.**

Obrázek 57: Kalibrační křivka střídavého zdroje vysokého napětí

**Křivka efektivních hodnot AC napětí v závislosti na vzdálenosti elektrod.**

Obrázek 58: Křivka efektivních hodnot AC napětí zdroje v závislosti na vzdálenosti elektrod



**Křivka přepočtených vrcholových hodnot AC napětí v závislosti na vzdálenosti elektrod****Obrázek 59: Křivka přepočtených vrcholových hodnot AC napětí v závislosti na vzdálenosti elektrod**

Maximální odchylka změřené a tabulkové hodnoty dosahuje 6,34% při doskoku 50 mm.

Kalibrační křivka a křivky efektivního a přeskokového napětí v závislosti na vzdálenosti elektrod u střídavého vysokonapěťového zdroje ČKD mají lineární průběh s mírným zvlněním patrně způsobeným nepřesností nastavení vzdálenosti mezi elektrodami. Plná velikost křivek střídavého zdroje napětí je uvedena v příloze 7.17, 7.18, a 7.19.

## 4.2 atmosférické korekční faktory

Přeskokové napětí je závislé na atmosférických podmínkách prostředí, ve kterém se zkouška provádí. Při měření přímou metodou pomocí kulového jiskřiště je potřeba provést korekci přeskokových napětí. Tím lze dosáhnout reprodukovatelnosti výsledků a možnost jejich porovnávání. Přeskokové napětí je závislé na tlaku, teplotě, vlhkosti vzduchu, polaritě a druhu zkušebního napětí a na tvaru a vzdálenosti elektrod.

Pomocí korekčních faktorů je možno přeskokové napětí, které bylo naměřeno během zkoušky při jiných podmínkách, než jsou podmínky referenční, přepočítat na hodnotu, která odpovídá těmto referenčním podmínkám. Tento postup je možno aplikovat i obráceně a hodnotu napětí při referenčních podmínkách lze přepočítat na ekvivalentní hodnotu pro jiné atmosférické podmínky. [4]

### Standartní referenční podmínky jsou:

teplota  $t_0 = 20^\circ\text{C}$

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

absolutní vlhkost  $h_0 = 8,5 \text{ g/m}^3$

Atmosférický korekční faktor  $K$  je dán součinem korekčních faktorů  $\delta$ ,  $k$

$$K = \delta \times k$$

$\delta$  = korekce na hustotu vzduchu (tlak a teplota)

$k$  = korekce na vlhkost vzduchu

Přepočet naměřeného přeskokového napětí na referenční hodnotu je pak dán vztahem:

$$U_0 = U / K$$

Korekční činitel na hustotu vzduchu  $\delta$  je dán vztahem  $\delta = \frac{p}{p_0} \times \frac{273+t_0}{273+t}$

Atmosférické tlaky  $p$ ,  $p_0$  jsou uváděny ve stejných jednotkách (kPa) a teploty  $t$ ,  $t_0$  jsou ve stupních Celsia.

Korekční činitel na vlhkost je dán vztahem  $k = 1 + (0,002 \times (h/\delta - 8,5))$

Při okolní absolutní vlhkosti  $h$  v  $\text{g/m}^3$  [5]

Určování vlhkosti se provádí měřicím zařízením, které přímo měří absolutní vlhkost s chybou do  $1 \text{ g/m}^3$ . Měření relativní vlhkosti, které je spojené s měřením teploty, lze použít za předpokladu, že přesnost určení absolutní vlhkosti bude také do  $1 \text{ g/m}^3$ . [4]

## 5 Závěr

Cílem této diplomové práce je poskytnout odborné informace o vysokonapětových měřicích systémech určených pro experimentální výzkum a laboratorní zkoušky elektrických strojů, přístrojů a zařízení v oblasti vysokého napětí. Během provozu je každé zařízení vystaveno možnosti elektrického namáhání, zejména přepětím. Ať už jde o dlouhodobé zvýšení jmenovité hodnoty napětí v síti, byť jen o pár procent, nebo vysoké hodnoty přepětí od atmosférických vlivů, či spínacích pochodů v elektrizační soustavě, je potřeba, aby připojená zařízení byla schopna těmto stavům odolat. Proto právě tyto vysokonapětové zkoušky mají velký význam, při zkoušení elektrických zařízení a strojů.

Základem práce je vypracování informací o zdrojích vysokého napětí. Primární dělení typů vysokonapětových zdrojů je na zdroje střídavé, stejnosměrné a rázové. Každá z těchto kapitol je větvěna na jednotlivé zástupce vysokonapětových zdrojů, jejich vlastnosti, kladené požadavky a způsoby regulace.

Dále jsou zde uvedeny způsoby měření vysokého napětí. Jsou zde popsány jednotlivé druhy přímých a nepřímých měřicích metod a jejich použití.

Praktická část diplomové práce se skládá z vypracování kalibračních měření vysokonapětových zdrojů ve vysokonapětové laboratoři elektrotechnické fakulty, pro vhodnou měřicí metodu, ověření lineárního chování vysokonapětového zdroje při různých napětíových úrovních a vyhodnocení experimentálně získaných výsledků z provedeného měření.

Hlavní zaměření praktické části je směřováno ke kalibraci rázového generátoru, ověření jeho chování a vypracování kalibračních křivek pro účely probíhajícího výzkumu zaměřeného na problematiku chování hybridních izolací. Z důvodu poškození odporového děliče u rázového generátoru bylo potřeba navrhnout a sestavit nový odporový dělič. Ten byl sestaven z řetězce deseti  $2M\Omega$  odporů TR131 s maximální výkonovou ztrátou 2W pro každý článek. Maximální přivedené napětí na dělič je výpočtem stanoveno na 63,2 kV. Rázový generátor byl přestaven z původního nastavení pro 600 kV pro provoz při maximálním napětí 300 kV, které postačuje pro požadované hodnoty napětí a oproti původnímu zapojení umožňuje vyšší citlivost regulace napětí. Měření je provedeno v rozsahu požadovaném pro účely experimentálního testování chování hybridních izolací.

## 5 Závěr

Kalibrační měření bylo také provedeno pro stejnosměrný vysokonapěťový zdroj TUR PEO 3/50 50 kV, 50 Hz, 3 kVA, 0,06 A a dále pro střídavý vysokonapěťový zdroj ČKD 120 kV, 10 kVA. Získané hodnoty z měření jsou zpracovány do grafů a tabulek a pro lepší odečítání z grafů jsou v příloze uvedeny duplikované grafy a zvětšené na celou stránku. I přes mnohdy obtížné nastavování vzdálenosti mezi kulovými elektrodami u vysokonapěťových zdrojů, lze kalibrační měření považovat za úspěšné a výsledné kalibrační křivky odpovídají předpokládanému lineárnímu průběhu.

Práce na tomto tématu mě zaujala a vzhledem k důležitosti vysokonapěťových zkoušek věřím, že přináší v této oblasti ucelený pohled a může posloužit i jako další podkladný materiál k této problematice.

## 6 Použitá literatura

- [1] Stupka, L.; Zdroje pro zkoušky vysokým napětím. Plzeň, 2011. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky
- [2] Veverka, A. Technika vysokých napětí. 2. vyd. Praha : SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1978. 296 s. L26-C3-111-41f/58397
- [3] Kuffel, E.; Zaengl, W. S.; Kuffel, J. High Voltage Engineering: Fundamentals. 2. vyd. Butterworth-Heinemann, 2000. 534 s. ISBN 0-7506-3634-3
- [4] Blažek, V.; Skala, P. Vysoké napětí a elektrické přístroje. Část I : Vysoké napětí. Brno : VUT v Brně, FEKT, 2003. s. 1-74.
- [5] ČSN EN 60052. Měření napětí pomocí normalizovaných vzduchových jiskřišť. Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [6] Lysenko, V. VN zdroje. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2008. 248 s. ISBN 978-80-7300-235-0
- [7] Lucas, J.R.; High Voltage Engineering. University of Moratuwa, Sri Lanka, Department of Electrical Engineering, 2001. Dostupný z [www: http://www.elect.mrt.ac.lk/pdf\\_notes.htm](http://www.elect.mrt.ac.lk/pdf_notes.htm), 29.12.2012
- [8] Bejček, L.; Čejka, M.; Rez, J.; Gescheidtová, E.; Steibauer, M. Měření v elektrotechnice. Dostupný z [www: http://www.unium.cz/materialy/vut/fekt/mereni-v-elektrotechnice-m10315-p1.html](http://www.unium.cz/materialy/vut/fekt/mereni-v-elektrotechnice-m10315-p1.html), 29.12.2012
- [9] Ryan, Hugh M. High Voltage Engineering and Testing. 2. vyd. Institution of Engineering and Technology, 2001. 759 s. ISBN 0-85296-775-6
- [10] Naidu, M.S.; Kamaraju, V. High Voltage Engineering. 2. vyd. McGraw-Hill, 1996. 378 s. ISBN 0-07-462286-2
- [11] Manuál k vrcholovému voltmetru Haefely typ 64.; 508092/D; vyd. 8.4.1975; k dispozici ve vysokonapěťové laboratoři FEL

## 7 Přílohy

**7 Přílohy****7.1 Tabulka 1 - Vrcholové hodnoty přeskových napětí**

Vrcholové hodnoty přeskových napětí (hodnoty U<sub>50</sub> při zkouškách impulzy) v kV pro střídavá napětí síťového kmitočtu, napětí při plném atmosférickém a spínacím impulzu záporné polaritě a stejnosměrná napětí obou polarit. [5]

Doskok kulového jiskřiště (cm)	Průměr kulových elektrod cm											
	2	5	6.25	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200
0.05	2.8											
0.10	4.7											
0.15	6.4											
0.20	8.0	8.0										
0.25	9.6	9.6										
0.30	11.2	11.2										
0.40	14.4	14.3	14.2									
0.50	17.4	17.4	17.2	16.8	16.8	16.8						
0.60	20.4	20.4	20.2	19.9	19.9	19.9						
0.70	23.2	23.4	23.2	23.0	23.0	23.0						
0.80	25.8	26.3	26.2	26.0	26.0	26.0						
0.90	28.3	29.2	29.1	28.9	28.9	28.9						
1.00	30.7	32.0	31.9	31.7	31.7	31.7	31.7					
1.20	35.1	37.6	37.5	37.4	37.4	37.4	37.4					
1.40	38.5	42.9	42.9	42.9	42.9	42.9	42.9					
1.50	40.0	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5	45.5					
1.60		48.1	48.1	48.1	48.1	48.1	48.1					
1.80		53.0	53.5	53.5	53.5	53.5	53.5					
2.00		57.5	58.5	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0			
2.20		61.5	63.0	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5			
2.40		65.5	67.5	69.5	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0			
2.60		69.0	72.0	74.5	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0			
2.80		72.5	76.0	79.5	80.0	80.5	81.0	81.0	81.0			
3.00		75.5	79.5	84.0	85.0	85.5	86.0	86.0	86.0	86.0		
3.50		82.5	87.5	95.0	97.0	98.0	99.0	99.0	99.0	99.0		
4.00		88.5	95.0	105.0	108.0	110.0	112.0	112.0	112.0	112.0		
4.50			101.0	115.0	119.0	122.0	125.0	125.0	125.0	125.0		
5.00			107.0	123.0	129.0	133.0	137.0	138.0	138.0	138.0	138.0	
5.50				131.0	138.0	143.0	149.0	151.0	151.0	151.0	151.0	
6.00				138.0	146.0	152.0	161.0	164.0	164.0	164.0	164.0	

## 7 Přílohy

Doskok kulového jiskřiště (cm)	Průměr kulových elektrod											
	cm											
	2	5	6.25	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200
6.50				144.0	154.0	161.0	173.0	177.0	177.0	177.0	177.0	
7.00				150.0	161.0	169.0	184.0	189.0	190.0	190.0	190.0	
7.50				155.0	168.0	177.0	195.0	202.0	203.0	203.0	203.0	
8.00					174.0	185.0	206.0	214.0	215.0	215.0	215.0	
9.00					185.0	198.0	226.0	239.0	240.0	241.0	241.0	
10.00					195.0	209.0	244.0	263.0	265.0	266.0	266.0	266.0
11.00						219.0	261.0	286.0	290.0	292.0	292.0	292.0
12.00						229.0	275.0	309.0	315.0	318.0	318.0	318.0
13.00							289.0	331.0	339.0	342.0	342.0	342.0
14.00							302.0	353.0	363.0	366.0	366.0	366.0
15.00							314.0	373.0	387.0	390.0	390.0	390.0
16.00							326.0	392.0	410.0	414.0	414.0	414.0
17.00							337.0	411.0	432.0	438.0	438.0	438.0
18.00							347.0	429.0	343.0	462.0	462.0	462.0
19.00							357.0	445.0	473.0	486.0	486.0	486.0
20.00							366.0	460.0	492.0	510.0	510.0	510.0
22.00								489.0	530.0	555.0	560.0	560.0
24.00								515.0	565.0	595.0	610.0	610.0
26.00								540.0	600.0	635.0	655.0	660.0
28.00								565.0	635.0	675.0	700.0	705.0
30.00								585.0	665.0	710.0	745.0	750.0
32.00								605.0	695.0	745.0	790.0	795.0
34.00								625.0	725.0	780.0	835.0	840.0
36.00								640.0	750.0	815.0	875.0	885.0
38.00								655.0	775.0	845.0	915.0	930.0
40.00								670.0	800.0	875.0	955.0	975.0
45.00									850.0	945.0	1050.0	1080.0
50.00									895.0	1010.0	1130.0	1180.0
55.00									935.0	1060.0	1210.0	1260.0
60.00									970.0	1110.0	1280.0	1340.0

## 7 Přílohy

Doskok kulového jiskřiště (cm)	Průměr kulových elektrod cm											
	2	5	6.25	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200
65.00										1160.0	1340.0	1410.0
70.00										1200.0	1390.0	1480.0
75.00										1230.0	1440.0	1540.0
80.00											1490.0	1600.0
85.00											1540.0	1660.0
90.00											1580.0	1720.0
100.00											1660.0	1840.0
110.00											1730.0	1940.0
120.00											1800.0	2020.0
130.00												2100.0
140.00												2180.0
150.00												2250.0
<p>* Hodnoty neplatí pro impulzní napětí pod 10 kV.  Podbarvené hodnoty, které jsou uvedeny pro doskoky větší než 0.5 D, mají nejistotu  * větší.</p>												



## 7 Přílohy

**7.2 Tabulka 2 - Vrcholové hodnoty přeskových napětí**

Vrcholové hodnoty přeskových napětí (hodnoty U<sub>50</sub> při zkouškách impulzy) v kV pro napětí při plném atmosférickém a spínacím impulzu kladné polaroty. [5]

Doskok kulového jiskřiště (cm)	Průměr kulových elektrod cm											
	2	5	6.25	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200
0.05												
0.10												
0.15												
0.20												
0.25												
0.30	11.2	11.2										
0.40	14.4	14.3	14.2									
0.50	17.4	17.4	17.2	16.8	16.8	16.8						
0.60	20.4	20.4	20.2	19.9	19.9	19.9						
0.70	23.2	23.4	23.2	23.0	23.0	23.0						
0.80	25.8	26.3	26.2	26.0	26.0	26.0						
0.90	28.3	29.2	29.1	28.9	28.9	28.9						
1.00	30.7	32.0	31.9	31.7	31.7	31.7	31.7					
1.20	35.1	37.8	37.6	37.4	37.4	37.4	37.4					
1.40	38.5	43.3	43.2	42.9	42.9	42.9	42.9					
1.50	40.0	46.2	45.9	45.5	45.5	45.5	45.5					
1.60		49.0	48.6	48.1	48.1	48.1	48.1					
1.80		54.5	54.0	53.5	53.5	53.5	53.5					
2.00		59.5	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0	59.0			
2.20		64.0	64.0	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5	64.5			
2.40		69.0	69.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0			
2.60		73.0	73.5	75.5	75.0	75.0	75.0	75.0	75.0			
2.80		77.0	78.0	80.5	80.5	80.5	81.0	81.0	81.0			
3.00		81.0	82.05	85.5	85.5	85.5	86.0	86.0	86.0	86.0		
3.50		90.0	91.5	97.5	98.0	98.5	99.0	99.0	99.0	99.0		
4.00		97.5	101.0	109.0	110.0	111.0	112.0	112.0	112.0	112.0		
4.50			108.0	120.0	122.0	124.0	125.0	125.0	125.0	125.0		
5.00			115.0	130.0	134.0	136.0	138.0	138.0	138.0	138.0	138.0	
5.50				139.0	145.0	147.0	151.0	151.0	151.0	151.0	151.0	
6.00				148.0	155.0	158.0	163.0	164.0	164.0	164.0	164.0	

## 7 Přílohy

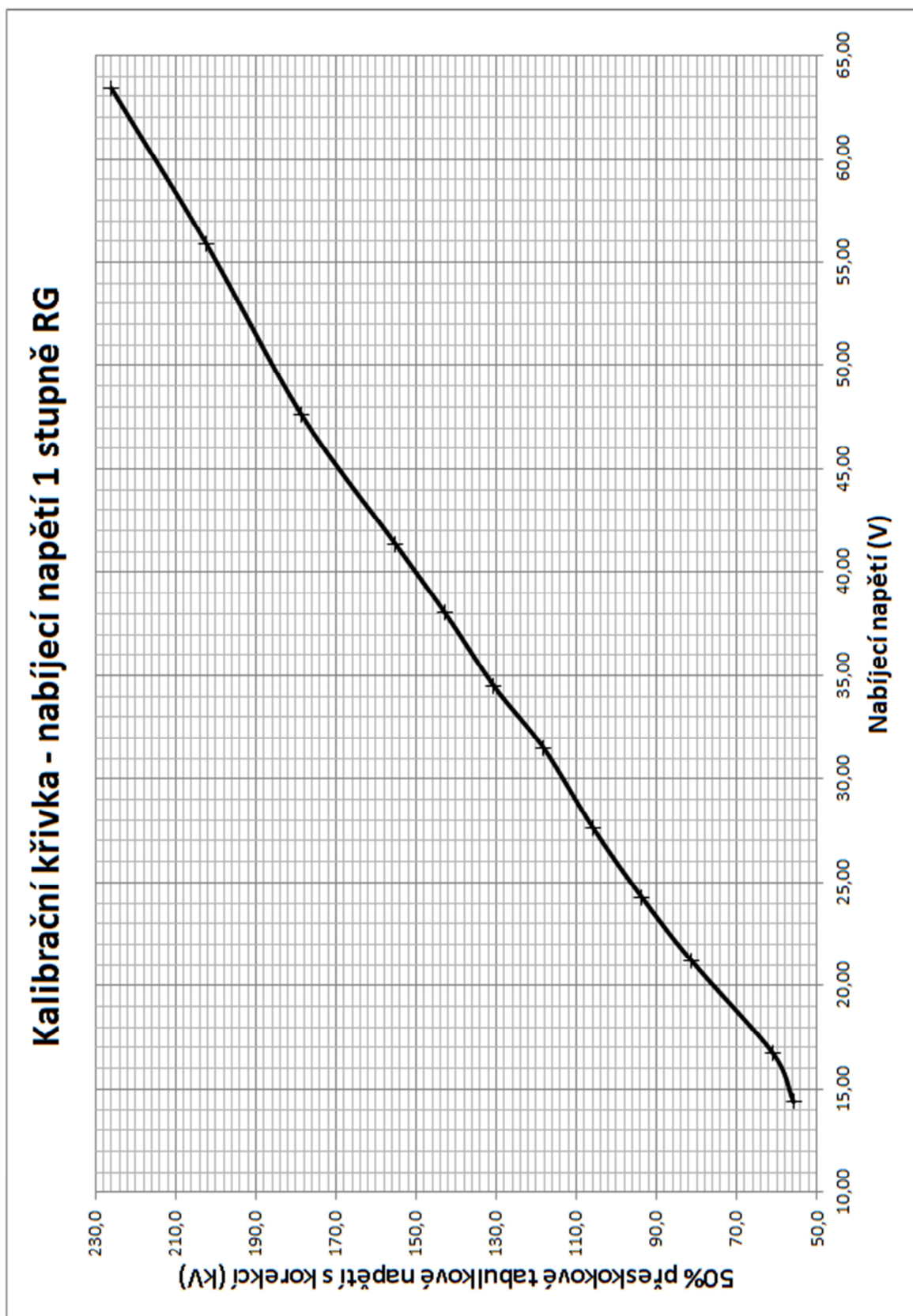
Doskok kulového jiskřiště (cm)	Průměr kulových elektrod cm											
	2	5	6.25	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200
6.50				156.0	164.0	168.0	175.0	177.0	177.0	177.0	177.0	
7.00				163.0	173.0	178.0	187.0	189.0	190.0	190.0	190.0	
7.50				170.0	181.0	187.0	199.0	202.0	203.0	203.0	203.0	
8.00					189.0	196.0	211.0	214.0	215.0	215.0	215.0	
9.00					203.0	212.0	233.0	239.0	240.0	241.0	241.0	
10.00					215.0	226.0	254.0	263.0	265.0	266.0	266.0	266.0
11.00						238.0	273.0	287.0	290.0	292.0	292.0	292.0
12.00						249.0	291.0	311.0	315.0	318.0	318.0	318.0
13.00							308.0	334.0	339.0	342.0	342.0	342.0
14.00							323.0	357.0	363.0	366.0	366.0	366.0
15.00							337.0	380.0	387.0	390.0	390.0	390.0
16.00							350.0	402.0	411.0	414.0	414.0	414.0
17.00							362.0	422.0	435.0	438.0	438.0	438.0
18.00							374.0	442.0	458.0	462.0	462.0	462.0
19.00							385.0	461.0	482.0	486.0	486.0	486.0
20.00							395.0	480.0	505.0	510.0	510.0	510.0
22.00								510.0	545.0	555.0	560.0	560.0
24.00								540.0	585.0	600.0	610.0	610.0
26.00								570.0	620.0	645.0	655.0	660.0
28.00								595.0	660.0	685.0	700.0	705.0
30.00								620.0	695.0	725.0	745.0	750.0
32.00								640.0	725.0	760.0	790.0	795.0
34.00								660.0	755.0	795.0	835.0	840.0
36.00								680.0	785.0	830.0	880.0	885.0
38.00								700.0	810.0	865.0	925.0	935.0
40.00								715.0	835.0	900.0	965.0	980.0
45.00									890.0	980.0	1060.0	1090.0
50.00									940.0	1040.0	1150.0	1190.0
55.00									985.0	1100.0	1240.0	1290.0
60.00									1020.0	1150.0	1310.0	1380.0

## 7 Přílohy

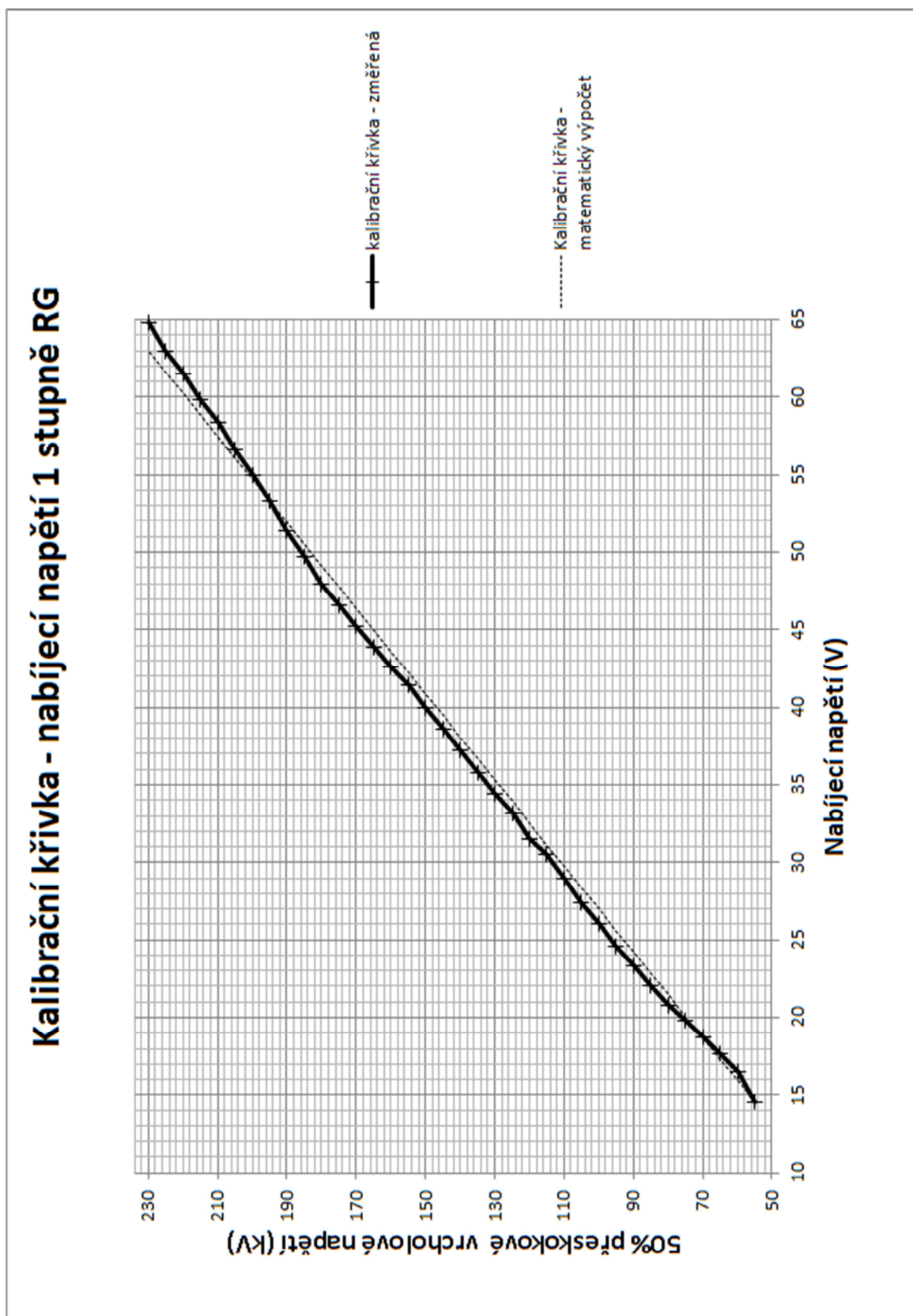
Doskok kulového jiskřiště (cm)	Průměr kulových elektrod											
	cm											
	2	5	6.25	10	12.5	15	25	50	75	100	150	200
65.00										1200.0	1380.0	1470.0
70.00										1240.0	1430.0	1550.0
75.00										1280.0	1480.0	1620.0
80.00											1530.0	1690.0
85.00											1580.0	1760.0
90.00											1630.0	1820.0
100.00											1720.0	1930.0
110.00											1790.0	2030.0
120.00											1860.0	2120.0
130.00												2200.0
140.00												2280.0
150.00												2350.0

Podbarvené hodnoty, které jsou uvedeny pro doskoky větší než 0.5 D, mají nejistotu \* větší.

## 7 Přílohy

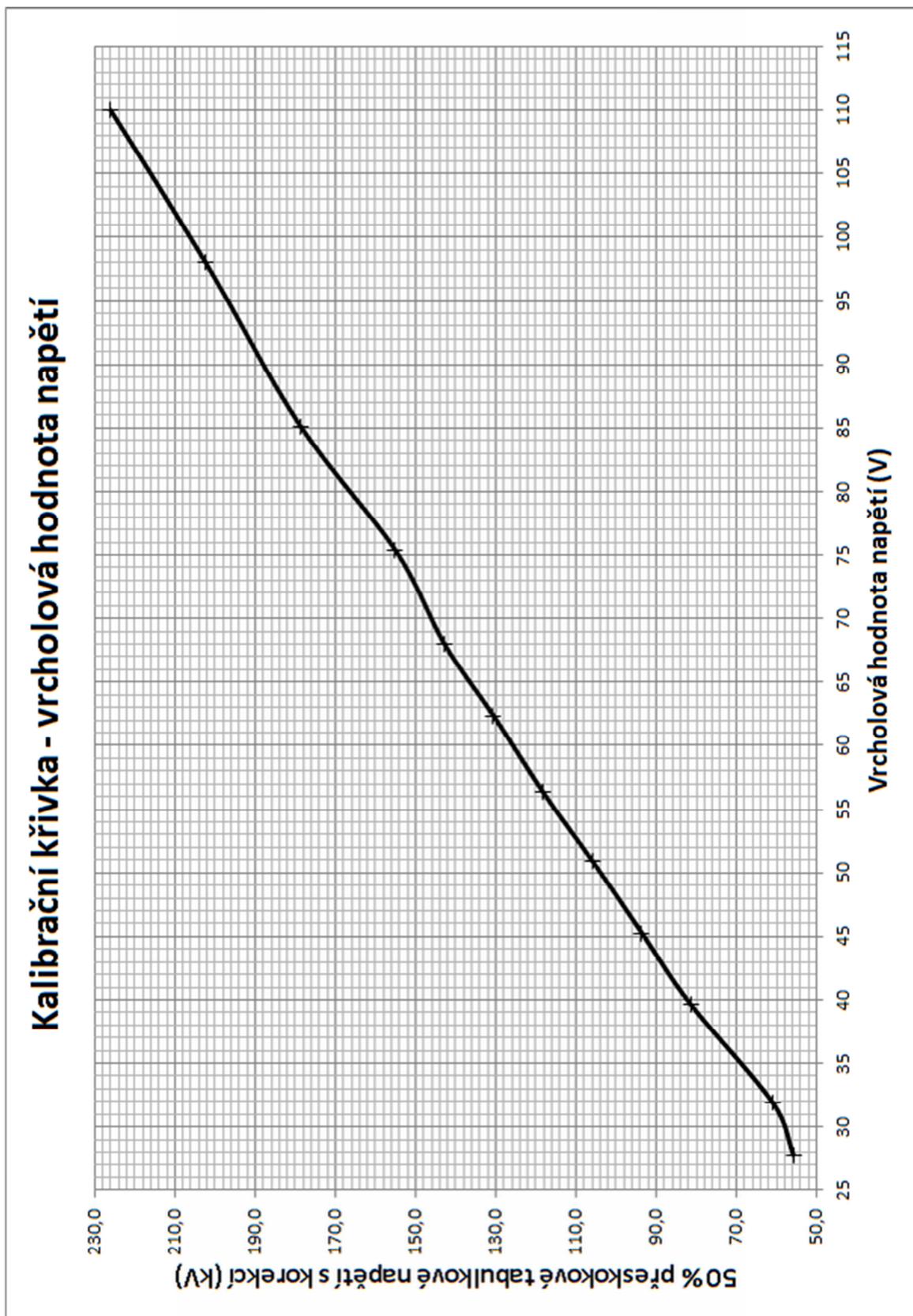
**7.3 Kalibrační křivka 50% přeskového tabulkového napětí v závislosti na nabíjecím napětí 1 stupně rázového generátoru:**

## 7 Přílohy

**7.4 Kalibrační křivka 50% přeskového tabulkového napětí v závislosti na nabíjecím napětí 1 stupně rázového generátoru – porovnání změřené a vypočítané hodnoty:**

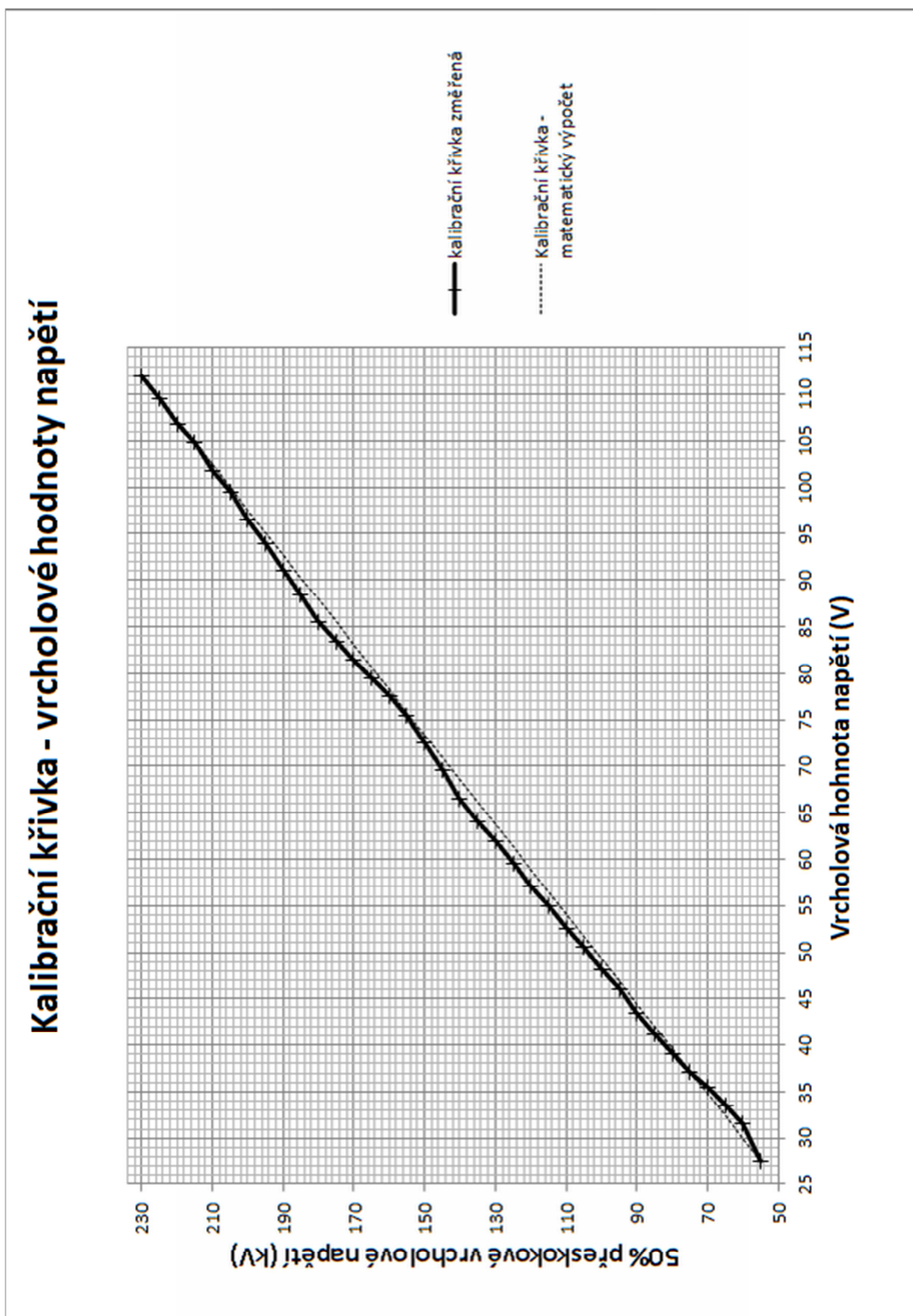
7 Přílohy

**7.5 Kalibrační křivka 50% přeskového tabulkového napětí v závislosti na vrcholovém napětí:**

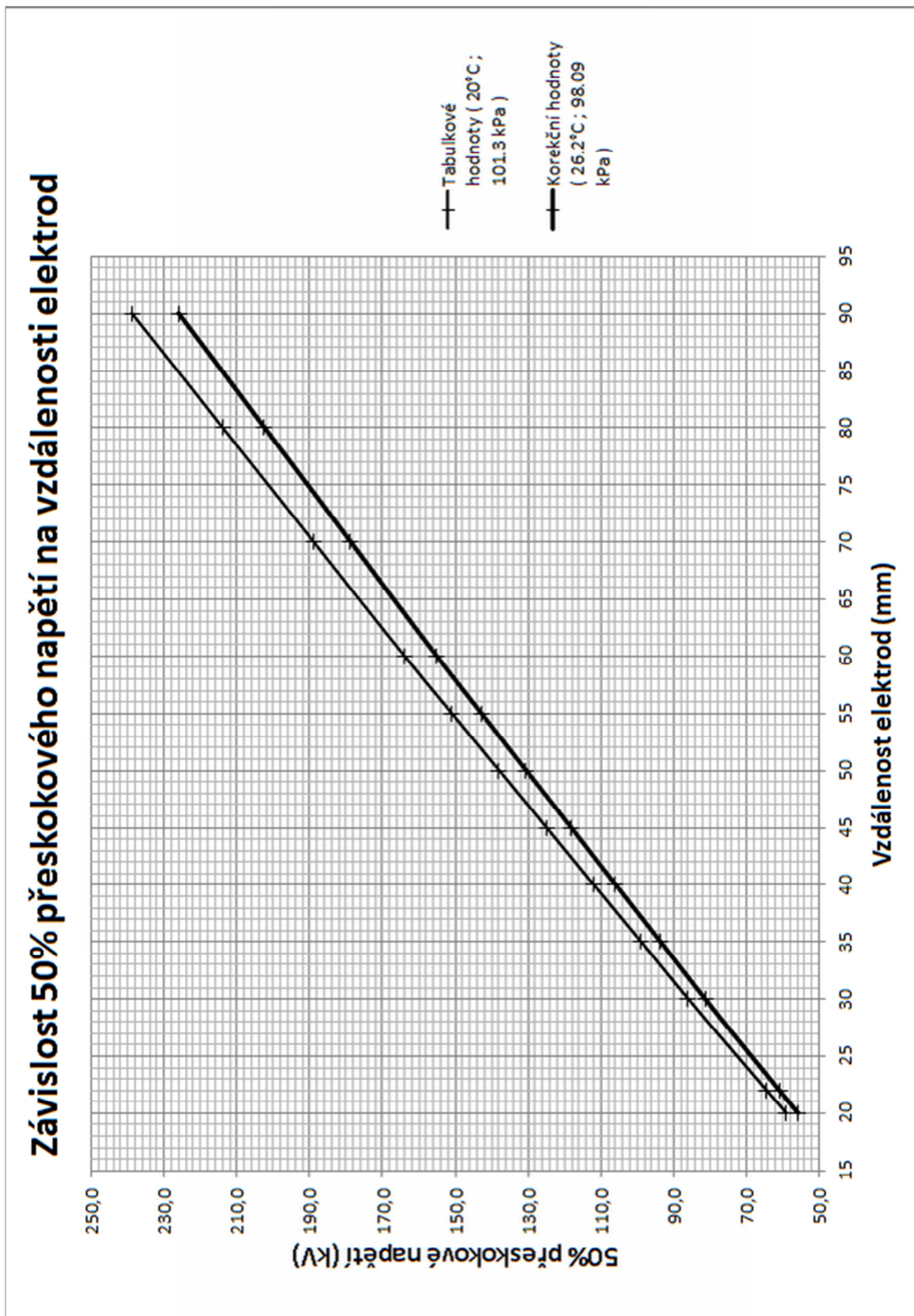


## 7 Přílohy

### 7.6 Kalibrační křivka 50% přeskového tabulkového napětí v závislosti na vrcholovém napětí – porovnání naměřené a vypočítané hodnoty:



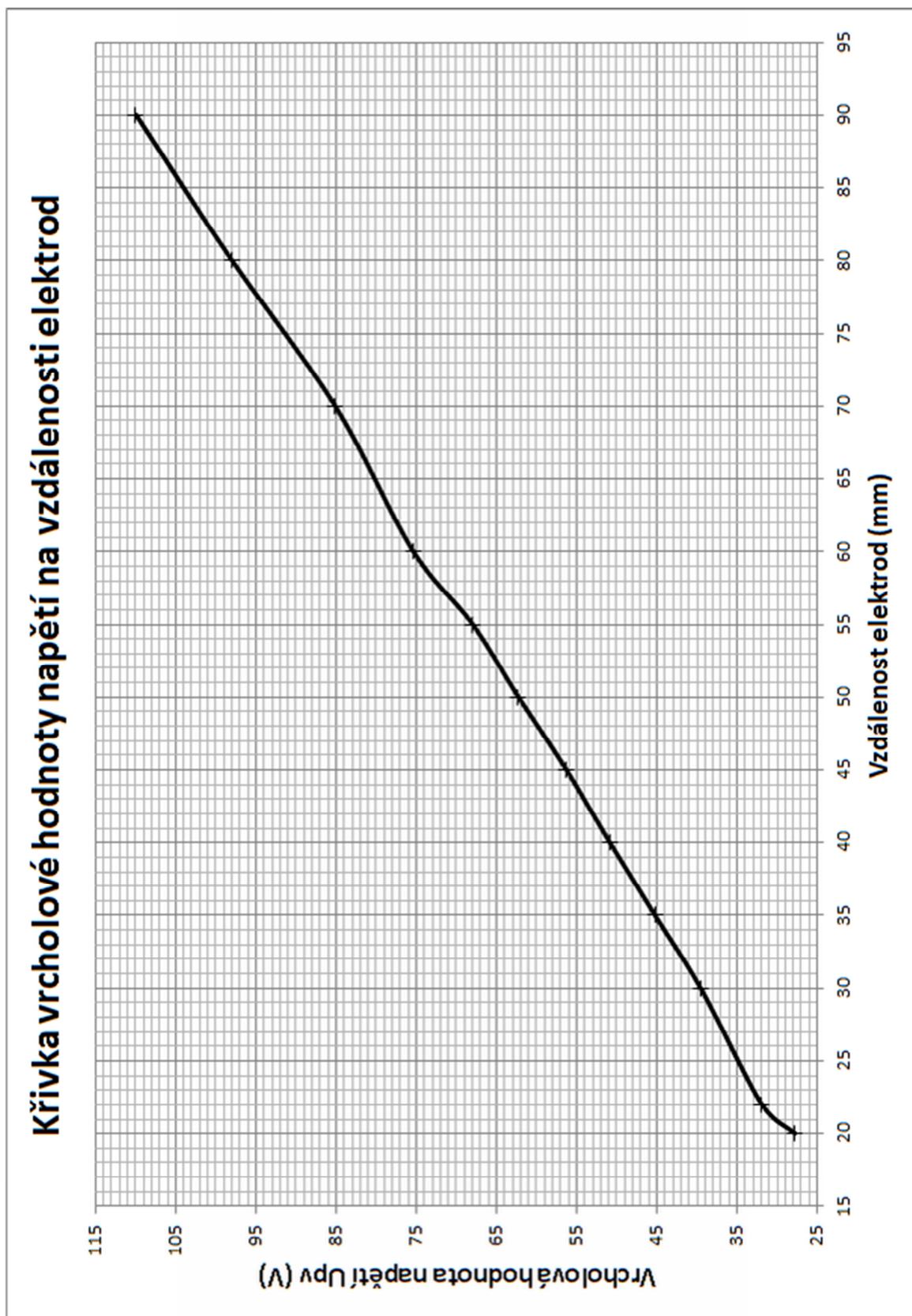
**7.7 Křivka 50% přeskovového napětí v závislosti na vzdálenosti elektrod:**



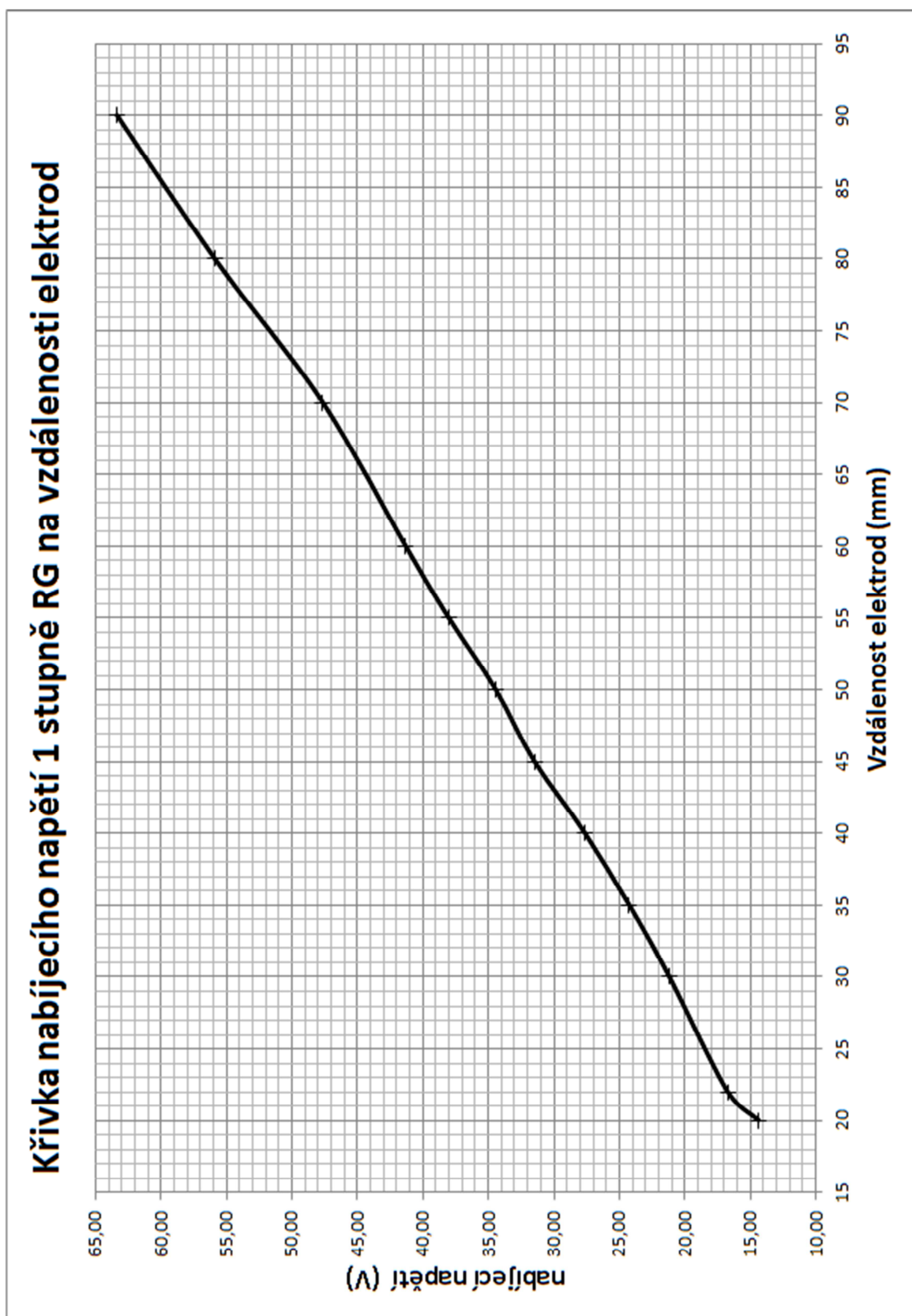


## 7 Přílohy

## 7.8 Křivka závislosti výstupního vrcholového napětí na vzdálenosti elektrod:



## 7 Přílohy

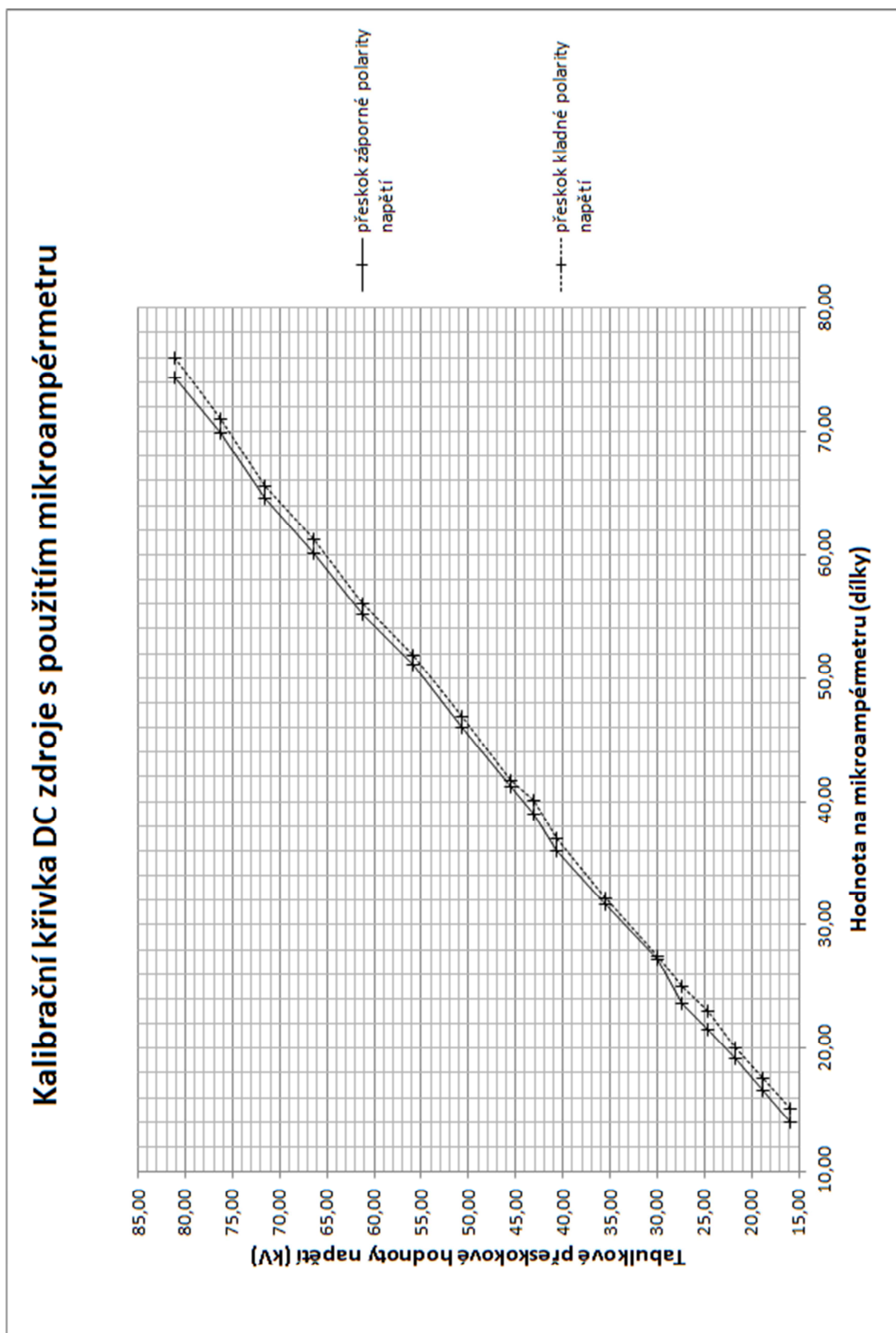
**7.9 Křivka závislosti nabíjecího napětí 1 stupně rázového generátoru na vzdálenosti elektrod:**

## 7 Přílohy

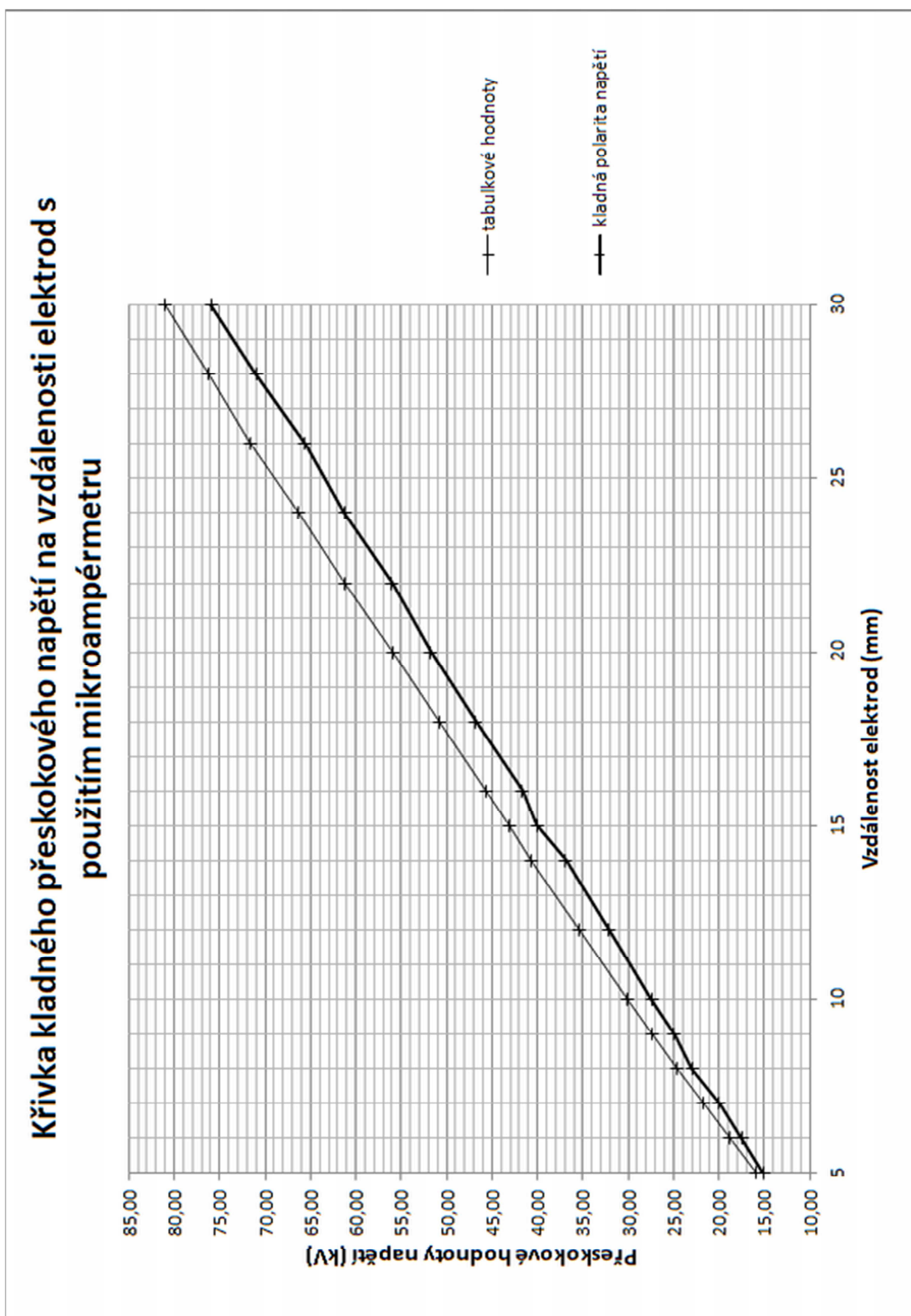
**7.10 Tabulka hodnot nabíjecího a vrcholového napětí v závislosti na 50% přeskokovém napětí:**

50% přeskokové napětí s korekcí (kV)	Nabíjecí napětí (V)		Vrcholová hodnota napětí (V)	
	změřeno	vypočteno	změřeno	vypočteno
55	14,5	14,50	27,50	27,50
60	16,5	15,88	31,50	29,91
65	17,7	17,27	33,50	32,33
70	18,7	18,65	35,40	34,74
75	19,8	20,04	37,10	37,16
80	20,8	21,43	39,00	39,57
85	22	22,81	41,10	41,99
90	23,3	24,20	43,50	44,40
95	24,6	25,58	46,00	46,81
100	26	26,97	48,10	49,23
105	27,4	28,35	50,50	51,64
110	29	29,74	52,50	54,06
115	30,5	31,12	55,00	56,47
120	31,5	32,51	57,00	58,88
125	33,1	33,89	59,50	61,30
130	34,4	35,28	62,00	63,71
135	35,8	36,67	64,10	66,13
140	37,2	38,05	66,50	68,54
145	38,6	39,44	69,50	70,96
150	40	40,82	72,50	73,37
155	41,4	42,21	75,50	75,78
160	42,6	43,59	77,50	78,20
165	43,9	44,98	79,50	80,61
170	45,2	46,36	81,40	83,03
175	46,6	47,75	83,40	85,44
180	48	49,14	85,50	87,86
185	49,7	50,52	88,50	90,27
190	51,4	51,91	91,00	92,68
195	53,3	53,29	94,00	95,10
200	55	54,68	96,50	97,51
205	56,6	56,06	99,50	99,93
210	58,4	57,45	101,80	102,34
215	59,8	58,83	104,80	104,76
220	61,5	60,22	106,80	107,17
225	63	61,60	109,50	109,58
230	64,8	62,99	112,00	112,00

**7.11 Kalibrační křivka stejnosměrného zdroje vysokého napětí s mikroampérmetrem a předřadným odporem:**

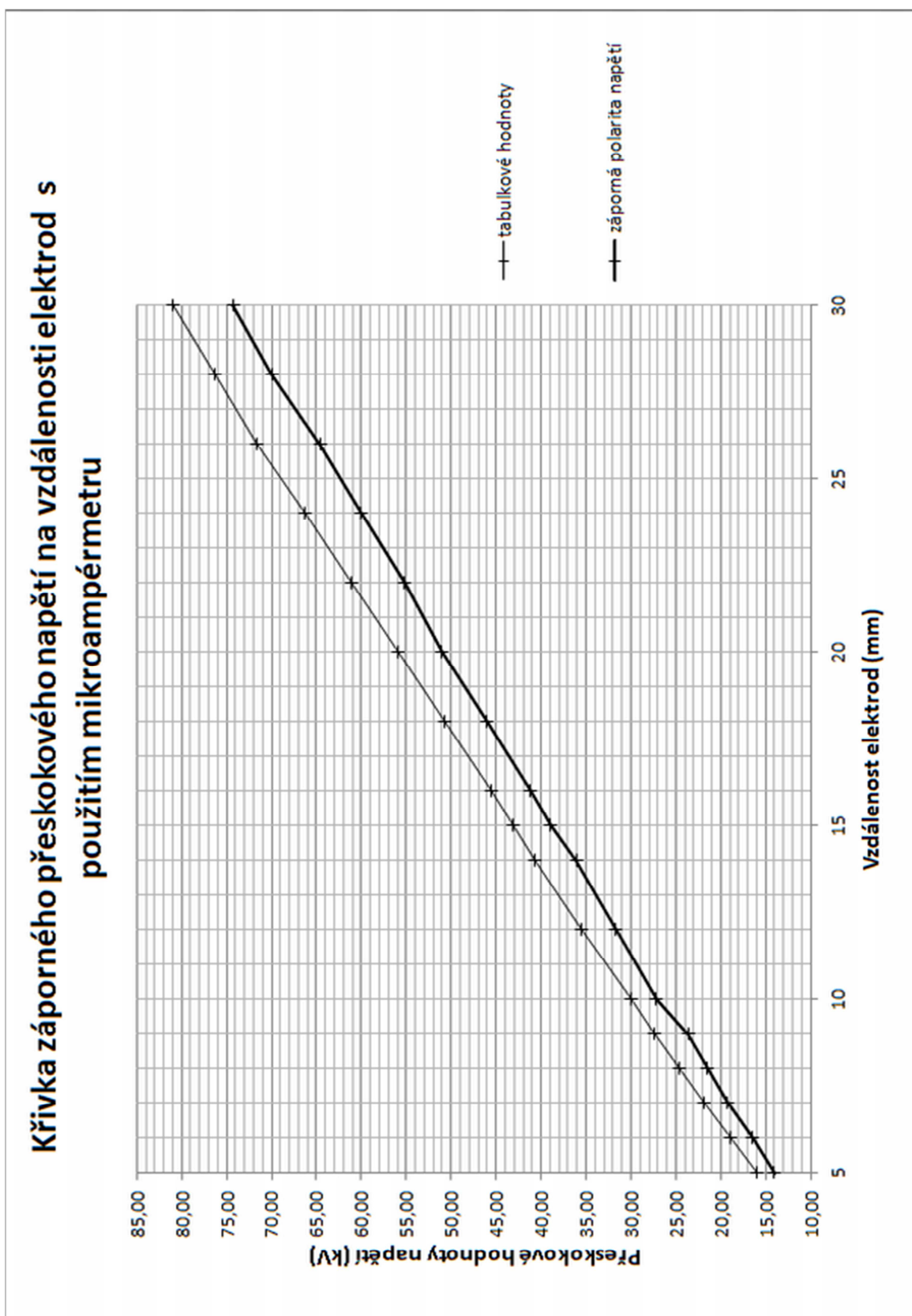


### 7.12 Křivka stejnosměrného zdroje vysokého napětí s mikro-ampérmetrem pro kladnou polaritu napětí v závislosti na vzdálenosti elektrod:



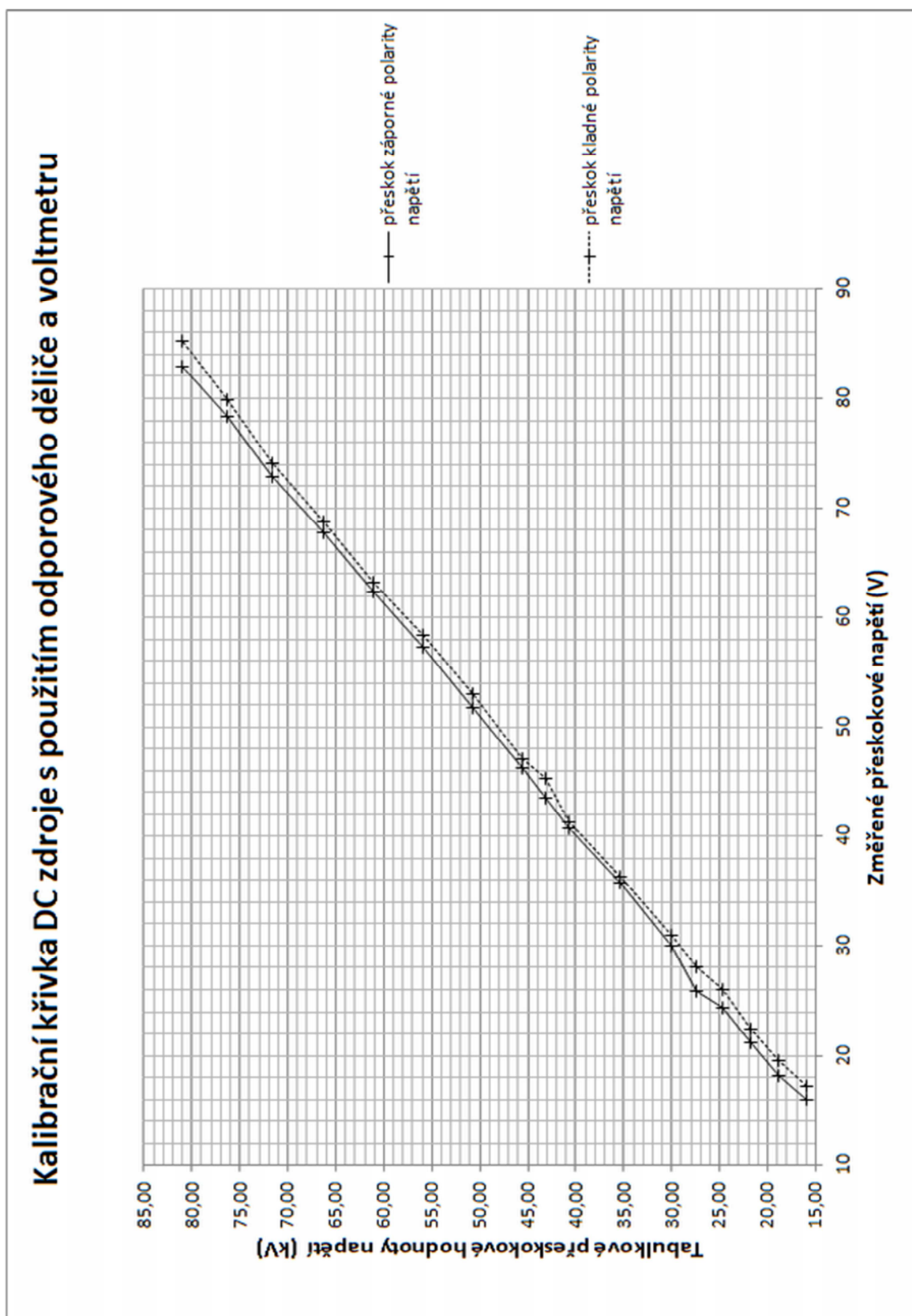
## 7 Přílohy

## 7.13 Křivka stejnosměrného zdroje vysokého napětí s mikro-ampérmetrem pro zápornou polaritu napětí v závislosti na vzdálenosti elektrod:

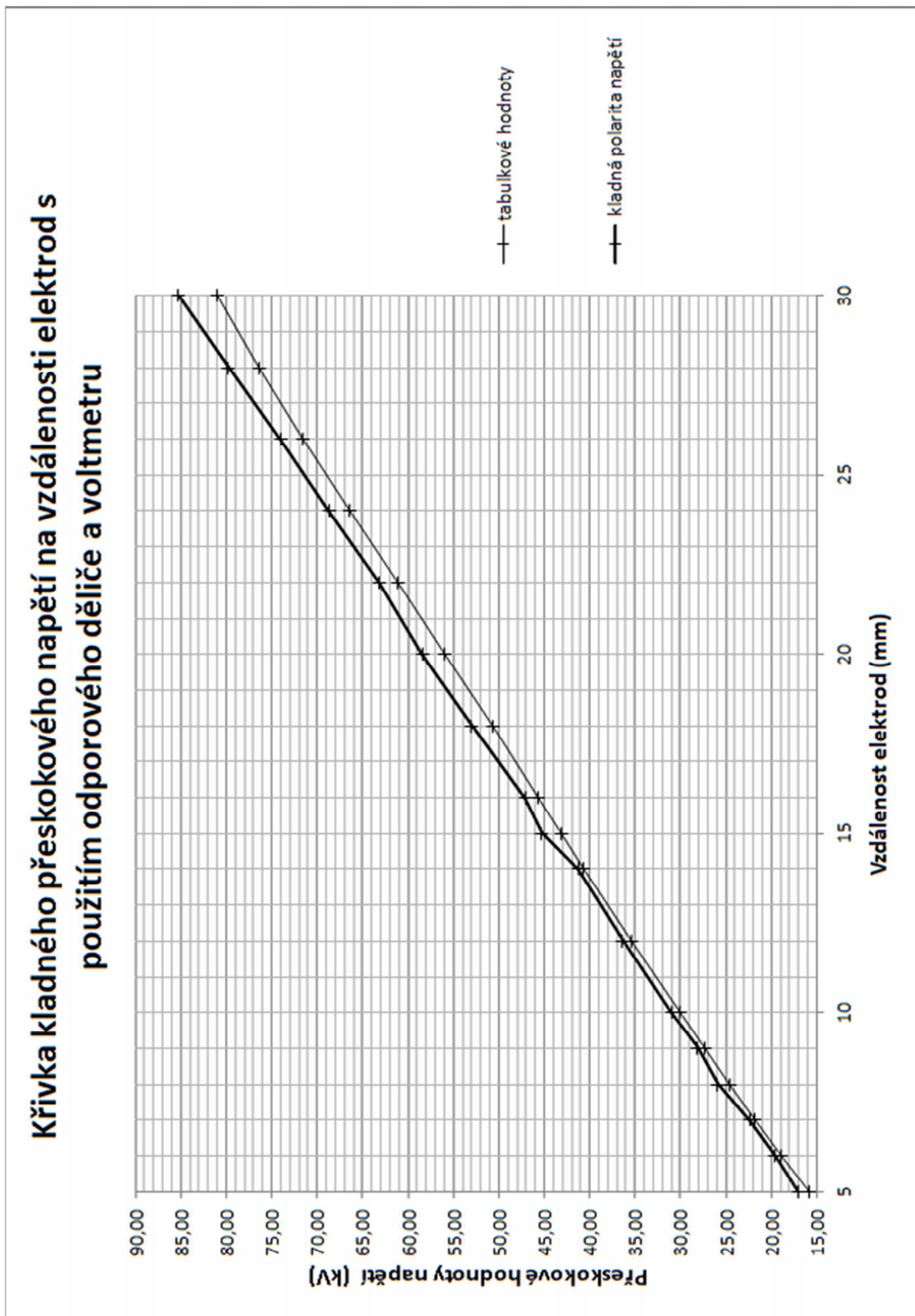


## 7 Přílohy

## 7.14 Kalibrační křivka stejnosměrného zdroje vysokého napětí s odporovým děličem a voltmetrem:

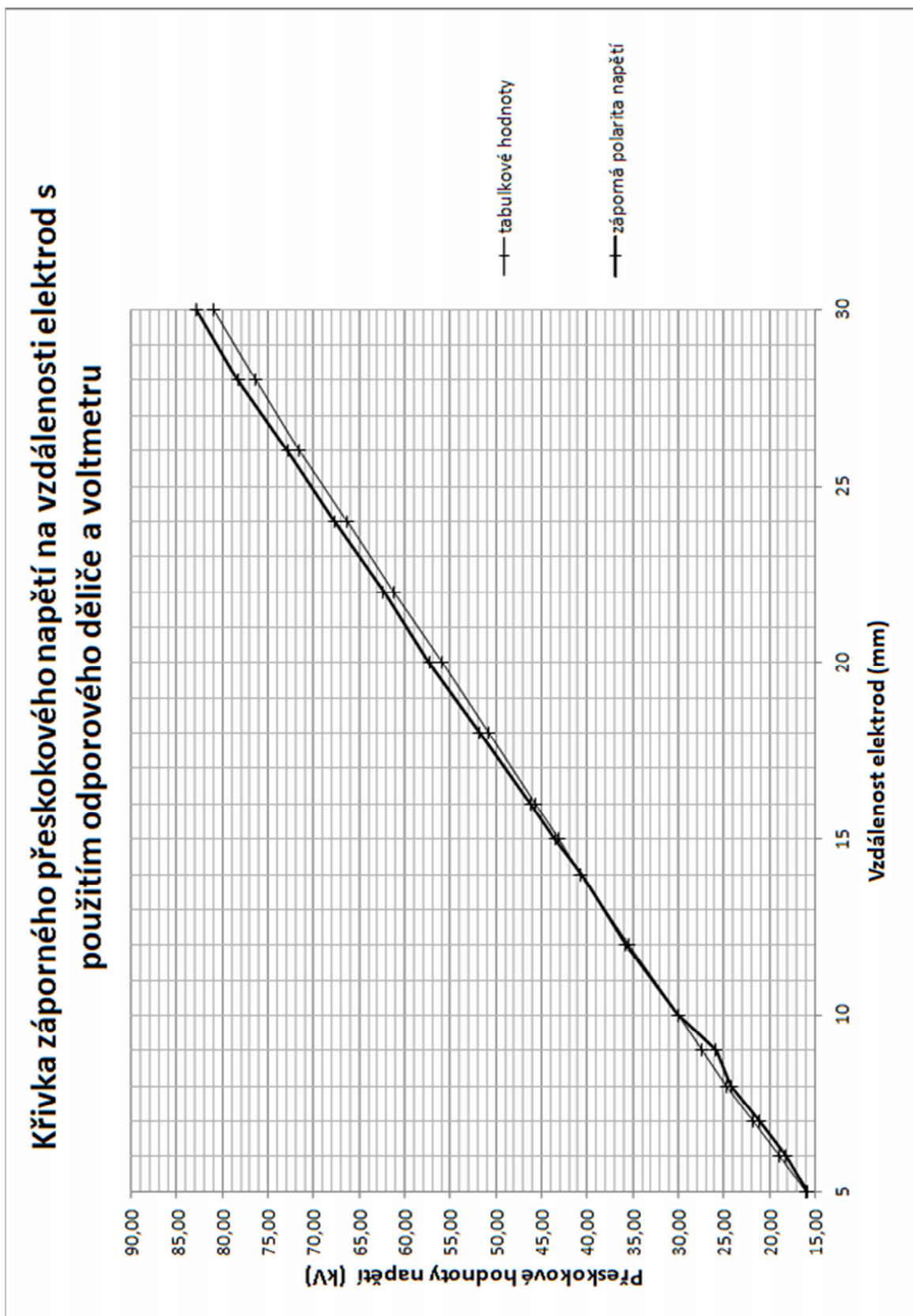


### 7.15 Křivka stejnosměrného zdroje vysokého napětí s odporovým děličem a voltmetrem pro kladnou polaritu napětí v závislosti na vzdálenosti elektrod:

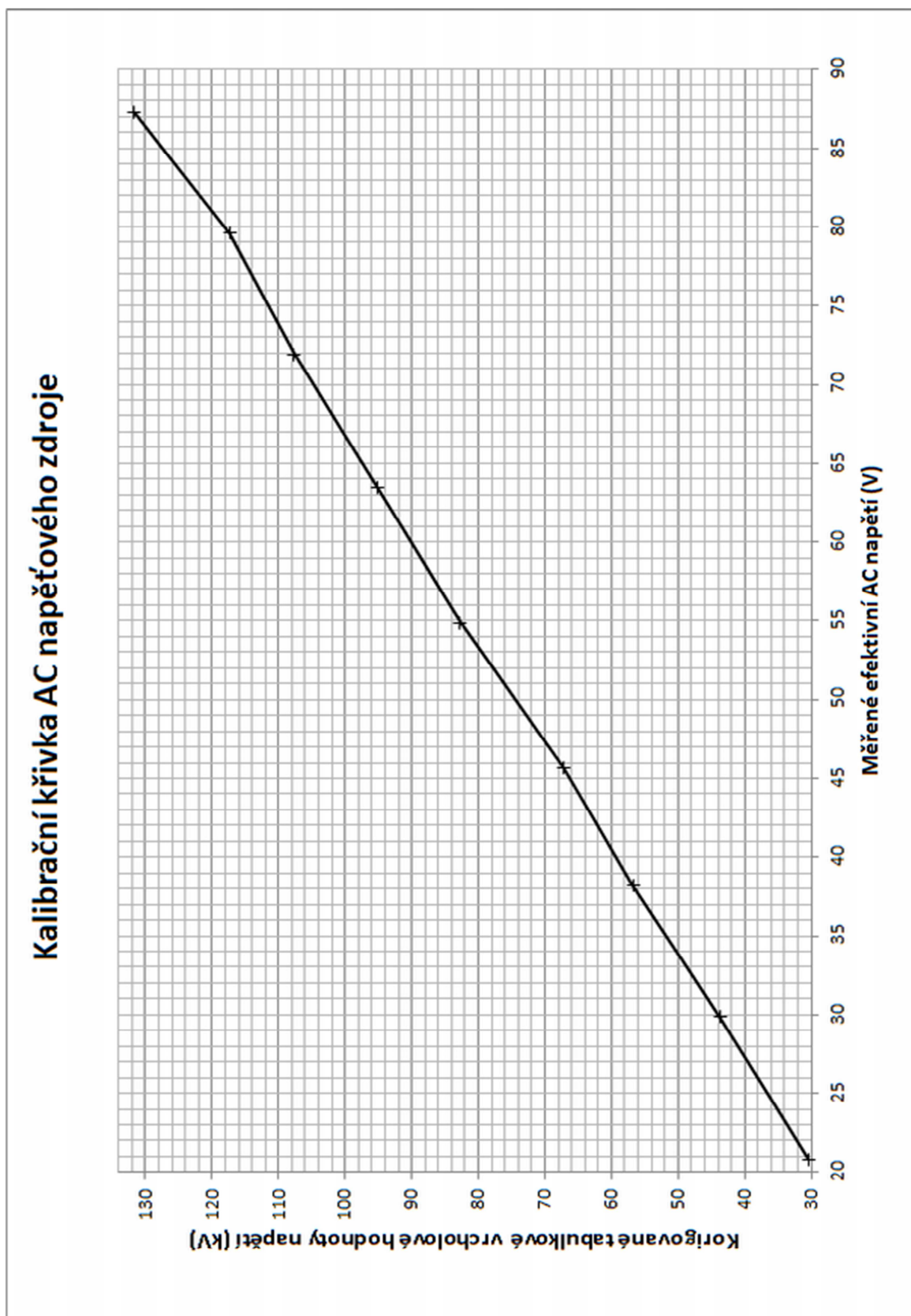


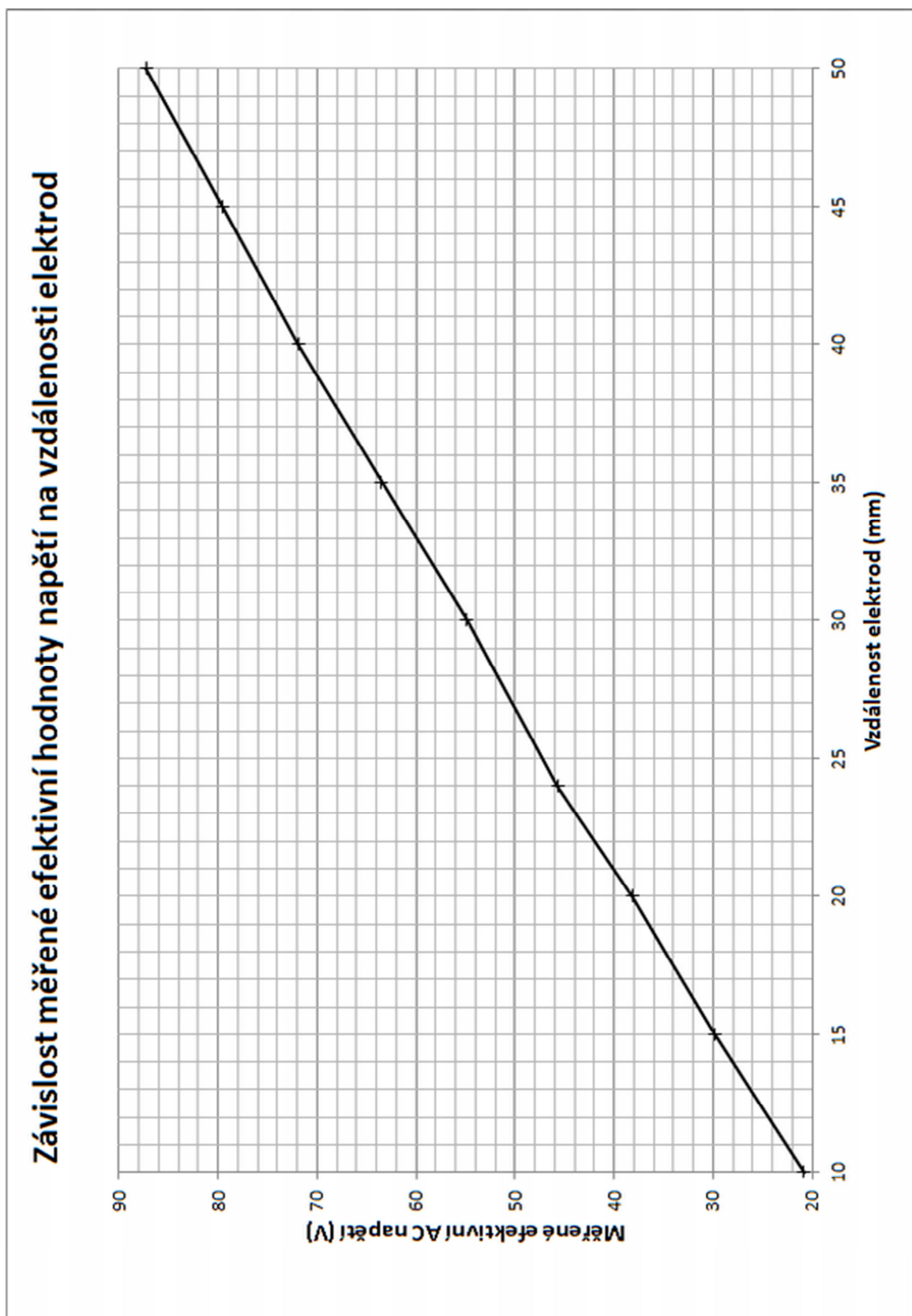


### 7.16 Křivka stejnosměrného zdroje vysokého napětí s odporovým děličem a voltmetrem pro zápornou polaritu napětí v závislosti na vzdálenosti elektrod:



## 7 Přílohy

**7.17 Kalibrační křivka střídavého vysokého napětí s připojeným voltmetrem, přes měřicí transformátor:**

**7.18 Křivka efektivních hodnot AC napětí v závislosti na vzdálenosti elektrod:**

### 7.19 Křivka přepočtených vrcholových hodnot AC napětí v závislosti na vzdálenosti elektrod:

