

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Vliv parametrů napět'ového impulzu na průrazné chování  
izolace**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej DUNOVSKÝ**  
Osobní číslo: **E16N0003P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Vliv parametrů napěťového impulzu na průrazné chování izolace**  
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Uveďte přehled požadavků na zkoušky impulzním napětím podle ČSN EN 60060-1.
2. Analyzujte faktory ovlivňující tvar zkušebního napětí.
3. Zpracujte přehled aktuálních poznatků o vlivu tvaru zkušebního impulzního napětí na napěťovou pevnost izolace.
4. Experimentálně ověřte vliv variability tvaru napěťového impulzu na napěťovou pevnost.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Eva Müllerová, Ph.D.

Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 10. října 2017

Termín odevzdání diplomové práce: 24. května 2018

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



Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce se zabývá analýzou vlivu tvaru zkušebního atmosférického impulzního napětí na napěťovou pevnost izolace. Teoretická část práce nejprve objasňuje základní pojmy z oboru zkoušek impulzním napětím, časové průběhy atmosférických i spínacích impulzních napětí, které jsou přesně definovány normou ČSN 60060-1, metody zkoušek impulzním napětím, prostřednictvím kterých se testuje napěťová pevnost izolace a požadavky na tyto zkoušky. V neposlední řadě jsou zde uvedeny aktuální poznatky z mezinárodních studií, které se zabývaly zkoumáním vlivu variability tvaru zkušebního atmosférického impulzního napětí na napěťovou pevnost izolace. V praktické části je popsán výpočet homogenity elektrického pole pomocí programu Agros2D, ve kterém se praktické měření uskutečňovalo a dále je popsáno samotné testování napěťové pevnosti syntetického vzduchu, které bylo realizováno prostřednictvím zkušební metody více hladinami, a které ověřuje vliv variability tvaru zkušebního impulzního napětí na napěťovou pevnost izolace.

## **Klíčová slova**

atmosférické impulzní napětí, tvar impulzního napětí, doba čela impulzního napětí, 50% průrazné napětí, průrazné charakteristiky, syntetický vzduch, polarita, rázový generátor

## **Abstract**

This thesis deals with the analysis of the effect of the shape of the tested atmospheric impulse voltage on the voltage strength of the insulation. The theoretical part of the thesis first explains the basic concepts in the field of impulse voltage tests, time courses of lightning and switching impulse voltages which are precisely defined by the standard ČSN 60060-1, methods of impulse voltage tests, by which the voltage strength of the insulation is tested and the requirements for these tests. Lastly are presented recent findings from international studies dealing with the research of the influence of the variability of the shape of the tested lightning impulse voltage on the voltage strength of the insulation. The practical part describes the calculation of the electric field homogeneity using the program Agros2D in which the practical measurement was done and also the testing of the voltage strength synthetic air, which was done using a multiple-level test method, and which tests the effect of the variability of the tested impulse voltage on the voltage strength insulation.

## **Key words**

lightning impulse (LI), impulse voltage waveform, wavefront time, 50% breakdown voltage, breakdown characteristics, synthetic air, polarity effect, impulse generator

## **Prohlášení**

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

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 25.4.2018

Bc. Ondřej Dunovský

## **Poděkování**

Poděkování patří hlavně vedoucí této diplomové práce doc. Ing. Evě Müllerové, Ph. D. za výborné vedení a věnovaný čas, za cenné profesionální rady a připomínky a za zapůjčení literatury. Také bych velmi rád poděkoval svým rodičům Ludmile Dunovské a Radkovi Dunovskému za dlouholetou podporu během studií.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>11</b>
<b>1 ZÁKLADNÍ POJMY PROBLEMATIKY</b> .....	<b>12</b>
1.1 DIELEKTRIKUM A IZOLANT .....	12
1.2 ELEKTRICKÁ PEVNOST A PRŮRAZNÉ NAPĚTÍ .....	13
1.3 PRŮRAZ, PŘESKOK .....	13
<b>2 IMPULZNÍ NAPĚTÍ</b> .....	<b>15</b>
2.1 ATMOSFÉRICKÉ IMPULZNÍ NAPĚTÍ .....	16
2.2 SPÍNACÍ IMPULZNÍ NAPĚTÍ .....	20
<b>3 ZKOUŠKY IMPULZNÍM NAPĚTÍM</b> .....	<b>22</b>
3.1 PŘEHLED POŽADAVKŮ NA ZKOUŠKY IMPULZNÍM NAPĚTÍM DANÉ NORMOU ČSN .....	22
3.1.1 <i>Měření zkušebního napětí, proudu a určování tvaru impulzu</i> .....	22
3.1.2 <i>Zkušební postupy výdržným napětím</i> .....	24
3.2 GENERÁTORY IMPULZNÍHO NAPĚTÍ .....	26
3.2.1 <i>Základní RC generátor</i> .....	26
3.2.2 <i>Vicestupňový generátor</i> .....	28
3.3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ TVAR ZKUŠEBNÍHO NAPĚTÍ .....	34
3.4 DRUHY ZKOUŠEK IMPULZNÍM NAPĚTÍM .....	39
3.4.1 <i>Zkouška více hladinami</i> .....	39
3.4.2 <i>Zkouška metodou nahoru – dolů</i> .....	41
3.4.3 <i>Zkouška postupným namáháním</i> .....	44
3.5 VYHODNOCENÍ ZKOUŠEK ATMOSFÉRICKÝM IMPULZNÍM NAPĚTÍM .....	46
3.5.1 <i>Vyhodnocení tvaru vlny zkušebního atmosférického impulzního napětí</i> .....	48
<b>4 AKTUÁLNÍ POZNATKY O VLIVU TVARU ZKUŠEBNÍHO IMPULZNÍHO NAPĚTÍ NA NAPĚŤOVOU PEVNOST IZOLACE</b> .....	<b>51</b>
<b>5 PRAKTICKÁ ČÁST</b> .....	<b>60</b>
5.1 PODMÍNKY REALIZOVANÉHO EXPERIMENTU .....	60
5.1.1 <i>Parametry zkušebních impulzních napětí</i> .....	62
5.1.2 <i>Zkušební objekt</i> .....	66
5.2 INTERPRETACE EXPERIMENTÁLNÍCH VÝSLEDKŮ .....	67
5.2.1 <i>Analýza stupně homogenity elektrického pole</i> .....	67
5.2.2 <i>Vliv doby čela na hodnotu průrazného napětí</i> .....	70
5.2.3 <i>Vliv tlaku na průrazné napětí</i> .....	72
5.2.4 <i>Vliv polarity zkušebního impulzního napětí</i> .....	73
5.2.5 <i>Vliv doby čela na dobu do useknutí</i> .....	76
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>80</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>82</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>



## Seznam symbolů a zkratek

$A_f$ [kV].....	konstanta závisující na parametrech jiskřiště
$C$ [F].....	Kapacita
$C_b$ [F].....	Základní zátěžová kapacita generátoru
$C_i$ [F] .....	Hlavní kapacita generátoru
$C_l$ [F] .....	Zátěžová kapacita generátoru
$C_{to}$ [F].....	Kapacita testovaného objektu
$d$ [mm].....	Vzdálenost mezi elektrodami
$E$ [ $V \cdot m^{-1}$ ].....	Intenzita elektrického pole
$E_p$ [ $kV \cdot cm^{-1}$ ].....	Elektrická pevnost
GIS .....	Gas Insulated Switchgear – plynem izolovaná rozvodna
$J$ .....	Jiskřiště
$K_1$ [-] .....	Konstanta
$K_2$ [-] .....	Konstanta
$k(f)$ .....	Funkce zkušebního napětí
$l$ [m].....	Délka
$L$ .....	Funkce věrohodnosti
$L$ [H] .....	Indukčnost
$L_{to}$ [H] .....	Indukčnost testovaného objektu
$O$ .....	Skutečný počátek
$O_1$ .....	Zdánlivý počátek
$P$ [Pa].....	Tlak
$r$ [mm] .....	Poloměr zakřivení
$R$ [ $\Omega$ ] .....	Odpor
$R$ [mm].....	Poloměr
$R'$ [ $\Omega$ ].....	Ekvivalentní rezistor
$R_c$ [ $\Omega$ ].....	Nabíjecí rezistor
$R_{ext}$ [ $\Omega$ ].....	Externí rezistor
$R_f$ [ $\Omega$ ] .....	Čelní rezistor
$R_t$ [ $\Omega$ ] .....	Týlní rezistor
$s$ [%].....	Směrodatná odchylka
$s'$ [%].....	Odhad směrodatné odchylky

$t_d$ [s]	..... doba zpoždění
$T$ [s]	..... Časový úsek
$T_1$ [s]	..... Doba čela
$T_2$ [s]	..... Doba pultýlu
$T_c$ [s]	..... Doba do useknutí
$T_d$ [s]	..... Doba nad 90 % hodnoty maximálního impulzního napětí
$T_k$ [s]	..... Kritická doba čela
$T_p$ [s]	..... Doba poklesu napětí
$T_v$ [s]	..... Doba do vrcholu
$U$ [V]	..... Napětí
$\Delta U$ [V]	..... Napěťový rozdíl
$U_b(t)$	..... Základní křivka
$U_b$ [V]	..... Maximální hodnota základní křivky
$U_e$ [V]	..... Maximální hodnota zaznamenané křivky
$U_i$ [V]	..... Zapalovací napětí předprůrazných výbojů, napěťová hladina
$U_p$ [kV]	..... Průrazné napětí
$U_r(t)$	..... Zaznamenaná křivka
$U_R(t)$	..... Zbytková křivka
$U_{RF}(f)$	..... Filtrovaná zbytková křivka
$U_{ss}$ [V]	..... Stejnosečné napětí
$U_i(t)$	..... Křivka zkušební napětí
UVN	..... Ultra vysoké napětí
$U_{10}$ [V]	..... Hodnota napětí s 10% pravděpodobností průrazného výboje
$U_{50}$ [V]	..... Hodnota napětí s 50% pravděpodobností průrazného výboje
$U_{90}$ [V]	..... Hodnota napětí s 90% pravděpodobností průrazného výboje
$W_i$ [J]	..... Ionizační energie
$\varepsilon$ [F.m <sup>-1</sup> ]	..... Permittivita
$\eta$ [-]	..... Účinnost, Schwaigerův faktor
$\beta$ [-]	..... Velikost překmitu
$\beta'$ [-]	..... Velikost relativního překmitu
$\tau_1$ [-]	..... Časová konstanta
$\tau_2$ [-]	..... Časová konstanta

## Úvod

V závěrečné práci svého magisterského studia se zabývám problematikou vlivu parametrů napěťového impulzu na průrazné chování izolace. Přenosové a distribuční soustavy jsou neustále vystavovány účinkům atmosférických přepětí, které jsou způsobené úderem blesku, a jejichž velikosti napětí a proudů bývají zpravidla mnohonásobně vyšší než hodnoty napětí a proudů při běžných provozních podmínkách. Atmosférická přepětí se po vedení soustavy šíří ve tvaru vlny a v okamžiku, kdy je izolační systém určitého zařízení soustavy vystaven účinkům této vlny, může dojít k jeho nenávratnému poškození a to kupříkladu v případě výkonového transformátoru může představovat velkou ekonomickou ztrátu. Proto zkoušky atmosférickým impulzním napětím zaujímají velmi důležitou roli při konstrukci elektrických zařízení a norma přesně definuje parametry zkušební atmosférického impulzního napětí, se kterým se tyto zkoušky mají provádět.

Zkušenosti z praxe však zcela neodpovídají normě a atmosférická impulzní napětí, kterým jsou zařízení po dobu své činnosti vystavena, mají odlišné parametry. Z tohoto důvodu se v dnešní době uskutečňuje celá řada mezinárodních výzkumů, které modifikují standardní zkušební atmosférický impulz a vystavují jeho účinkům izolační systémy zařízení.

Diplomová práce je rozdělena celkem do pěti kapitol. První a druhá kapitola shrnují nejdůležitější pojmy, které tvoří pevný základ pro uvedení do samotné problematiky.

Třetí kapitola se zabývá zkouškami impulzním napětím, kterými se testuje napěťová pevnost izolací. Jsou zde uvedeny jednotlivé druhy těchto zkoušek, požadavky na ně, impulzní generátory, které se používají pro generování zkušebních atmosférických impulzních napětí, a je zde uveden způsob, kterým zkoušky impulzním napětím vyhodnocují.

Čtvrtá kapitola je věnována aktuálním poznatkům z mezinárodních studií, které se zabývaly zkoumáním vlivu různého tvaru zkušební atmosférického impulzního napětí na napěťovou pevnost izolace. Tato kapitola zároveň představuje pomyslný odrazový můstek pro poslední pátou kapitolu práce, která je zaměřena na praktické testování napěťové pevnosti plynného izolantu. Experiment ověřuje vliv variability tvaru atmosférického impulzního napětí na napěťovou pevnost izolace.

# 1 Základní pojmy problematiky

Stěžejní částí této diplomové práce je zkoumání chování vzduchového dielektrika, jež je vystavováno napěťovým impulzům o různých parametrech. Pro správné pochopení této problematiky je v první řadě důležité objasnit základní pojmy.

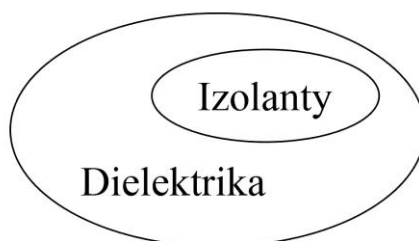
## 1.1 Dielektrikum a izolant

Tyto dva výrazy bývají velmi často zaměňovány jeden za druhý, avšak svými primárními vlastnostmi se jedná o dva rozdílné pojmy.

Pokud je dielektrikum vloženo do vnějšího elektrického pole, dojde v této látce k vytvoření jejího vlastního vnitřního elektrického pole. Z tohoto důvodu lze dielektrikum označit jako látku, jež je schopna se při působení vnějšího elektrického pole zpolarizovat. [1]

Naopak izolant je materiál, jehož primární schopností je znemožnit průchod proudu mezi dvěma místy s různým elektrickým potenciálem. Jinými slovy, materiál schopný tato dvě místa od sebe vzájemně odizolovat. [1]

I přes tyto zásadní rozdíly však nelze pojmy dielektrikum a izolant od sebe vzájemně oddělit, neboť spolu velmi úzce souvisí. Dielektrikum je obecnější kategorie, pod kterou je izolant zahrnut, tedy každý izolant je dielektrikum, ale ne každé dielektrikum je izolant. Tento vzájemný vztah je názorně zobrazen na Obr. 1.1. [1]



Obr. 1.1 Dielektrika a izolanty (převzato z [1])

## 1.2 Elektrická pevnost a průrazné napětí

Elektrická pevnost (nebo též průrazná či dielektrická pevnost) je fyzikální vlastnost dielektrik odolávat namáhání působením elektrického pole. Jedná se o velmi důležitou veličinu, za pomoci které se navrhují konstrukce elektrických zařízení tak, aby v praxi správně a bezporuchově plnila svoji funkci. Elektrickou pevnost charakterizuje velikost přiložené intenzity elektrického pole  $E$  na dielektrikum, při níž v závislosti na skupenství dielektrika dojde buďto k průrazu či přeskoku (kap. 1.3). Pokud tedy působící elektrické pole dosáhne určité maximální meze, dojde v dielektriku k prudkému nárůstu koncentrace volných nosičů elektrického náboje, pohyblivost těchto nábojů vzroste a dielektrikum přichází o své izolační schopnosti. Následně tento děj pokračuje výbojem mezi původně odizolovanými místy různého potenciálu a končí poškozením samotného dielektrika. [1]

Elektrická pevnost je definována vztahem:

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (1.1)$$

kde  $U_p$  je veličina známá jako průrazné napětí a  $d$  vyjadřuje tloušťku dielektrika v místě průrazu či přeskoku. Velikost tohoto napětí závisí jak na parametrech působícího elektrického pole na dielektrikum, tak na fyzikálních vlastnostech namáhaného dielektrika. Velikost tohoto napětí lze tedy ovlivnit tvarem působícího elektrického pole, dobou trvání elektrického namáhání, či rozměry samotného dielektrika. Elektrická pevnost je dále ovlivněna působením dalších činitelů, mezi které lze např. zařadit vliv teploty, tlaku a vlhkosti okolí, či chemická čistota dielektrika. [1]

## 1.3 Průraz, přeskok

Pro popis elektrické pevnosti dielektrika je též nutno vymezit pojmy průraz a přeskok.

K průrazu či přeskoku mezi elektrodami nacházejícími se v izolačním prostředí dochází v takovém případě, kdy napětí mezi zmíněnými elektrodami překročí určitou mez. Tento jev je doprovázen prudkým poklesem napětí na elektrodách a v dielektriku přitom vzniká úplný

výboj. Zda úplný výboj způsobí v dielektriku průraz či přeskok závisí na částicovém skupenství daného dielektrika. O průraz se jedná tehdy, dojde-li k úplnému výboji v dielektriku, jež je pevného skupenství. Naopak o přeskoku lze hovořit v případě, kdy úplný výboj vzniká v dielektriku plynného či kapalného skupenství. [2]

V okamžiku průrazu dojde mezi elektrodami k prudkému nárůstu proudu a mezi elektrodami lze spatřit jasně svítící ohnivou stopu, jež je doprovázena vysokou teplotou a která způsobuje poškození izolantu. Průraz pevného dielektrika je zvláště charakteristický otvorem, který je do něj po průrazu vypálen, což značí jeho nenávratné poškození a s tím spjatou ztrátu izolačních vlastností. Naopak po přeskoku se izolační vlastnosti plynného či kapalného izolantu po určité době opět obnoví. V takovém případě mluvíme o tzv. regeneraci. [2]

## 2 Impulzní napětí

Poruchy distribučních a přenosových sítí jsou nejčastěji zapříčiněny dvěma druhy impulzních elektrických napětí aperiodického průběhu. Tato napětí jsou charakteristická svojí vysokou amplitudou, která může dosáhnout hodnoty mnohonásobně vyšší, než je hodnota normálního provozního střídavého napětí. [3]

Jako první napětí tohoto druhu lze uvést atmosférické přepětí způsobené úderem blesku např. do fázového vodiče elektrického vedení. Amplitudy těchto přepětí jsou zpravidla více než 1000 kV a každý takovýto atmosférický impuls způsobí nárůst proudu na vedení, který nabývá hodnot často vyšších než 100 kA. Tyto děje jsou navíc doprovázeny vlnami, které se šíří po vedení a jejichž maximální hodnota amplitudy je omezena pouze maximální izolační pevností daného venkovního elektrického vedení. Napětí této přepět'ové vlny velmi rychle vzrůstá k jejímu maximu, přičemž rychlost nárůstu napětí je přímo úměrná strmosti atmosférického proudu a může překročit strmost až 100 kA/ $\mu$ s. Hodnotu samotného napětí lze následně snadno získat vynásobením daného proudu s efektivní hodnotou vlnové impedance daného vedení. [3]

Druhým rázovým napětím je spínací přepětí, jež je způsobováno spínacími procesy v elektrizační soustavě. Velikost amplitudy této přepět'ové vlny je závislá na provozním napětí a její tvar je dán spínacími procesy a impedancemi celého systému. V porovnání s atmosférickou přepět'ovou vlnou je rychlost nárůstu napětí spínací vlny zpravidla pomalejší. Avšak samotný tvar spínací vlny může též způsobit defekty v izolačních systémech. [3]

Atmosférické i spínací přepětí mohou též ovlivňovat chod nízkonapěťových distribučních sítí. Zde jsou přepětí nejčastěji přímo generována přítomnými spínači, či jsou přenesena z vysokonapěťové distribuční sítě. Amplitudy obou druhů přepětí mohou mít velikost až několik kV a mohou způsobovat průrazy izolací přítomných elektronických zařízení. Z tohoto důvodu jsou i nízkonapěťové elektronické systémy testovány proti vlivům přechodných aperiodických průběhů napětí a proudů. [3]

Jak je již řečeno výše, rázová vlna napětí je jednosměrná vlna, jejíž hodnota napětí rychle vzrůstá na svoji maximální hodnotu a následně opět pozvolněji klesá na nulu. Průběhy

napěťových vln v čase lze přesně definovat pomocí jejich polarity, vrcholové hodnoty, celkové doby trvání, doby trvání čela a doby trvání půltýlu. [2]

Rázové vlny, které se využívají během rázových zkoušek testujících elektrickou pevnost izolací, jsou generovány pomocí rázových generátorů. Přičemž elektrická pevnost izolantů podstatně závisí na tvaru rázové vlny, tedy převážně na době trvání čela a půltýlu vlny. [2] A právě zkoumání vlivu tvaru vlny na elektrickou pevnost izolantu je hlavním úkolem této diplomové práce.

Skutečný tvar obou přepětí je přitom závislý na mnoha okolních činitelích, proto jsou z důvodů požadavků na výsledky zkoušek testovací přepětí zahrnuta v národních a mezinárodních normách, které uvádějí normalizované průběhy aperiodických průběhů.

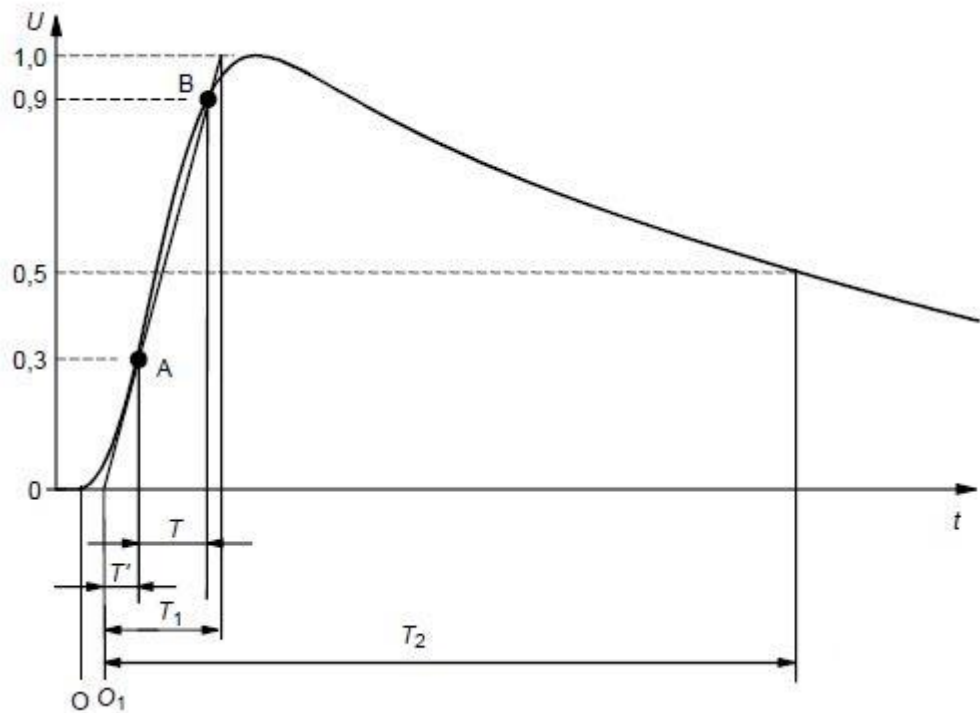
## 2.1 Atmosférické impulzní napětí

Norma ČSN EN 60060-1 uvádí toto napětí jako hladký plný impulz, jehož normalizovaný časový průběh je zobrazen na Obr. 2.1, a který lze popsat následujícími body a časovými intervaly: [2], [4]

- **Zdánlivý počátek  $O_1$**  – Tento bod se získá promítnutím přímky spojující body  $A$  a  $B$  v čele impulzu do časové osy. Přičemž bod  $A$  odpovídá 30 % vrcholové hodnoty napětí plného impulzu a bod  $B$  90 %.
- **Doba do vrcholu** – Je časový interval vymezen dobou trvání od zdánlivého počátku  $O_1$  do vrcholu vlny.
- **Doba trvání vrcholu** – Je charakterizována jako doba, po kterou je napětí vyšší než 90 % vrcholové hodnoty napětí plného impulzu.
- **Doba čela  $T_1$**  – Je časový interval, jehož doba trvání je  $1/0,6$  násobek intervalu  $T$ , který naopak charakterizuje dobu, za kterou impulz dosáhne 30 % a 90 % vrcholové hodnoty napětí (impulz dosáhne bodů  $A$  a  $B$ ).



- **Doba půltýlu  $T_2$**  – Je vymezena časovým intervalem začínajícím v bodě zdánlivého počátku  $O_1$  a končícím v momentu poklesu napětí zkušebního impulzu na polovinu své hodnoty.



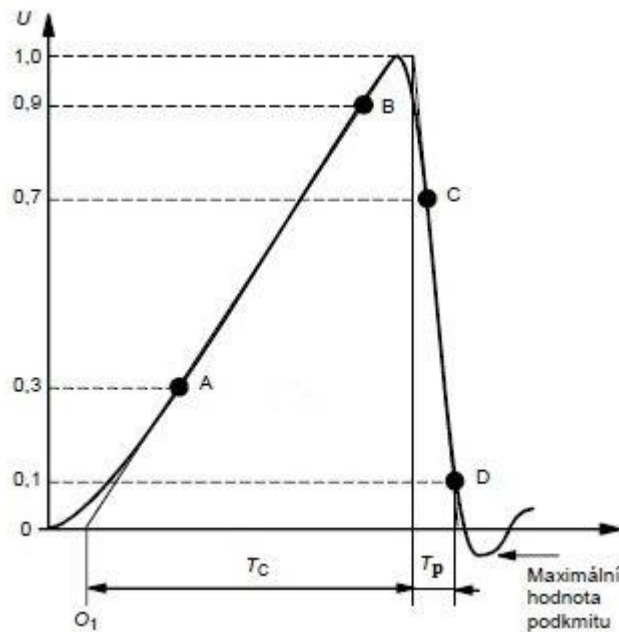
Obr. 2.1 Časový průběh plného atmosférického impulzu (převzato z [4])

Normalizovaný plný atmosférický impulz je obecně označován pouze jako impulz 1,2/50, což vyjadřuje dobu trvání 1,2  $\mu$ s čela impulzu  $T_1$  a dobu trvání 50  $\mu$ s půltýlu impulzu  $T_2$ . Ze zkušebních důvodů jsou pro tento impulz povoleny odchylky: [4]

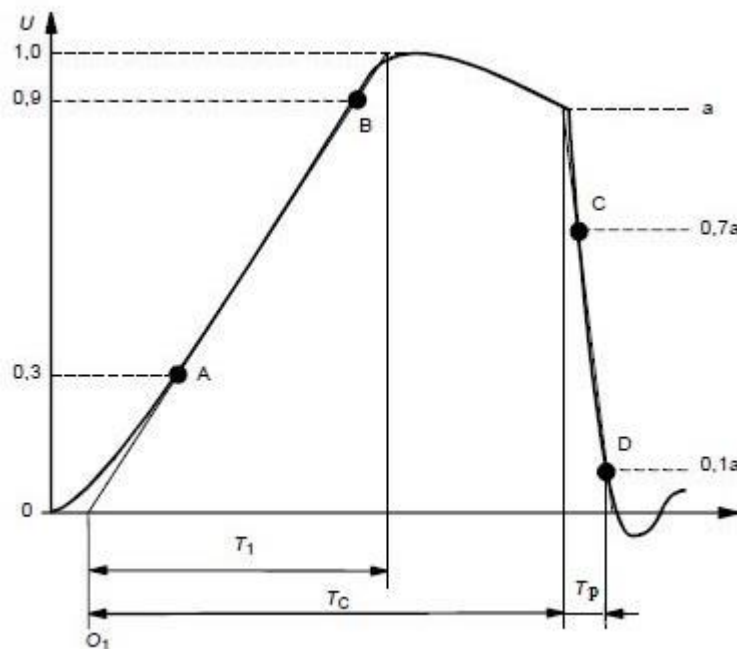
- Hodnota zkušební napětí:  $\pm 3 \%$
- Doba čela  $T_1$ :  $\pm 30 \%$
- Doba půltýlu  $T_2$ :  $\pm 20 \%$ .

V praxi však může dojít k případům, kdy je průběh atmosférického impulzu přerušen přeskokem či průrazem. V tomto okamžiku poklesne napětí vlny téměř na nulovou hodnotu a jedná se o tzv. useknutý atmosférický impulz. [4]

Useknutý atmosférický impulz lze rozdělit podle okamžiku zhroucení napětí na impulzní napětí useknuté v čele anebo useknuté v týle, oba tyto případy lze vidět na Obr. 2.2 a Obr. 2.3.



Obr. 2.2 Atmosférické impulzní napětí useknuté v čele (převzato z [4])



Obr. 2.3 Atmosférické impulzní napětí useknuté v týle (převzato z [4])

Časové průběhy atmosférického impulzního napětí useknutého v čele i v týle lze popsat podobným způsobem jako plný atmosférický impulz. U tohoto druhu impulzu se však uvádějí ještě další parametry: [2], [4]

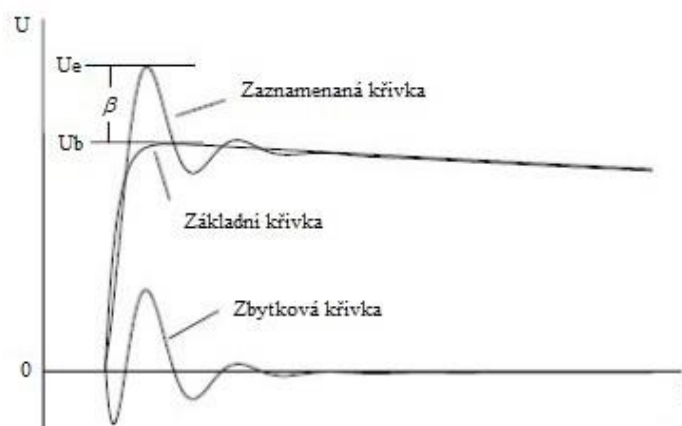
- **Doba do useknutí  $T_c$**  – Vypovídá o celkové délce trvání useknutého impulzu, kterou lze vymezit časovým intervalem, který začíná v bodě zdánlivého počátku  $O_I$  a končí v okamžiku useknutí.
- **Doba poklesu napětí  $T_p$**  – Odpovídá 1/0,6 násobku časového intervalu mezi body  $C$  a  $D$ . Přičemž bod  $C$  dosahuje hodnoty 70 % a bod  $D$  10 % napětí v části charakteristiky, ve které došlo ke zhroucení napětí.
- **Okamžik useknutí** – Nastává o  $0,3 T_p$  dříve než strmý pokles useknuté vlny v bodě  $C$ .

U zkoušek prováděných atmosférickým impulzem je též nezbytné uvést pojem překmit  $\beta$ , který podstatně ovlivňuje velikost průrazného napětí izolačních materiálů. Překmit totiž svými účinky tlumených oscilací, které jsou zapříčiněny indukčnostmi obvodu a zpravidla nabývají frekvence od 0,1 MHz do 2 MHz, způsobuje u impulzního napětí nárůst amplitudy.

Velikost překmitu lze získat vztahem:

$$\beta = U_e - U_b \quad (2.1)$$

kde  $U_e$  je krajní hodnota vyjadřující maximální hodnotu zaznamenané křivky (*recorded curve*) a  $U_b$  je maximální hodnota základní křivky (*base curve*), která představuje odhad plného atmosférického impulzu, který nevykazuje superponované oscilace. Tento rozdíl je uveden na Obr. 2.4 spolu s vynesenu zbytkovou křivkou (*residual curve*), která je dána rozdílem mezi zaznamenanou křivkou a základní křivkou. [4]



Obr. 2.4 Vyznačení překmitu pomocí základní a zaznamenané křivky (převzato z [4])

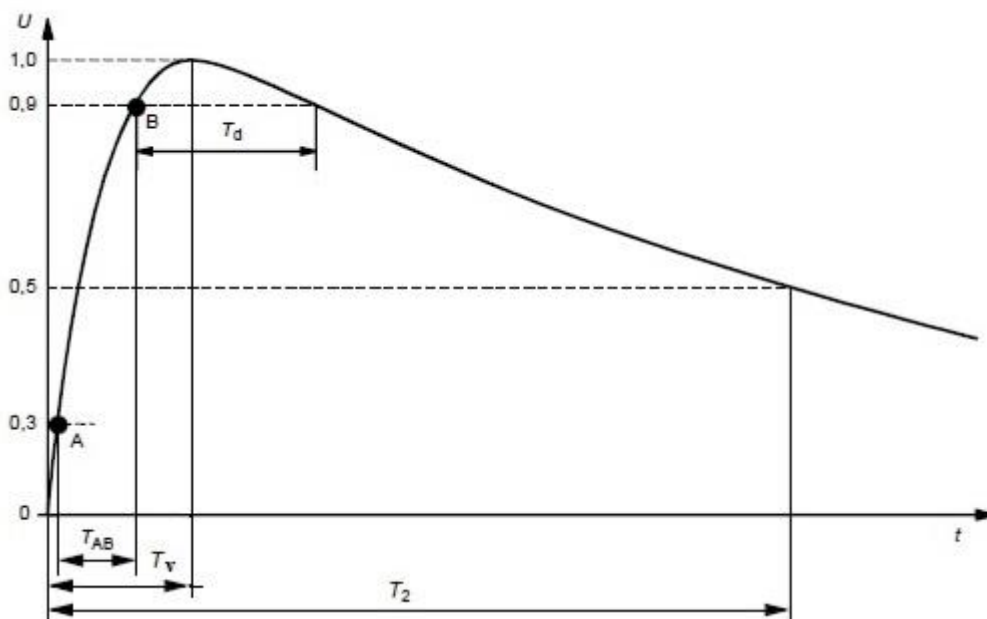
Velikost překmitu lze též vyjádřit procentuálně prostřednictvím veličiny známé jako relativní velikost překmitu  $\beta'$ , která se získá poměrem velikosti překmitu k maximální hodnotě. [4]

$$\beta' = \frac{U_e - U_b}{U_e} \cdot 100 \quad (2.2)$$

Problematikou vyhodnocování tvaru impulsu a impulzním napětím s překmitem obecně se v diplomové práci zabývám podrobněji v kap. 3.5.

## 2.2 Spínací impulzní napětí

Je normou ČSN EN 60060-1 definováno jako impulzní napětí s dobou do vrcholu  $T_v = 250 \mu\text{s}$  a dobou trvání půltýlu  $T_2 = 2500 \mu\text{s}$ , přičemž tyto doby odpovídají obecnému označení impulsu jako 250/2500. [4] Časový průběh normalizované spínací vlny je uveden na Obr. 2.5.



Obr. 2.5 Spínací impulzní napětí (převzato z [4])

Stejně jako v předcházejících případech lze časový průběh spínacího impulzního napětí popsat pomocí vhodných bodů a časových intervalů: [4]

- **Skutečný počátek O** – Bod, ve kterém křivka spínacího impulzního napětí začíná monotónně růst či klesat.

- **Doba do vrcholu  $T_v$**  – Je časovým intervalem potřebným pro dosažení maximální hodnoty napětí spínacího impulsu od skutečného počátku  $O$ .
- **Doba půltýlu  $T_2$**  – Je vymezený časový interval od skutečného počátku  $O$  do napětí spínacího impulsu, jehož hodnota klesne na polovinu své maximální hodnoty.
- **Doba nad 90 %  $T_d$**  – Úsek času, při němž spínací impuls přesahuje hodnotu 90 % maximálního napětí.

Též pro spínací impulzní napětí jsou normou akceptovány odchylky, které jsou: [4]

- Hodnota zkušební napětí:  $\pm 3 \%$
- Doba vrcholu  $T_v$ :  $\pm 20 \%$
- Doba půltýlu  $T_2$ :  $\pm 60 \%$

### 3 Zkoušky impulzním napětím

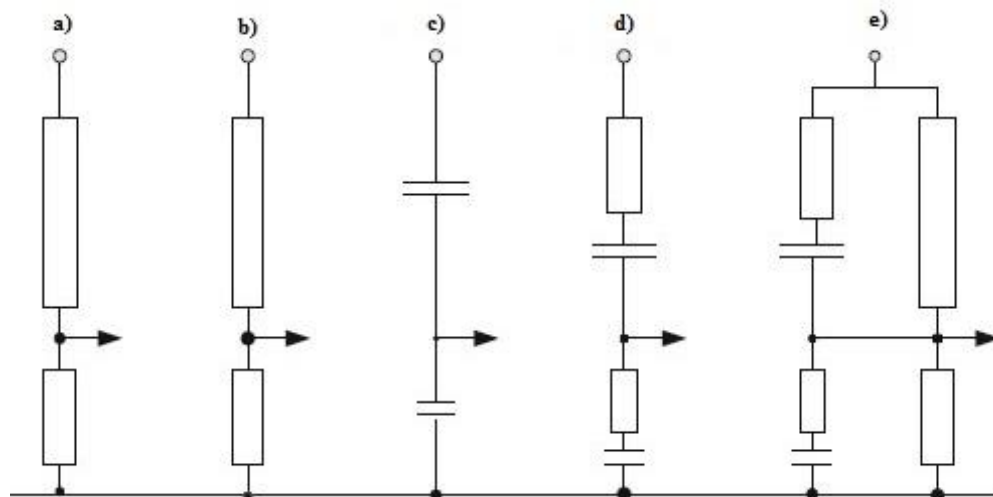
#### 3.1 Přehled požadavků na zkoušky impulzním napětím dané normou ČSN

Postup měření zkušebního napětí je uveden v normě ČSN 60060-1 a veškeré přístroje, včetně softwaru, pro provádění zkoušek vysokým napětím musí odpovídat normě IEC 60060-2:2010. [4], [5]

##### 3.1.1 Měření zkušebního napětí, proudu a určování tvaru impulsu

Měřicí systém pro provádění zkoušek vysokým napětím se obvykle skládá z následujících částí:

- **Převodní zařízení** - V sobě zahrnuje vodiče pro připojení převodního zařízení ke zkoušenému objektu a vodiče pro připojení k zemi. Umožňuje převádět měřenou veličinu na veličinu, která je kompatibilní s použitým měřicím přístrojem. Nejčastěji se jedná o napěťový dělič, a ve speciálnějších případech o napěťový transformátor, převodní impedanci napětí nebo sondu elektrického pole. Napěťové děliče pro různé druhy zkušebních napětí jsou uvedeny na Obr. 3.1. Při měření je též důležité, aby převodní zařízení bylo od blízkých uzemněných nebo napájených konstrukcí ve vhodné vzdálenosti, za účelem vyloučení tzv. blízkého efektu, který by mohl negativně ovlivnit výsledky měření. [5]



Obr. 3.1 a) vysokoodporový dělič pro stejnosměrné napětí, b) nízkoodporový dělič pro atmosférický impulz, c) kapacitní dělič pro střídavé napětí a atmosférický impulz, d) útlumový kapacitní dělič pro atmosférický impulz, spínací impulz, (střídavé napětí), e) univerzální dělič pro všechna napětí (převzato z [5])

- **Přenosový systém** - Slouží k připojení výstupních svorek přenosového zařízení ke vstupním svorkám měřicího přístroje. Nejčastěji se pro tyto účely používá koaxiální kabel se zakončovací impedancí, ale může se též použít optický kabel. Ve speciálních případech lze použít kabel se zesilujícími či útlumovými články. [5]
- **Měřicí přístroj** - Je vhodný pro měření potřebných parametrů zkušebního napětí z výstupního signálu přenosového systému. V dnešní době jsou analogové voltmetry nahrazovány digitálními voltmetry a ještě více nahrazovány digitálními rekordéry, které jsou schopny měřit jak průběhy zkušebních napětí, tak časové parametry. [5]

Zkoušený objekt musí být po celou dobu měření připojen do měřicího obvodu a tvar impulzu zkušebního napětí musí být kontrolován u každého zkoušeného objektu. V případech opakovaných měření prováděných za stejných podmínek, kdy se měří zkoušené objekty stejných konstrukčních a velikostních parametrů, se tvar impulzu ověřuje pouze jednou. [4]

Při vyhodnocování tvaru impulzu se u plného atmosférického impulzu zaznamenává vrcholová hodnota napětí. U useknutého atmosférického impulzu může nastat zhroucení napětí ve všech jeho částech, tedy v čele, vrcholu i týlu. V případech zhroucení napětí v čele je za křivku zkušebního napětí brána celá zaznamenaná křivka. Naopak impulzy useknuté v týle jsou považovány za plné vlny pro vyhodnocení zkušebního napětí a doby čela. [4]

Při měření zkušebního napětí může v některých případech docházet ke zplošťování vrcholu impulzu nebo k zaoblování napětí ještě před dosažením okamžiku, kdy dochází k celkovému zhroucení napětí. Takové případy mohou nastat při měření s určitým zkušebním uspořádáním, při měření určitých zkoušených objektů nebo tuto chybu může do daného měření zanést nevyhovující měřicí přístroj. Pokud je měření prováděno při takovýchto poměrech, je při určování parametrů useknutého impulzu vyžadován rychlý měřicí systém a využití obou ostrých nespojitostí. Zbylé situace jsou k vyřešení ponechány příslušné technické komisi. [4]

V průběhu zkoušek atmosférickým impulzem by měl být též měřen proud do zkoušeného objektu, přičemž jeho charakteristiky by měla stanovit příslušná technická komise. Avšak

pokud má proud dané zkoušky impulzním napětím sloužit za účelem porovnání, je důležitější samotný tvar impulzu měřeného proudu, než absolutní hodnota tohoto proudu. Vše co se týče zkoušek vysokým proudem je popsáno v mezinárodní normě **IEC 62475**. [4]

### **3.1.2 Zkušební postupy výdržným napětím**

Pro zkoušky atmosférickým impulzem jsou používány čtyři zkušební postupy: A, B, C a D. Výběr vhodného zkušebního postupu, z těchto čtyř možných, závisí na charakteru zkoušeného objektu a určuje jej příslušná technická komise. Postupy A, B a C se liší od posledního D tím, že u napětí, kterému je zkoušený objekt vystavován se stanovuje pouze výdržná hodnota. Naopak u zkušebního postupu D je nezbytné využít několika napěťových hladin. [4]

#### **Postup A**

Při provádění atmosférických impulzních zkoušek tohoto typu je zkoušený objekt vystavován celkově třem impulzům. Tyto impulzy mají předem definovaný tvar a polaritu na stanovené hladině výdržného napětí. Zkoušený objekt vyhoví stanoveným požadavkům zkoušky, pokud nedojde na zkoušeném objektu k žádnému defektu. Postup výdržným napětím typu A je vhodný pro zkoušky izolačních systémů, u kterých nedochází k opětovné regeneraci izolačního média, ale dochází k destruktivním účinkům. [4]

#### **Postup B**

Při tomto zkušebním postupu je zkoušený objekt vystaven patnácti impulzům předem stanovené hladiny s předem určeným tvarem a polaritou výdržného napětí. Postup B je vhodný pro testování samočinně obnovujících se i samočinně neobnovujících se izolací. Zkoušený objekt úspěšně vyhoví zkoušce v případě, že v části samočinně se obnovující izolace objektu, z celkového množství patnácti impulzů, dojde nanejvýš ke dvěma průrazným výbojům, a naopak v části samočinně se neobnovující izolace nesmí být příslušnými detekčními metodami diagnostikována porucha žádná. [4]

U zkoušek samočinně se neobnovujících izolací je možné jako indikaci, že v samočinně se neobnovující izolaci nedošlo k průrazu použít pravidlo, že zkoušený objekt vyhověl zkoušce, pokud žádný z posledních třech impulzů z celkového množství nezpůsobil průrazný



výboj. Pokud však v jednom z posledních třech impulzů došlo právě k jednomu průraznému výboji, tak zkoušený objekt může být vystaven dalším třem impulzům (dohromady 18). Neobjeví-li se v tomto případě žádný další výboj, tak zkoušený objekt úspěšně prošel zkouškou. [4]

### Postup C

Je opět vhodný jak pro samočinně obnovující se izolace, tak pro samočinně neobnovující se. V obou případech se na zkoušený objekt přikládají tři impulzy. Pokud nedojde k žádnému průraznému výboji, tak zkoušený objekt zkouškou prošel. Pokud během zkoušky dojde v části samočinně se obnovující izolace k nanejvýš jednomu průraznému výboji, následuje dalších devět impulzů. Pokud v žádném z těchto devíti impulzů již nedojde k průraznému výboji, tak zkoušený objekt vyhověl zkoušce. [4]

### Postup D

Pomocí tohoto postupu lze při zkouškách samočinně obnovujících se izolací vyhodnotit 10% a 50% napětí průrazného výboje, obecně označované jako  $U_{10}$  a  $U_{50}$ . Napětí  $U_{10}$  lze získat použitím statistických zkušebních postupů. Obě tato napětí  $U_{10}$  a  $U_{50}$  lze vyhodnotit přímo. Napětí  $U_{10}$  lze ještě získat nepřímou cestou z napětí  $U_{50}$  pomocí vztahu: [4]

$$U_{10} = U_{50} \cdot (1 - 1,3s) \quad (3.1)$$

kde  $s$  značí směrodatnou odchylku napětí průrazného výboje a její přesnou hodnotu určuje příslušná technická komise. Pokud je však zkouška prováděna za sucha a jedná se o testování vzdušného izolantu bez jakékoli jiné izolace, lze směrodatné odchylce  $s$  přiřadit hodnotu 0,03. [4]

Zkoušený objekt úspěšně projde zkouškou, pokud napětí  $U_{10}$  není menší než stanovené výdržné impulzní napětí. Pro vyhodnocení tohoto napětí lze použít metody nahoru-dolů s celkem 7 impulzy na skupinu a alespoň 8 platnými skupinami. [4]

Naopak pro vyhodnocení napětí  $U_{50}$  lze použít metody více hladin i metody nahoru-dolů. U metody více hladin se používá počet hladin 4 a více s celkovým počtem impulzů na hladinu

10 a více. U metody nahoru-dolů se využívá jednoho impulzu na skupinu s počtem přiložených platných napětí 20 a více. [4]

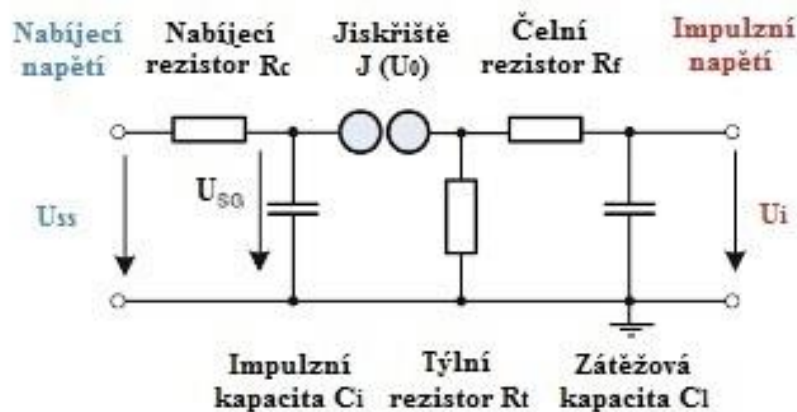
Avšak pro všechny případy platí, že napěťový rozdíl mezi jednotlivými hladinami  $\Delta U$  by se měl pohybovat v rozmezí 1,5 % - 3 % odhadnuté hodnoty napětí  $U_{50}$ . [4] Principy výše zmíněných zkoušek více hladinami a nahoru-dolů jsou v této diplomové práci popsány v kap. 3.4, doplněny o metodu postupným namáháním.

## 3.2 Generátory impulzního napětí

Jsou elektrická zařízení, která se používají pro simulace impulzních přepětí, jejichž účinkům jsou jiná elektrická zařízení vystavována. Pomocí těchto generátorů lze zkoumat chování různých elektrických systémů při působení atmosférických či spínacích jevů. V závislosti na velikosti požadovaného napětí lze generátory dělit na jednostupňové a vícešupňové.

### 3.2.1 Základní RC generátor

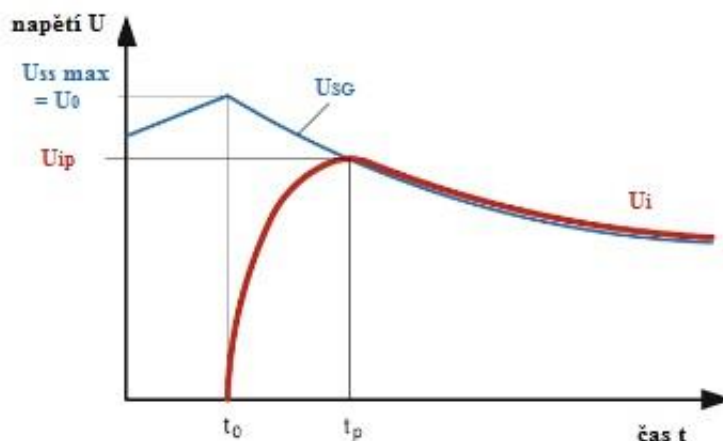
Funkci základního RC rázového generátoru pro vytváření impulzního napětí lze popsat ekvivalentním obvodem, který je uvedený na Obr. 3.2.



Obr. 3.2 Ekvivalentní obvod základního RC generátoru (převzato z [5])

V prvním kroku dochází k nabíjení hlavní impulzní kapacity  $C_i$  přes nabíjecí rezistor  $R_c$  ze zdroje stejnosměrného napětí  $U_{ss}$ . Po nabití kondenzátoru  $C_i$ , jenž je nabit na hodnotu napětí  $U_0$ , dochází na jiskřišti  $J$  k přeskoku, čímž je následně generován napěťový impulz. Po přeskoku na jiskřišti dochází k nabíjení zatěžovací kapacity  $C_l$  přes čelní rezistor  $R_f$ , jehož velikost určuje dobu trvání čela impulzního napětí. Ve stejný okamžik dochází k vybíjení

impulzní kapacity  $C_i$  přes týlní odpor  $R_t$ , jehož hodnota naopak ovlivňuje dobu trvání půltýlu impulzního napětí. Superpozicí obou těchto procesů dochází k tvorbě nového napětí  $U_i$ , jehož maximální hodnota amplitudy  $U_{ip}$  je nižší než amplituda původního napětí  $U_0$ , které bylo vygenerováno přeskokem na jiskřišti. [5]



Obr. 3.3 Průběh generace impulzního napětí (převzato z [5])

Pokud se obě napětí dají do vzájemného poměru, získá se účinnosti  $\eta$  základního RC generátoru. [5]

$$\eta = \frac{U_{ip}}{U_0}; \quad \eta = \eta_s \cdot \eta_c \quad (3.2)$$

Účinnost  $\eta$  může být též vyjádřena jako součin účinnosti  $\eta_s$ , jenž je určena tvarem vygenerovaného impulsu a účinnosti  $\eta_c$ , která je charakterizována parametry obvodu rázového generátoru. Účinnost  $\eta_s$  je závislá na vztahu mezi dobou trvání čela a dobou trvání půltýlu vlny impulzního napětí. Z toho vyplývá, že účinnost generátoru se poměrně značně liší, pokud generátor generuje atmosférické impulzní napětí anebo spínací impulzní napětí. Při generování normalizovaného atmosférického impulzního napětí s poměrem doby trvání čela a půltýlu vlny 1,2/50  $\mu\text{s}$  je účinnost  $\eta_s$  vyšší než v případě generování spínacího impulzního napětí, které má poměr trvání čela a půltýlu vlny 250/2500  $\mu\text{s}$ . Naopak účinnost  $\eta_c$  je závislá na velikostech kapacit  $C_i$  a  $C_l$ . Pokud je nabíjecí kapacita  $C_i$  vyšší ve srovnání se zatěžovací kapacitou  $C_l$ , je účinnost  $\eta_c$  též vyšší, než kdyby tyto kapacity byly v obráceném poměru. Co se týče celkové účinnosti základního rázového RC generátoru, tak se pro atmosférický impuls pohybuje v rozmezí  $\eta \approx 0,85 - 0,95$  a pro spínací impuls  $\eta \approx 0,70 - 0,80$ . [5]

Pokud se dá hodnota hlavní kapacity  $C_i$  do společného vztahu spolu s maximálním nabíjecím napětím  $U_{0max}$ , získáme vztah pro maximální akumulovanou energii  $W_i$  daného rázového generátoru RC. [5]

$$W_i = \frac{1}{2} \cdot C_i \cdot U_{0max}^2 \quad (3.3)$$

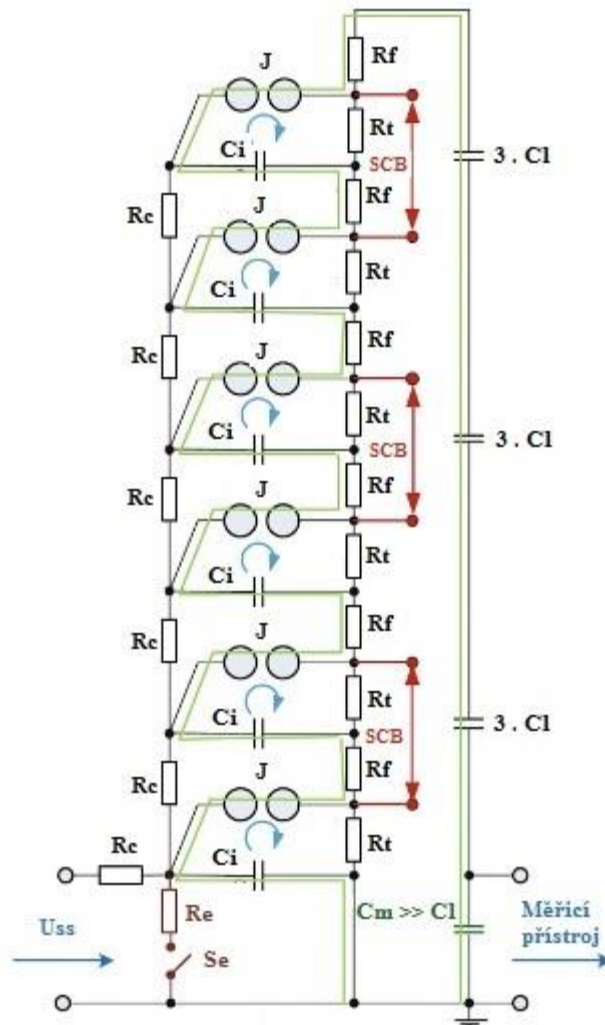
Zatímco maximální nabíjecí napětí  $U_{0max}$  závisí na velikosti požadovaného zkušebnímu napětí, tak velikost impulzní kapacity  $C_i$  musí být zvolena s ohledem na předpokládané celkové zatížení, které zahrnuje zatížení samotným rázovým generátorem a testovaným objektem. Aby tedy bylo dosaženo maximálního nabíjecího napětí, musí mezi nabíjecí a zátěžovou kapacitou platit následující vztah: [5]

$$C_i \gg C_l \quad (3.4)$$

### 3.2.2 Vícestupňový generátor

Zatímco je základní RC rázový generátor obvykle používán pro napětí do 200 kV, tak vícestupňový rázový generátor, který byl navrhnout v roce 1923 německým inženýrem Erwinem Otto Marxem, se používá pro generování rázových impulzů vyššího napětí.[5]

Princip funkce generování rázových impulzů generátorem lze opět demonstrovat na ekvivalentním schématu, které je znázorněno na Obr. 3.4. [5]



Obr. 3.4 Ekvivalentní obvod šestistupňového rázového generátoru (převzato z [5])

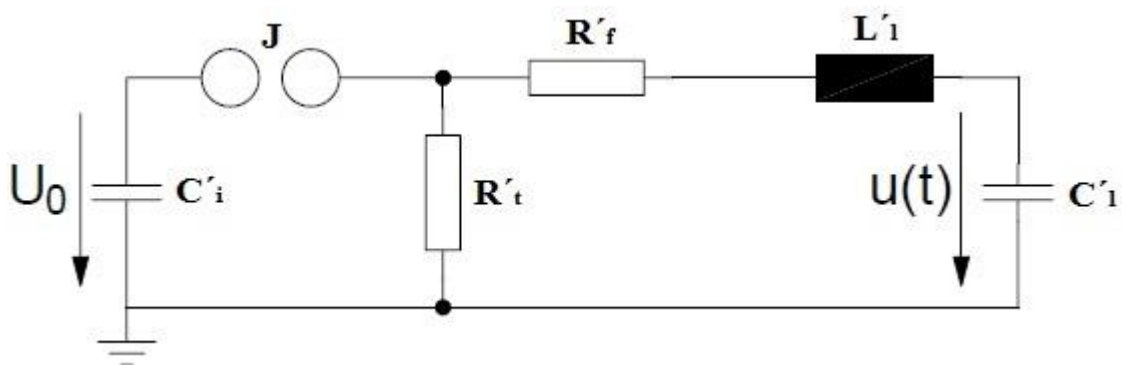
V první řadě dojde k nabití impulzních kondenzátorů  $C_i$  všech  $n$  stupňů rázového generátoru ze zdroje stejnosměrného napětí  $U_{ss}$  přes sériově spojené nabíjecí rezistory  $R_c$ . Odpor rezistoru vyššího stupně je zpravidla několikanásobně vyšší než odpor nižšího stupně, přesto jsou nabíjecí kondenzátory vždy nabitý rovnoměrně důsledkem zvolené dostatečně dlouhé doby nabíjení. První tzv. spouštěcí jiskřiště je opatřeno speciální elektrodou, na kterou se přivede prvotní impulz o velikosti 5 – 20 % výdržného napětí netrigovaného spouštěcího jiskřiště. V tomto intervalu výdržného napětí vyvolá přivedený trigovací impulz vybíjení všech stupňů generátoru do tvarovacího obvodu. Spouštěcí trigovací impulz nejdříve způsobí přeskok na prvním jiskřišti, čímž se do série spojí první dva kondenzátory  $C_i$  a tím se na druhém jiskřišti docílí dvojnásobného rozdílu potenciálů, který na něm způsobí přeskok. Tento proces se následně opakuje ve všech stupních generátoru. Přeskoky na jiskřištích způsobují vybíjení impulzních kondenzátorů  $C_i$  přes čelní rezistory  $R_f$ , jejichž velikost odporu opět určuje dobu trvání čela rázového impulzu. Ve stejný okamžik je přes toto sériové spojení

všech impulzních kondenzátorů  $C_i$  a čelních rezistorů  $R_f$  nabíjena vnější zatěžovací kapacita  $C_l$ . Rezistory  $R_t$ , jejichž velikost odporu bývá mnohonásobně vyšší než čelních odporů  $R_f$ , určují naopak tvar týlní části generovaného impulsu. Velikost impulzního napětí  $U_{in}$ , jež je generované  $n$  stupňovým generátorem s faktorem účinnosti  $\eta$  lze následně určit vztahem: [5]

$$U_{in} = n \cdot \eta \cdot U_{ss} \quad (3.5)$$

Přičemž pro výpočet každého výstupního impulzního napětí, jenž má námi požadovaný tvar, je vždy nezbytné znát přesnou hodnotu faktoru účinnosti. [5]

Při určování hodnot jednotlivých odporů a kondenzátorů vícestupňového generátoru o počtu stupňů  $n$ , se obvykle vychází z ekvivalentního obvodu pro jednostupňový rázový generátor (Obr. 3.5). Hodnoty odporů a kapacit ekvivalentního jednostupňového generátoru lze získat vztahy 3.6 – 3.9: [5]



Obr. 3.5 Ekvivalentní obvod vícestupňového rázového generátoru (převzato z [6])

- $C'_i$  – ekvivalentní impulzní kondenzátor
- $R'_f$  – ekvivalentní čelní rezistor
- $R'_t$  – ekvivalentní týlní rezistor
- $R_{ext}$  – externí rezistor (viz kap. 5)
- $C'_l$  – zatěžovací kapacita (testovaný objekt + dělič + parazitní kapacita)
- $L'_l$  – indukčnost testovacího obvodu

$$R'_f = n \cdot R_f + R_{ext} \quad (3.6)$$

$$R'_t = n \cdot R_t \quad (3.7)$$

$$C'_i = \frac{C_i}{n} \quad (3.8)$$

$$C'_l = C_l \quad (3.9)$$

Z definovaných prvků ekvivalentního obvodu je nyní též možné zjistit přibližnou hodnotu faktoru účinnosti  $\eta$ . [6]

$$\eta \approx \frac{C'_i}{C'_i + C'_l} \quad (3.10)$$

Hodnoty prvků zkušební obvodu určují konečný tvar generovaného zkušební impulzního napětí, které je dáno rozdílem dvou exponenciálních průběhů s časovými konstantami  $\tau_1$  a  $\tau_2$ . [6]

$$u(t) = \frac{U_0}{R'_f \cdot C'_l} \cdot \frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \cdot \left[ e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right] \quad (3.11)$$

S využitím jednoduché aproximace:

$$R'_t \cdot C'_i \gg R'_f \cdot C'_l \quad (3.12)$$

je možné získat hodnoty časových konstant  $\tau_1$  a  $\tau_2$ . [6]

$$\tau_1 \approx R'_f \cdot \frac{C'_i \cdot C'_l}{C'_i + C'_l} \quad (3.13)$$

$$\tau_2 \approx R'_t \cdot (C'_i + C'_l) \quad (3.14)$$

Dobu trvání čela  $T_1$  a dobu trvání pultýlu  $T_2$  pro atmosférická a spínací impulzní napětí lze následně určit součinem časových konstant  $\tau_1$  a  $\tau_2$  a konstant  $K_1$  a  $K_2$ . Hodnoty konstant  $K_1$  a  $K_2$  pro atmosférická impulzní napětí a spínací impulzní napětí jsou přesně definovány normou a jsou uvedeny v Tab. 3.1. [6]

$$T_1 = K_1 \cdot \tau_1 \quad (3.15)$$

$$T_2 = K_2 \cdot \tau_2 \quad (3.16)$$

Tab. 3.1 Hodnoty konstant  $K_1$  a  $K_2$ 

	1,2/50 $\mu\text{s}$	250/2500 $\mu\text{s}$
<b><math>K_1</math></b>	2,96	2,41
<b><math>K_2</math></b>	0,73	0,87

Velikost odporu ekvivalentního čelního rezistoru  $R'_f$  musí být vhodně zvolena s ohledem na hodnotu zatěžovací kapacity  $C'_l$  a je možné ji zjistit s využitím předchozích vztahů (3.13) a (3.15) pro konstanty  $\tau_l$  a  $K_1$ : [6]

$$R'_f \approx \frac{T_1}{K_1} \cdot \frac{C'_i + C'_l}{C'_i \cdot C'_l} \quad (3.17)$$

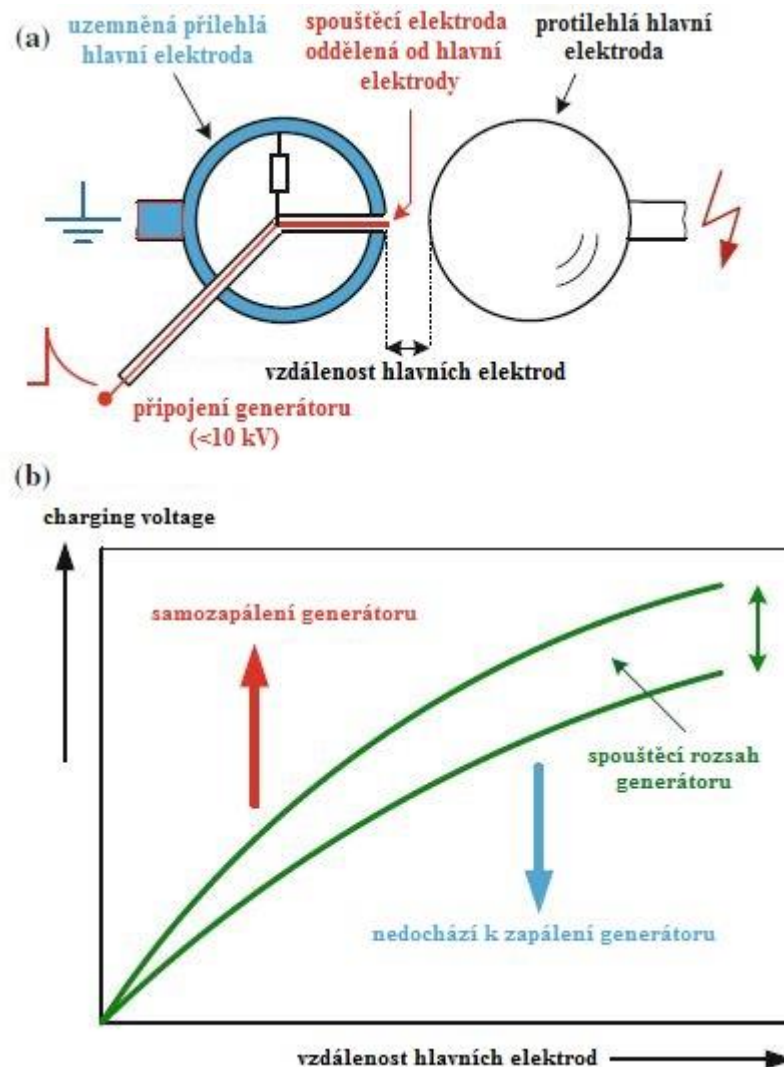
Naopak přibližnou velikost ekvivalentního týlního rezistoru  $R'_t$  lze určit pomocí relací (3.14) a (3.16) pro konstanty  $\tau_2$  a  $K_2$ . [6]

$$R'_t \approx \frac{T_2}{K_2} \cdot \frac{1}{C'_i + C'_l} \quad (3.18)$$

Známkou kvalitního vícestupňového generátoru je jeho kontrolované a bezpečné spouštění. Ve většině případů je pouze nejnižší stupeň rázového generátoru opatřen spínačem typu trigatron, který je složen ze tří elektrod, přičemž první elektroda je pomocná ovládací a zbylé dvě elektrody jsou určeny pro vedení proudu (Obr. 3.6 a). Účelem trigatronu je vygenerovat napěťový impuls, který způsobí spouštěcí výboj na prvním spouštěcím jiskřišti. Velikost zapalovacího napětí závisí na druhu izolačního média a na vzájemné vzdálenosti hlavních elektrod. Po přivedení spouštěcího impulsu o velikosti několika kilovoltů na řídicí elektrodu dochází k ionizaci prostředí mezi katodou a ovládací elektrodou, tím vzniká výboj vytvářející ultrafialové záření. Ultrafialovým zářením se dále generují volné fotony, které na spouštěcím jiskřišti zajišťují vhodné podmínky k přeskoku. Aby k popsánému ději došlo, je



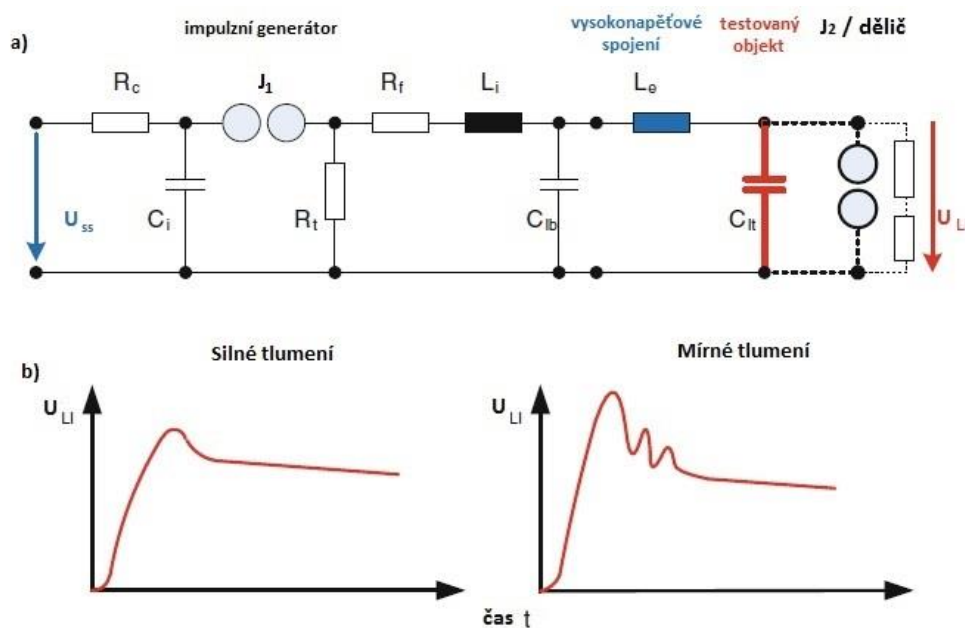
třeba na spouštěcí jiskřiště přivést určité minimální spouštěcí napětí, které udává spodní hranici spouštěcí charakteristiky generátoru (Obr. 3.6 b). Horní hranici spouštěcí charakteristiky naopak vymezuje vysoké napětí, po jehož přivedení na spouštěcí jiskřiště dochází k tzv. samozapálení generátoru a k jevu dojde bez kontrolovaného spouštění. Rozsah mezi spodní a horní hranicí charakteristiky by měl být co možná největší, z důvodu aby spouštění generátoru bylo co nejbezpečnější, a aby se zabránilo jeho samozapálení bez spouštění. Jak je již zmíněno ve třetím odstavci této kapitoly, rozsah spodní a horní hranice spouštěcího impulsu by se měl pohybovat v rozmezí 5 až 20 % výdržného napětí netrigovaného jiskřiště. [5]



Obr. 3.6 a) Schéma spouštěcího jiskřiště víceúrovňového generátoru b) Spouštěcí charakteristika víceúrovňového generátoru (převzato z [5])

### 3.3 Faktory ovlivňující tvar zkušební napětí

Rázové generátory popsané v kap. 3.2.1 a 3.2.2 jsou uvažovány jako ideální obvody, které nerespektují vliv indukčností způsobujících vznik tlumených oscilací, jež se superponují na aperiodické průběhy generovaných impulzních napětí z rázových generátorů. Míra, s jakou jsou oscilace tlumeny, závisí na velikosti čelního odporu rázového generátoru. Při generování atmosférického impulzu může dokonce docházet ke vzniku překmitů, jelikož rázové generátory pro generování těchto impulzů jsou vybaveny čelními rezistory o velikosti odporu pouze několika desítek ohmů (Obr. 3.7). [5]



Obr. 3.7 Vliv indukčností v testovacím obvodu: **a)** Ekvivalentní schéma testovacího obvodu s indukčnostmi **b)** Superponovaný překmit na atmosférický impulz (převzato z [5])

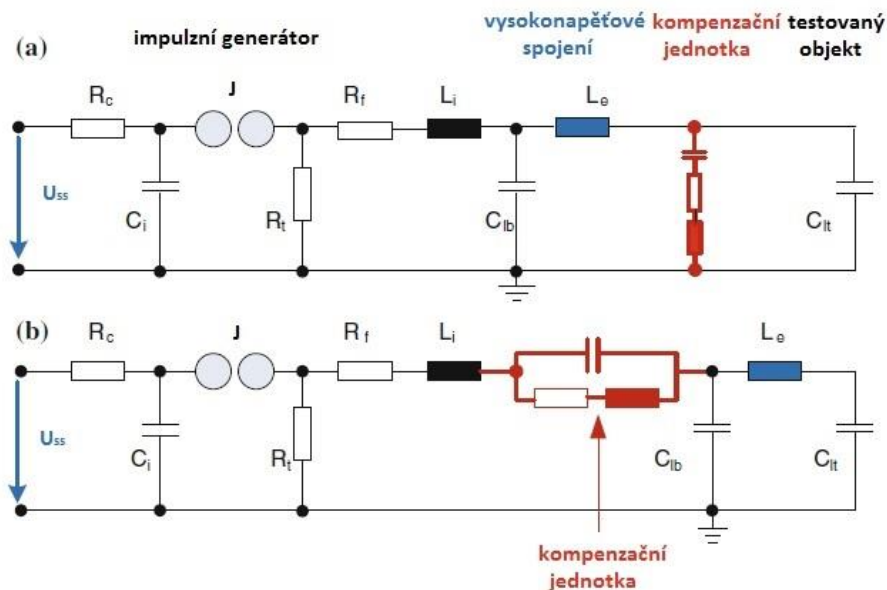
Na Obr. 3.7 je zobrazen schématický obvod pro zkoušky vysokým napětím. V obvodu se může vliv indukčností projevit přímo v generátoru, tyto **indukčnosti** můžeme označit jako **vnitřní**, anebo v testovacím objektu, **vnější indukčnosti**. [5]

**Vnitřní indukčnosti  $L_i$**  – Zahrnují parazitní indukčnosti všech kondenzátorů, odporů a vodičů, kterými jsou tyto prvky uvnitř rázového generátoru spojeny. Kvalitní rázové generátory s dostatečnou kompaktní konstrukcí mají velikost indukčnosti menší než  $4 \mu\text{H}$  vztahenou na jeden stupeň generátoru. Dosažení tohoto kritéria vyžaduje takovou konstrukci generátoru, aby smyčka obvodu byla co nejkratší (uvažovaná smyčka je znázorněna např. na Obr. 3.4 zelenou barvou). Vnitřní indukčnosti dané konstrukcí generátoru mohou být

uživatelé ovlivněny pouze stěží. Možností však je, stačí-li pouze část stupňů rázového generátoru k vytvoření potřebného zkušebního napětí, vyřadit nepotřebnou část generátoru se základní zátěží, tím se zkrátí smyčka obvodu a sníží se vliv vnitřní indukčnosti. Druhou možností, jak docílit nižší indukčnosti je použít speciálně konstruované čelní odpory. Lze použít odpory s dvojitým vinutím. Tato vinutí jsou izolovaně navinuta na laminátové tubě v opačném směru, tudíž magnetická pole, která se kolem obou vinutí při průchodu proudem tvoří, jsou též opačného směru a to vede k jejich vzájemné kompenzaci. Dále lze použít odporovou pásku, jejíž princip spočívá ve vzájemně izolovaných odporových drátcích, které jsou vtaženy do speciální tkaniny, nebo použitím více paralelně zapojených rezistorů místo jednoho čelního rezistoru. [5]

**Vnější indukčnosti  $L_e$**  – Zahrnují parazitní indukčnosti testovaného objektu, vodičů spojující rázový generátor s testovaným objektem, napěťovými děliči a vodiče pro připojení celého systému k zemi. Délka těchto spojení by měla být co možná nejkratší a ve většině případů to lze ovlivnit. Avšak platí, že čím vyšší je testovací napětí atmosférického impulzu, tím je i delší vzdálenost mezi generátorem a testovaným objektem. Proto např. u zkoušek ultra vysokým napětím vznik oscilací a překmitů superponovaných na zkušebním impulzu nelze dobře kontrolovat. Další redukce indukčnosti lze dosáhnout např. použitím měděné fólie o šířce vyšší než 10 cm namísto obyčejných vodičů, použitím výše zmíněných odporových pásek nebo tlumících odporů připojených k testovanému objektu. [5]

**Kompenzace překmitu** – Může být dosažena použitím filtrů kombinace L/C/R dolní propusti, jež může být přímo součástí rázového generátoru nebo může být řešena jako samostatná část testovacího obvodu. Tato kompenzační jednotka může být řešena v sériovém nebo paralelním zapojení (Obr. 3.8). [5]



Obr. 3.8 Ekvivalentní schéma testovacího obvodu s indukčnostmi a kompenzačními jednotkami překmitu **a**) Paralelní kompenzační jednotka **b**) Sériová kompenzační jednotka (převzato z [5])

Ne vždy však platí, že testovaný objekt musí být nutně pouze induktivního charakteru. Velké množství objektů, jako jsou např. izolátory, GIS nebo vzorky kabelů, představují pro testovací systém naopak zátěž kapacitního typu. Způsob, jakým ovlivňuje kapacitní zátěž tvar generovaného zkušebního napětí lze demonstrovat na ekvivalentním schématu jednostupňového rázového generátoru (Obr. 3.2). [5]

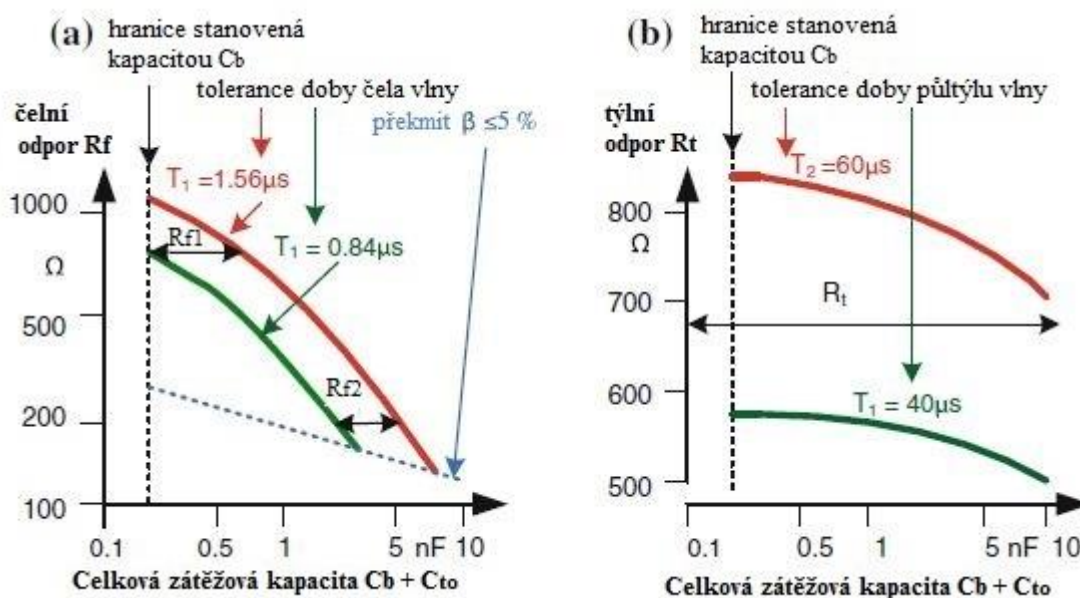
Kapacitní zátěž  $C_l$ , která zpravidla zahrnuje základní zátěžovou kapacitu generátoru  $C_b$  a kapacitu testovaného objektu  $C_{to}$ , do značné míry ovlivňuje časovou konstantu doby trvání čela vlny  $\tau_1$ , časovou konstantu doby trvání pultýlu vlny  $\tau_2$  a účinnost obvodu rázového generátoru  $\eta_c$ . [5]

$$\tau_1 = R_f \cdot \left( \frac{C_i \cdot (C_b + C_{to})}{C_b + C_{to} + C_i} \right) \quad (3.19)$$

$$\tau_2 = R_t \cdot (C_i + C_b + C_{to}) \quad (3.20)$$

$$\eta_c \approx \frac{C_i}{C_i + C_b + C_{to}} \quad (3.21)$$

Z rovnice (3.19) je patrné, že doba trvání čela  $T_f$ , která je charakterizována časovou konstantou  $\tau_f$ , velmi závisí na velikosti kapacity testovaného objektu, jelikož obvykle platí poměry  $C_i \gg C_b + C_{to}$  a  $C_{to} > C_b$ . V některých případech může nastat dokonce okamžik, kdy se doba trvání čela téměř zdvojnásobí. Za účelem vyvarování se této eventualitě, je nutné vhodným způsobem upravit velikost čelního odporu  $R_f$ . [5]



Obr. 3.9 Vliv zátěžové kapacity demonstrován na desetistupňovém generátoru 2 000 kV/400 kJ  
 a) Princip volby vhodného čelního rezistoru; b) Volba vhodného rezistoru pro pŕltýl vlny  
 (převzato z [5])

Normou povolená šířka pásma, ve kterém se doba trvání čela pro zkušební napětí může pohybovat, je 0,84 - 1,56  $\mu$ s. S ohledem na tuto toleranci je následně možné vypočítat vhodnou velikost odporu  $R_f$ , za účelem získání pevné hodnoty  $\tau_f$ , resp.  $T_f$ . (Obr. 3.9 a). Horní vodorovná čára ve výsledném pásmu představuje rozsah zatížení, pro který k dosažení standardního atmosférického impulzu může být použitý odpor  $R_{f1}$ . Pokud je systém zatížen vyšší kapacitní zátěží, je nutné volit menší odpor  $R_{f2}$ . Pokud se však pro tyto účely zvolí příliš malý čelní odpor, tak se na generovaném zkušebním napětí objeví nežádoucí překmit. [5]

Aby bylo možné používat rázové generátory pro co možná nejvíce různých kapacitních zátěží, tak jsou čelní rezistory generátorů řešeny v několika sadách, které je možno přepínat buď do sériového, nebo paralelního zapojení. [5]

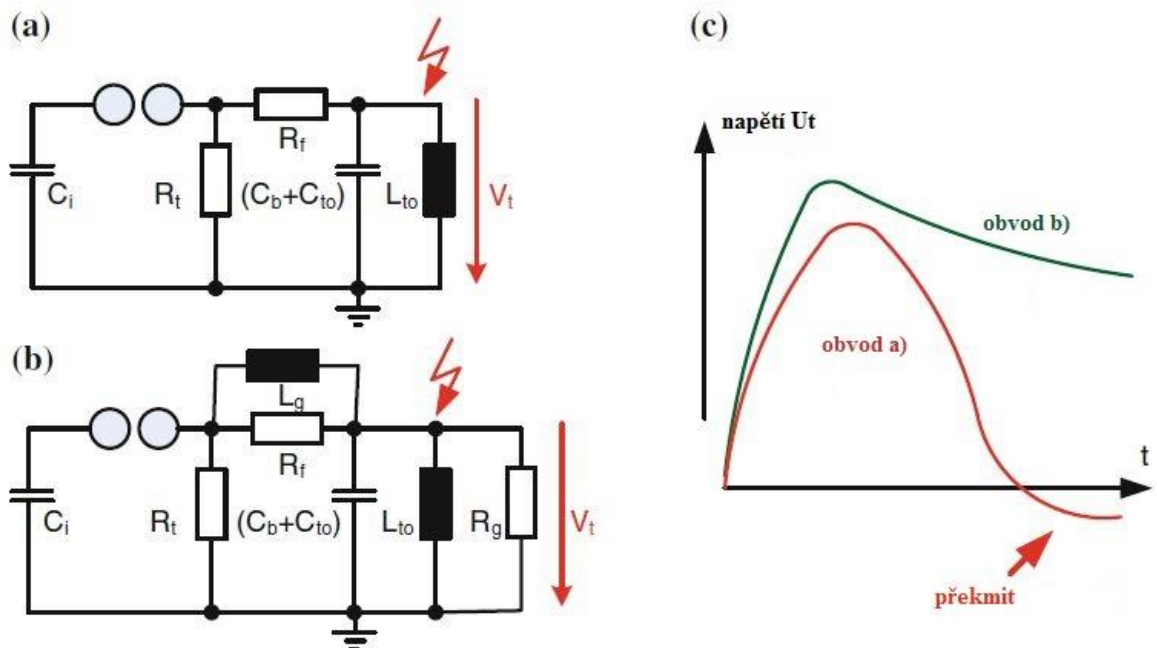
Doba trvání pŕltýlu  $T_l$  generované zkušební vlny, která je charakterizována časovou konstantou  $\tau_l$  a rovnicí (3.20), není ovlivněna tak výrazně, jako doba trvání čela, jelikož

v tomto případě převládá impulzní kapacita  $C_i$ . Z Obr. 3.9 b) je patrné, že pro pokrytí celého tolerančního pásma od 40 – 60  $\mu\text{s}$  doby trvání půltýlu vlny stačí použít pouze jeden vhodně zvolený rezistor. [5]

Co se týče účinnosti obvodu rázového generátoru, tak tu lze snadno vypočítat pomocí vztahu (3.21) a obvykle dosahuje hodnoty 95 % pro  $C_i \gg C_{to}$ . [5]

Testovaný objekt však může pro testovací systém představovat i induktivní zátěž v kombinaci s kapacitní. Takový případ je znázorněn na Obr. 3.10 a), a může nastat např. při testování výkonového transformátoru na straně nižšího napětí. Účinek indukčnosti  $L_{to}$  spolu s účinkem kapacity  $C_i$  mohou vyvolat oscilace v části půltýlu generované vlny, přičemž tyto oscilace následně zkracují celkový čas doby trvání půltýlu vlny  $T_2$  mimo toleranční pásmo a mohou způsobit překmit do záporné polaroty napětí (Obr. 3.10 c). Tento jev se zvláště projevuje v případě, kdy se hodnota impulzní kapacity  $C_i$  snižuje. Proto je nezbytné kapacitu  $C_i$  zvýšit, což je možné např. paralelním zapojením několika stupňů vícestupňového rázového generátoru nebo použitím tzv. Glammingerova článku, jehož princip je založený na paralelním zapojení indukčnosti  $L_g$  k čelnímu rezistoru  $R_f$  a paralelnímu zapojení rezistoru  $R_g$  k indukčnosti testovaného objektu  $L_{to}$  (Obr. 3.10 b). Přičemž velikost  $L_g$  by se měla pohybovat v rozmezí  $L_g = (0,01 - 0,1) \cdot L_{to}$  a velikost odporu  $R_g$  lze odhadnout následovně: [5]

$$R_g \approx R_f \cdot \frac{L_{to}}{L_g} \quad (3.22)$$



Obr. 3.10 Vliv indukčnosti v kombinaci s kapacitou na generování zkušebního atmosférického impulzu a) ekvivalentní obvod b) ekvivalentní obvod s Glammingerovým článkem c) srovnání tvarů vln zkušebních atmosférických impulzů (převzato z [5])

### 3.4 Druhy zkoušek impulzním napětím

Elektrické výboje a průrazy elektrických izolací jsou obecně stochastické procesy a proto tyto jevy musí být popsány vhodnou statistickou metodou. Následující podkapitoly popisují přípravnou etapu, princip provádění a vyhodnocování používaných druhů vysokonapěťových zkoušek založených na statistické platformě. Jsou zde popsány testy, které využívají principu vícenásobné aplikace předem stanovených napětí s následným odhadem pravděpodobnosti průrazného výboje v izolaci – **metoda více hladinami** a **metoda nahoru – dolů**. Dále je zde popsána zkouška využívající postupného nárůstu napětí až do okamžiku průrazného výboje v izolaci – **metoda postupného namáhání**. [5]

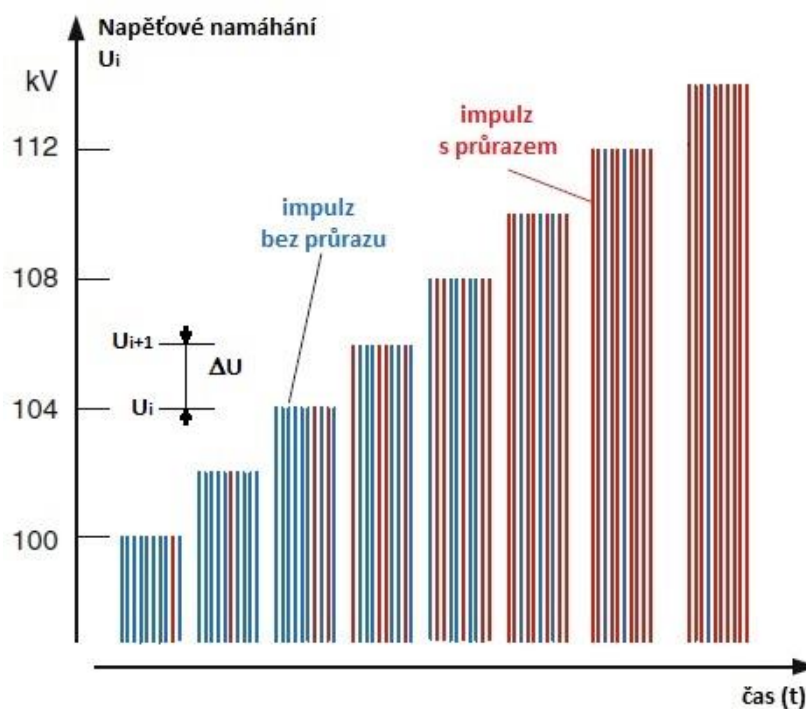
Výše zmíněné metody testování odolnosti proti impulznímu napětí různých druhů izolací jsou podrobně popsány v technické normě **ČSN EN 60060-1**, která přesně definuje postupy provádění a statistické vyhodnocení zkoušek.

#### 3.4.1 Zkouška více hladinami

Tato metoda zkoušky je v technické normě **ČSN EN 60060-1** vedena jako zkouška **třídy 1** a je určena především pro testování napěťového namáhání izolací prostřednictvím napětí impulzního charakteru. Avšak tento postup testování lze uplatnit i pro testování střídavým

nebo stejnosměrným napětím. V takových případech je však nutno stanovit přesně stanovenou dobu napěťového namáhání. [4]

Princip provádění napěťových zkoušek metodou více hladin je názorně zobrazen na Obr. 3.11. V první řadě je důležité určit, kolik napěťových pulzů  $n$  se bude přivádět na každou z  $m$  napěťových hladin  $U_i$ , mezi sousedními hladinami je napěťový rozdíl  $\Delta U$ . Pro uvedené parametry by mělo platit, že počet napěťových hladin  $m$  by měl být  $m \geq 5$ , počet přiložených impulzů  $n$  na hladině  $m$  by měl být  $n \geq 10$  a napěťový krok by měl dosahovat velikosti napětí  $\Delta U = (0,01 - 0,06) \cdot U_{50}$ . Poté, co je aplikováno všech  $n$  pulzů na dané napěťové hladině  $U_i$ , zvýší se velikost přiloženého napětí o napěťový krok  $\Delta U$  a na tuto vyšší napěťovou hladinu  $U_{i+1}$  je opět přiveden požadovaný počet pulzů  $n$ . Tento postup se opakuje na všech napěťových hladinách a na každé hladině se přitom sčítá počet průrazných výbojů  $k$ . [4]



Obr. 3.11 Princip zkoušky metodou více hladin (převzato z [5])

Z naměřených dat se poté získá četnost výbojů  $f_i$  na dané napěťové hladině  $U_i$ .

$$f_i = \frac{k_i}{n_i} \quad (3.23)$$



Ke zjištění pravděpodobnosti průrazného výboje se dříve využívalo speciálního grafického papíru např. pro Gaussovo rozdělení, na který se vynesla závislost  $f_i = f(U_i)$ , a který umožňoval vyneset přímky pro odhady podléhající Gaussově distribuční funkci: [4]

$$p(U) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^U e^{-\frac{(u-U_{50})^2}{2s^2}} dU \quad (3.24)$$

V současné době jsou pro vyhodnocení pravděpodobnosti přeskočů používány softwarové nástroje založené na analytických metodách (metoda nejmenších čtverců, metoda maximální věrohodnosti). Analytické metody využívající nástroje konvenčního regresního činitele nebo meze spolehlivosti totiž umožňují posoudit, zda odhadovaná pravděpodobnostní funkce odpovídá s dostatečnou přesností naměřeným bodům. Faktem je, že se šířka meze spolehlivosti mění nepřímo s druhou mocninou počtu přiložených napětí  $n_i$  na každé napěťové hladině  $U_i$  a nepřímo s počtem použitých hladin  $m$ . Šířka meze bývá nejmenší při odhadu  $U_p$  v blízkosti  $p = (0,5 \text{ nebo } 50) \%$ . [4]

Jak je již zmíněno v předešlém odstavci, tak výsledky měření mohou být též vyhodnoceny pomocí metody maximální věrohodnosti. Tato metoda umožňuje maximalizovat pravděpodobnost, že pozorované hodnoty pocházejí z předpokládaného rozdělení pravděpodobnosti. Umožňuje získat odhad požadovaných parametrů a tím i kvantily průrazného napětí  $U_p$ . Pro metody zkoušek více hladinami a nahoru-dolů jsou výsledkem počty přeskoků  $k$  a počty nepřeskoků  $w$  na každé napěťové hladině  $U_i$ . Z těchto dat lze následně vypočítat věrohodnostní funkci  $L_i$  charakterizující určitou napěťovou hladinu  $U_i$ : [4]

$$L_i = p(U_i; U_{50}, s)^k \cdot (1 - p(U_i; U_{50}, s))^w \quad (3.25)$$

Kromě analýzy založené na Gaussově rozložení se v technice zkoušek vysokým napětím používají pro vyhodnocení výsledků také Weibullovo nebo Gumbelovo rozdělení.

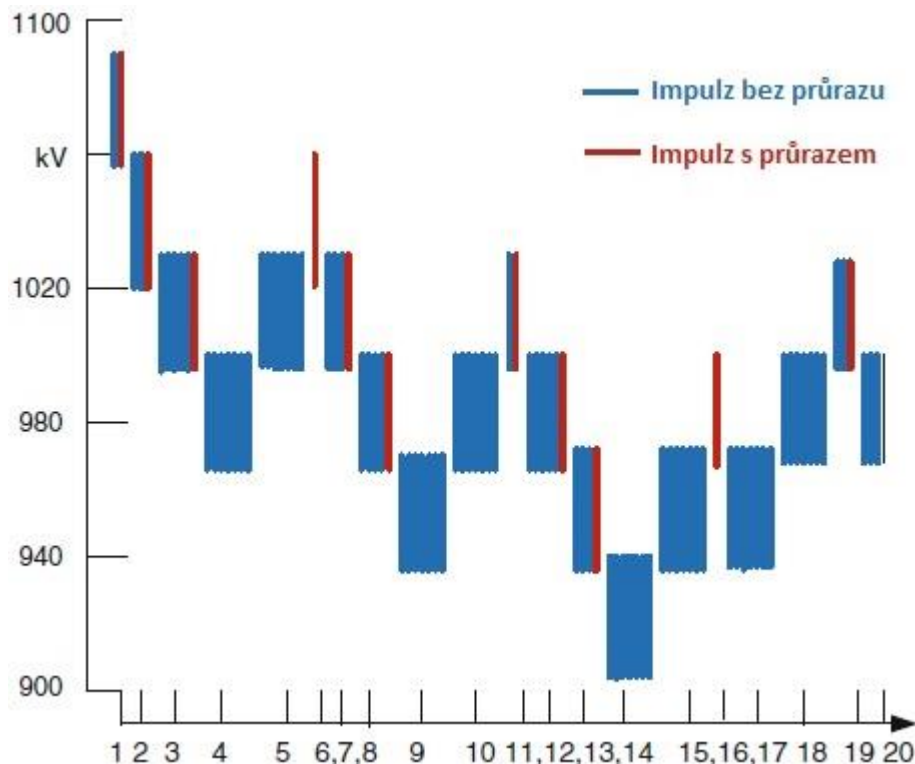
### 3.4.2 Zkouška metodou nahoru – dolů

V normě ČSN EN 60060-1 jsou zkoušky metodou nahoru-dolů označovány jako zkoušky **třídy 2**. Základem této metody je přikládání  $m$  skupin stejných napěťových impulzů na jednotlivé napěťové hladiny  $U_i$ , jejichž celkový počet není předem stanoven, neboť záleží na výsledcích během měření. Výsledky každé skupiny impulzů dané hladiny rozhodují, zda další

skupina impulzů bude aplikována na hladinu napětí, jež je o  $\Delta U$  výše než hladina původní, nebo naopak na napěťovou hladinu, která je o tento rozdíl níže. Obecně lze zkoušky metodou nahoru-dolů provádět dvěma různými způsoby: **výdržným postupem** a **výbojovým postupem**. [4]

Princip výdržného postupu spočívá v opakovaném zvyšování nebo naopak snižování napětí o  $\Delta U$  a to v závislosti na tom, zda došlo ve skupině  $n$  napěťových impulzů k průraznému výboji. Pokud ve skupině  $n$  pulzů nedošlo ani k jednomu průraznému výboji, tak se napěťová hladina zvýší o hodnotu napětí  $\Delta U$ , pokud však ve skupině impulzů došlo alespoň k jednomu průraznému výboji, tak se další impulzy netestují a napěťová hladina se o  $\Delta U$  rovnou sníží. Postup začíná na napěťové hladině, na níž k průraznému výboji dochází a směřuje k nižším napěťovým hladinám. Tento postup je vhodný spíše pro hledání napěťových hladin s nízkou pravděpodobností průrazu  $p$ , kterou lze vypočítat vztahem: [4]

$$p = 1 - (0,5)^{1/n} \quad (3.26)$$

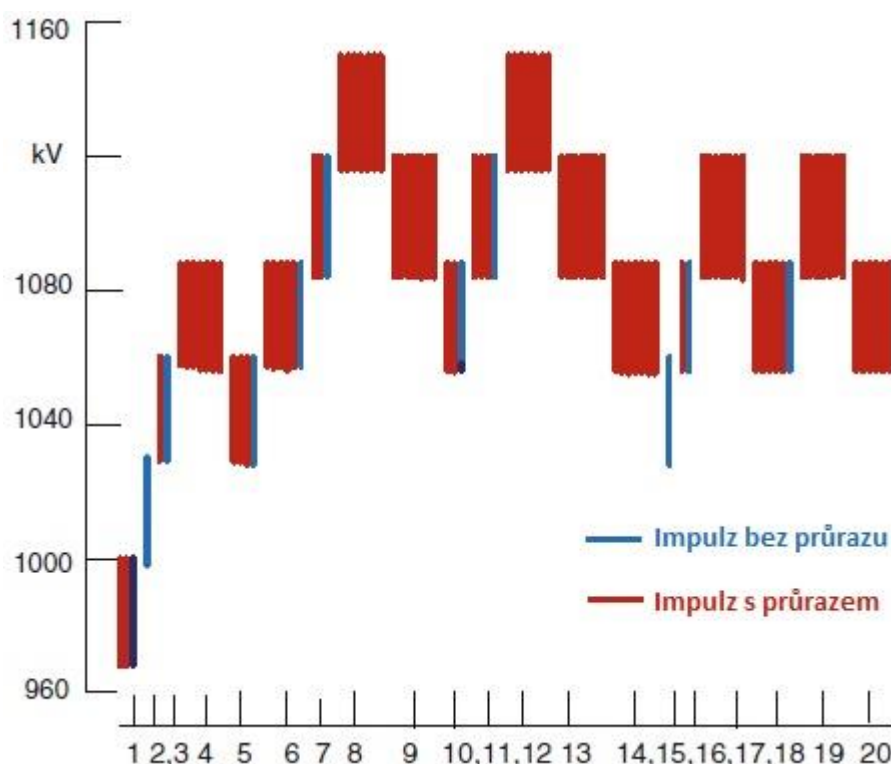


Obr. 3.12 Výdržný postup (převzato z [5])

Druhý výbojový postup je reverzní k prvnímu postupu, začíná na napěťové hladině, na níž nedochází k žádnému průraznému výboji a napětí se postupně zvyšuje o hodnotu  $\Delta U$

k vyšším napěťovým hladinám. Na každou hladinu je aplikováno  $n$  napěťových impulsů, pokud alespoň jeden z těchto impulsů nezpůsobí průrazný výboj, tak se zbylé pokusy netestují a napětí se rovnou zvýší o hodnotu  $\Delta U$ , pokud však všechny impulsy způsobí průraz, tak se napětí o tuto hodnotu sníží. Na rozdíl od předchozího postupu je výbojový postup vhodný pro hledání napěťových hladin s vysokou pravděpodobností průrazného výboje. Pravděpodobnost průrazného výboje lze opět vypočítat pomocí vztahu: [4]

$$p = (0,5)^{1/n} \quad (3.27)$$



Obr. 3.13 Výbojový postup (převzato z [5])

Z potřebných hodnot získaných z měření lze následně určit odhad velikosti napětí, při kterém dochází k průraznému výboji:

$$U_p' = \sum_{i=1}^i \frac{k_i \cdot U_i}{m} \quad (3.28)$$

kde  $k_i$  značí počet přijatých skupin pro danou napěťovou hladinu,  $i$  počet přijatých napěťových hladin,  $U_i$  velikost napětí dané napěťové hladiny a  $m$  celkový počet přijatých platných skupin na všech napěťových hladinách.

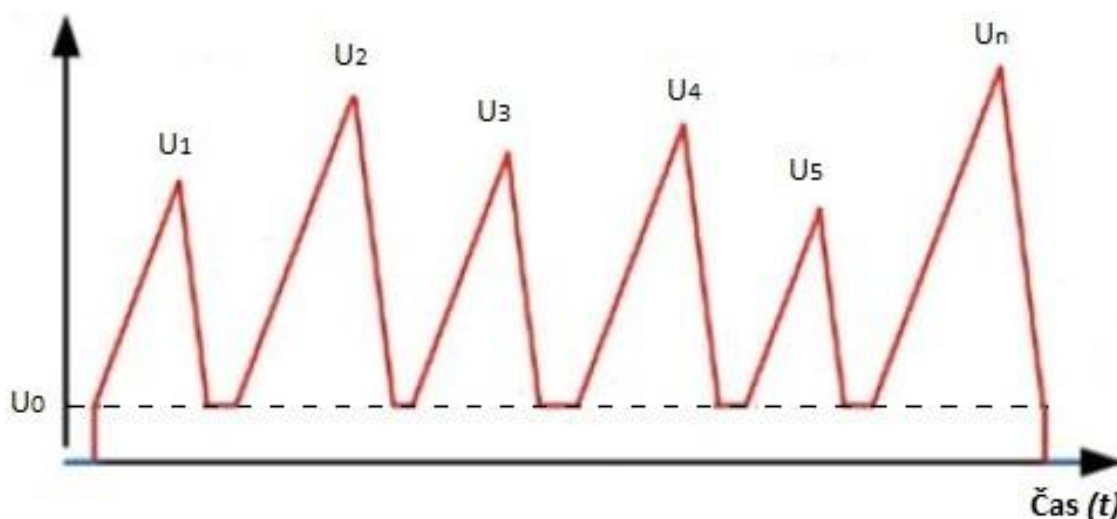
Dále za účelem omezení velkých chyb při vyhodnocování měření musí být splněna podmínka, že se vybírají pouze takové napěťové hladiny  $U_i$ , které jsou o  $\pm 2\Delta U$  výše/níže než napětí  $U'_p$ .

Hodnoty z měření mohou být též vyhodnoceny metodou maximální věrohodnosti a to stejným způsobem jako u zkoušky **třídy 1**.

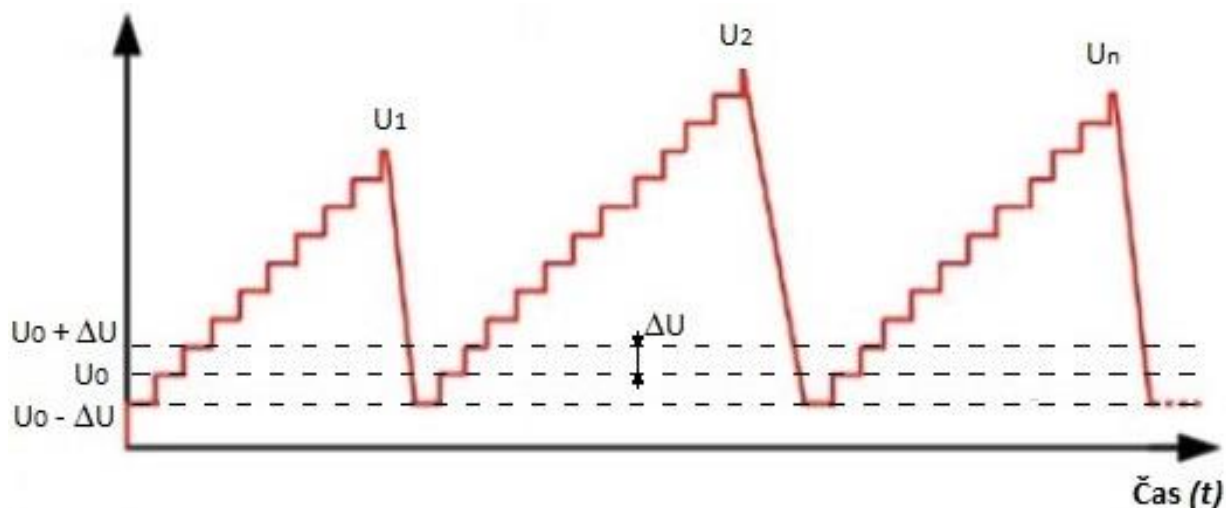
### 3.4.3 Zkouška postupným namáháním

V technické normě **ČSN EN 60060-1** je tato zkouška vedena jako zkouška **třídy 3**. Zkušební postup, který je aplikován na zkoušený objekt v případě tohoto druhu zkoušky, vždy vede k průraznému výboji a celkem se na zkoušený objekt aplikuje  $n$ -krát. [4]

Na Obr. 3.14 a Obr. 3.15 jsou znázorněny způsoby, kterými může být zkušební stejnosměrné, střídavé nebo impulzní napětí přivedeno na zkoušený objekt. Může být přivedeno buď plynulým zvyšováním napětí od hodnoty napětí  $U_0$  až do hodnoty napětí  $U_i$ , při kterém dochází k průraznému výboji, nebo toto napětí může být přivedeno v postupných napěťových krocích  $\Delta U$  až do hodnoty napětí průrazného výboje  $U_i$ , nebo se též může zkušební napětí udržovat na konstantní napěťové hladině a sledovat časový okamžik  $t_i$ , při kterém opět dojde k průraznému výboji ( $n \geq 10$ ). [4]



Obr. 3.14 Souvislé zvyšování napětí (převzato z [5])



Obr. 3.15 Postupné zvyšování napětí (převzato z [5])

Dle využitého způsobu aplikace zkušební napětí se následně získají výsledky obsahující celkem  $n$  hodnot napětí  $U_i$  nebo čas  $t_i$ , v němž průrazný výboj proběhl. Poté lze pomocí výpočtů z naměřených dat získat parametry  $U_{50}$  a  $s$  distribuční funkce, jenž popisuje pravděpodobnost průrazného výboje. V případě využití Gaussova rozdělení se hodnota napětí  $U_{50}$  získá aritmetickým průměrem z  $n$  naměřených hodnot napětí  $U_i$ . Následně lze ze známé hodnoty napětí  $U_{50}$  získat hodnotu směrodatné odchylky  $s$ . [4]

$$U'_{50} = \sum \frac{U_i}{n} \quad (3.29)$$

$$s' = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum (U_i - U_{50})^2} \quad (3.30)$$

Těž metoda postupného namáhání může pro určení náležitých parametrů využít metody maximálních věrohodností. Při využití metody maximálních věrohodností odpovídají napěťové hladiny ve výsledcích jednotlivým průrazným výbojům. Logaritmicke věrohodnost  $\log L$  lze získat pomocí následujícího vztahu: [4]

$$\log L = m_1 \cdot \log[f(U_1; U_{50}, s)] + \dots + m_n \cdot \log[f(U_n; U_{50}, s)] \quad (3.31)$$

kde  $m$  představuje četnost výskytu napěťové hladiny  $U_i$  a  $f$  funkci pravděpodobnostního rozložení v okolí  $U_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ). [4]

V případech, kdy se analyzují doby  $t_i$  do průrazného výboje, se využívají stejné metody a výpočetní výrazy. [4]

### 3.5 Vyhodnocení zkoušek atmosférickým impulzním napětím

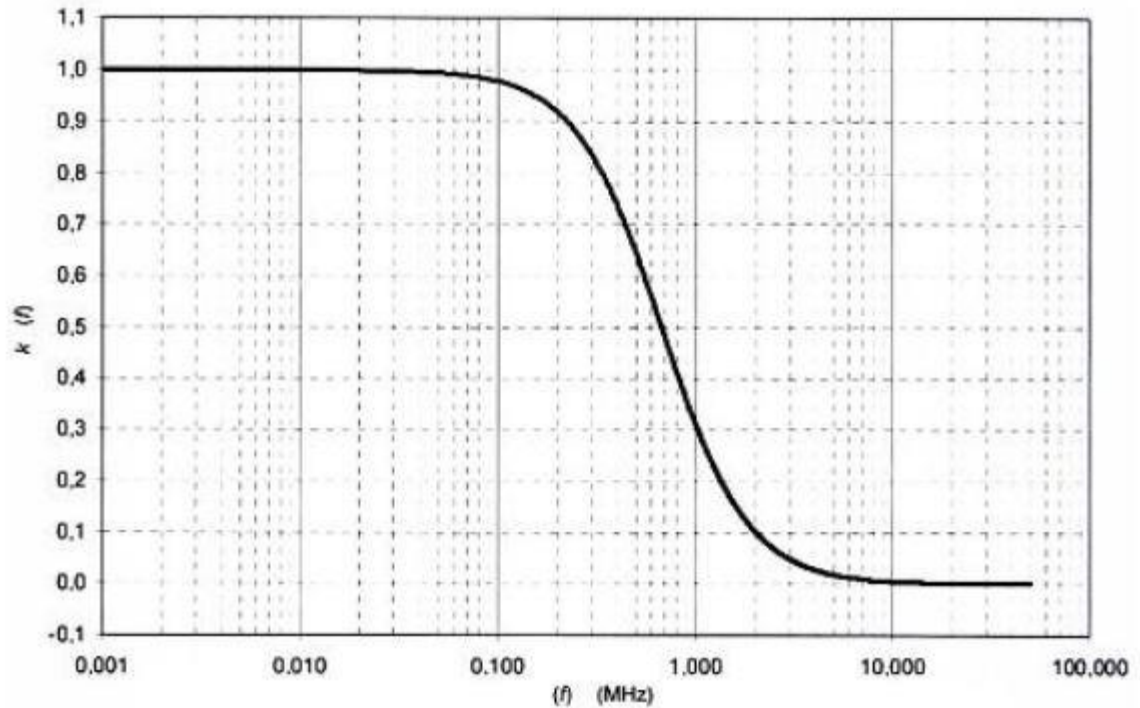
Před uvedením samotného postupu vyhodnocení tvaru vlny zkušebnímu atmosférického impulzního napětí je třeba definovat tzv. pojem **funkce zkušebního napětí** a důvody jejího zavedení pro zkoušky vysokým napětím.

Původní norma pro zkoušky impulzním napětím rozlišovala mezi plným hladkým impulzem a plným impulzem s tlumenými oscilacemi ve vrcholu. Vyhodnocení konkrétního impulzu (určení velikosti zkušebního napětí) záleželo na subjektivním názoru uživatele. Na konci dvacátého století se několik laboratoří zapojilo do výzkumu financovaného Evropským společenstvím, který se zabýval vlivem oscilací ve vrcholu impulzu na napěťovou pevnost pěti typů izolace. Výsledkem výzkumu bylo zjištění, že prokazatelný vliv překmitů ve vrcholu impulzu na průrazné chování izolace vyžaduje zavedení přesnější metodiky vyhodnocení parametrů zkušebního napětí. [4]

Parametry zkušebnímu atmosférického impulzního napětí by měly být vyhodnoceny z tzv. „*křivky zkušebnímu napětí (součet základní křivky a filtrované zbytkové křivky)*“, která je výsledkem zpracování „*zaznamenané křivky*“. Tato „*křivka zkušebnímu napětí*“ je matematická reprezentace vzniklá filtrací grafického nebo číslcového zobrazení zkušebnímu impulzu, tedy „*zaznamenané křivky*“ (viz definice uvedené v IEC 60060-1) s možným překmitem různé amplitudy a frekvence  $f$  (MHz) použitím *funkce zkušebnímu napětí*:

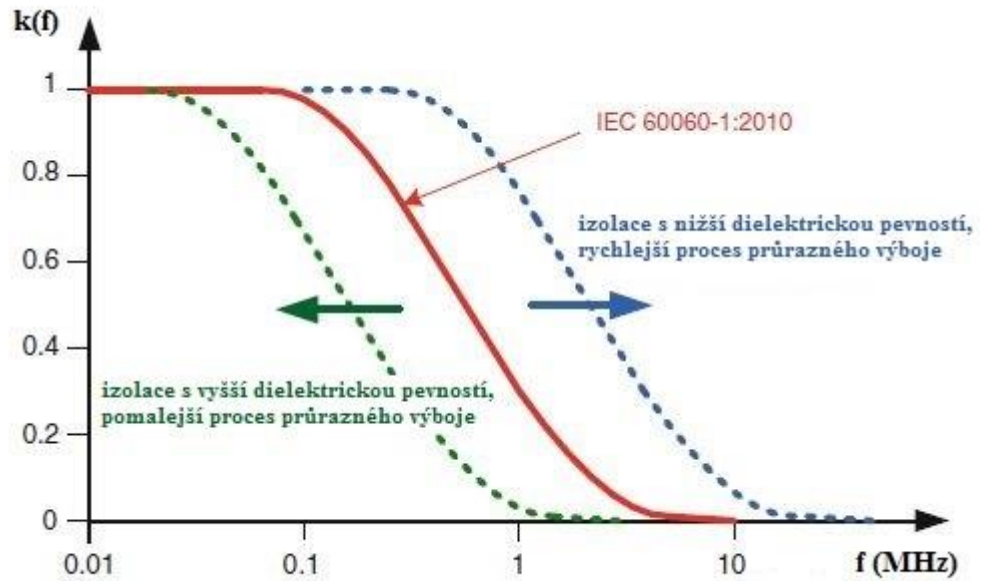
Normou přijatá funkce zkušebnímu napětí  $k(f)$  je popsána vztahem (3.32) a vynesena v Obr. 3.16. [4]

$$k(f) = \frac{1}{1 + 2,2 \cdot f^2} \quad (3.32)$$



Obr. 3.16 Funkce zkušební napětí (převzato z [4])

Práce na zpřesnění a správné fyzikální interpretaci metodiky vyhodnocení atmosférického impulzního napětí pokračují (fyzikální interpretace  $\beta$ ; zohlednění doby trvání překmitu ve vrcholu; funkce pro oscilující překmit; definice funkce zkušební napětí pro vyšší napětí - experiment pro stanovení k-faktoru byl proveden pro  $U_t$  do 200 kV a malé vzorky izolací). V dalších výzkumech je nutné rozšířit oblast experimentu vpravo i vlevo a ověřit vliv překmitů pro velké izolační systémy s relativně pomalým průrazným procesem i malé kompaktní izolační systémy s velmi rychlým průrazným procesem. To by mělo posléze vést k diskuzi o metodice určení základní křivky  $u_b(t)$  (rovnice (3.33)), diskuzi o kompenzaci překmitů při impulzních zkouškách nebo zvýšení horního limitu tolerance pro dobu čela u UHV zkoušek  $U_m > 800$  kV na 2,5 – 3,5  $\mu$ s. [5]



Obr. 3.17 Očekávaná modifikace funkce zkušebního napětí (převzato z [5])

### 3.5.1 Vyhodnocení tvaru vlny zkušebního atmosférického impulzního napětí

Použití funkce zkušebního napětí má následující výhody:

- zpracovává zkušební napětí jednotným způsobem
- není nutné určovat kmitočet překmitu
- je odstraněn veškerý vysokofrekvenční šum
- kromě oscilací ve vrcholu jsou odstraněny i oscilace v čele impulsu
- nízkofrekvenční změny tvaru vlny jsou zachovány

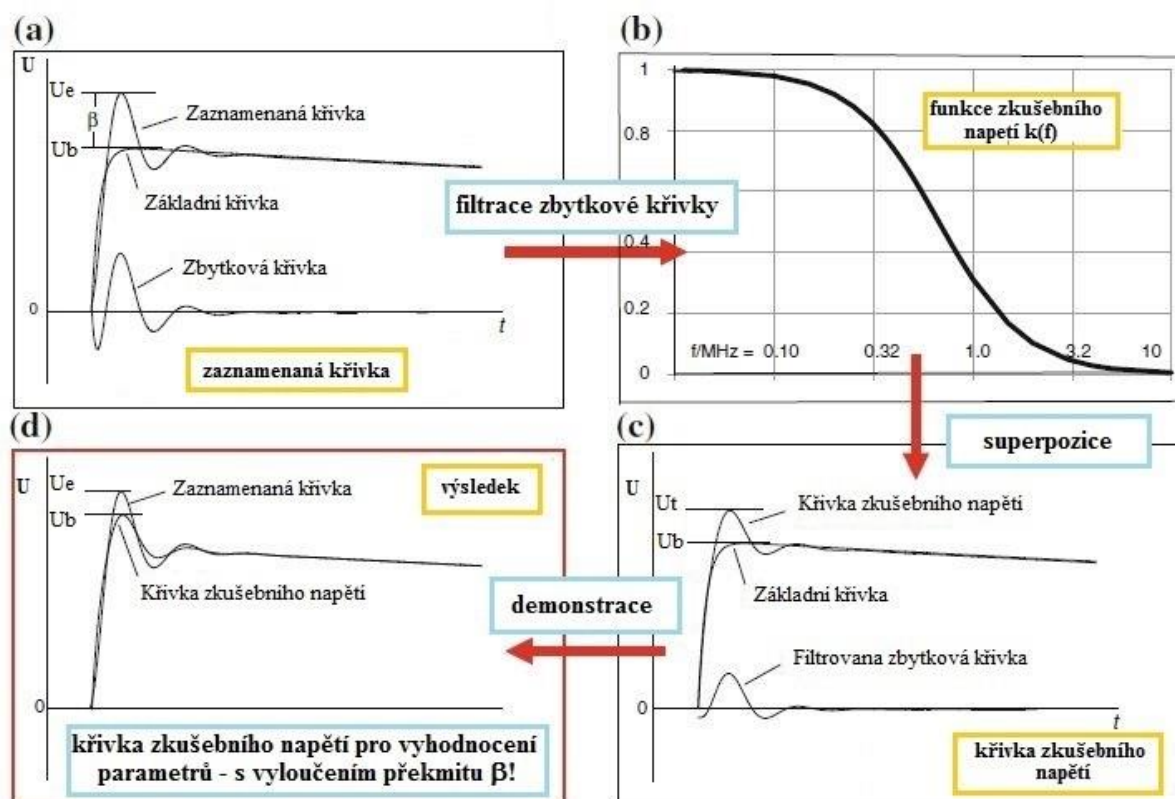
Postup se skládá z následujících kroků: [4], [5]

1. V prvním kroku je nejdříve nutné určit základní křivku  $U_b(t)$  prostřednictvím vztahu (3.33) jako odhad exponenciální funkce s parametry  $U_0$ ,  $\tau_1$  a  $\tau_2$ :

$$U_b(t) = U_0 \cdot (e^{\frac{t}{\tau_1}} - e^{-\frac{t}{\tau_2}}) \quad (3.33)$$

Z Obr. 3.18 (a) je patrné, že základní křivka představuje zaznamenanou křivku bez překmitu a lze ji popsat její maximální hodnotou napětí  $U_b$ . Zaznamenanou křivku lze naopak charakterizovat její maximální hodnotou napětí značenou  $U_e$ .





Obr. 3.18 Určení křivky zkušebního napětí. (a) Zaznamenaná křivka, základní křivka a zbytková křivka. (b) Funkce zkušebního napětí. (c) Křivka zkušebního napětí, základní křivka, filtrovaná zbytková křivka (převzato z [5])

- Následné je možné určit průběh zbytkové křivky  $U_R(t)$ , který je dán rozdílem mezi zaznamenanou křivkou  $U_r(t)$  a základní křivkou  $U_b(t)$ , viz Obr. 3.18 (a).

$$U_R(t) = U_r(t) - U_b(t) \quad (3.34)$$

- Třetí krok je založen na využití digitálního filtru s přenosovou funkcí, která odpovídá funkci zkušebního napětí. Křivka zkušebního napětí se využije pro filtraci kmitočtového spektra zbytkové křivky  $U_R(f)$ . Dostaneme tak filtrovanou zbytkovou křivku  $U_{RF}(f)$ , viz Obr. 3.18 (b).

$$U_{RF}(f) = k(f) \cdot U_R(f) \quad (3.35)$$

- Křivka zkušebního napětí  $U_t(t)$  se získá z filtrované zbytkové křivky  $U_{RF}(t)$  po její následné superpozici na základní křivku  $U_b(t)$ :

$$U_t(t) = U_b(t) + U_{RF}(t) \quad (3.36)$$

5. *Hodnota zkušebního napětí* je potom maximální hodnota křivky zkušebního napětí. Velikost překmitu  $\beta$  je rozdíl mezi maximálními hodnotami zaznamenané křivky a základní křivky a relativní překmit  $\beta'$  je možné určit z rovnice (2.2).

Vyhodnocení atmosférických impulzních napětí useknutých v týlu využívá modifikovaný postup pro plné impulzy. K využití této metody je nutný záznam průběhu atmosférického impulzního napětí useknutého v týlu a záznam plného referenčního atmosférického impulzního napětí změřeného na nižším napětí. Plný impulz je nutné měřit bez změny nastavení měřicího systému a testovacího obvodu vysokého napětí, vyjma změny vzdálenosti elektrod jiskřiště a změny velikosti napětí rázového generátoru. Postup vyhodnocení parametrů atmosférického impulsu useknutého v týlu je popsán v normě ČSN EN 60060-1 v příloze B5. [5]

Problematika překmitu se nevyskytuje u atmosférických impulzních napětí useknutých v čele. Tyto impulzy lze popsat dle Obr. 2.2.

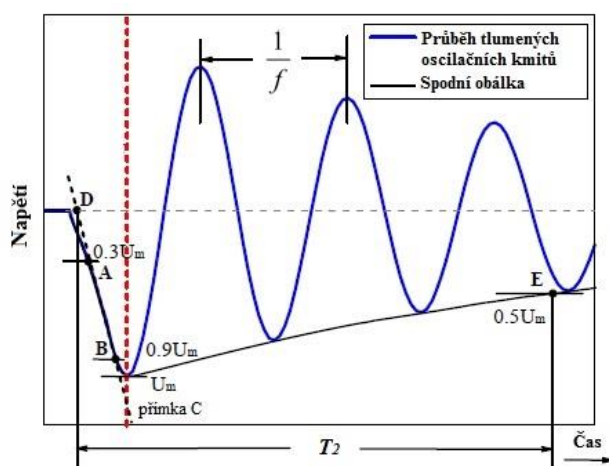
## 4 Aktuální poznatky o vlivu tvaru zkušebnímu impulznímu napětí na napětovou pevnost izolace

Standardní atmosférický impulz definovaný normou jako hladké plné impulzní napětí s dobou trvání čela **1,2  $\mu$ s** a dobou trvání půltýlu **50  $\mu$ s** se v současné době používá pro vyhodnocování zkoušek impulzním napětím izolačních systémů. Zkoušky atmosférickým impulzním napětím zaujímají velmi důležitou roli, jak při konstrukci elektrických zařízení, tak při zjišťování možných závad jejich izolačních systémů. V praxi však platí, že časové průběhy atmosférických impulzních napětí, kterým je izolace systému během svého životního cyklu vystavena, jsou v mnoha případech zcela odlišné od časového průběhu standardizovaného atmosférického impulzního napětí stanoveného normou. Proto je nezbytné určit průrazné charakteristiky izolačních systémů v situacích, kdy jsou vystavovány působení nestandardizovaných atmosférických impulzních napětí a výsledky porovnat s průraznými charakteristikami standardizovaných atmosférických impulzních napětí. Na základě těchto výsledků lze následně efektivně dimenzovat izolační systémy zařízení. Za tímto účelem se v dnešní době uskutečňuje celá řada výzkumů a experimentů, které zkoumají vliv různého tvaru zkušebnímu impulznímu napětí na průrazné chování izolačních systémů.

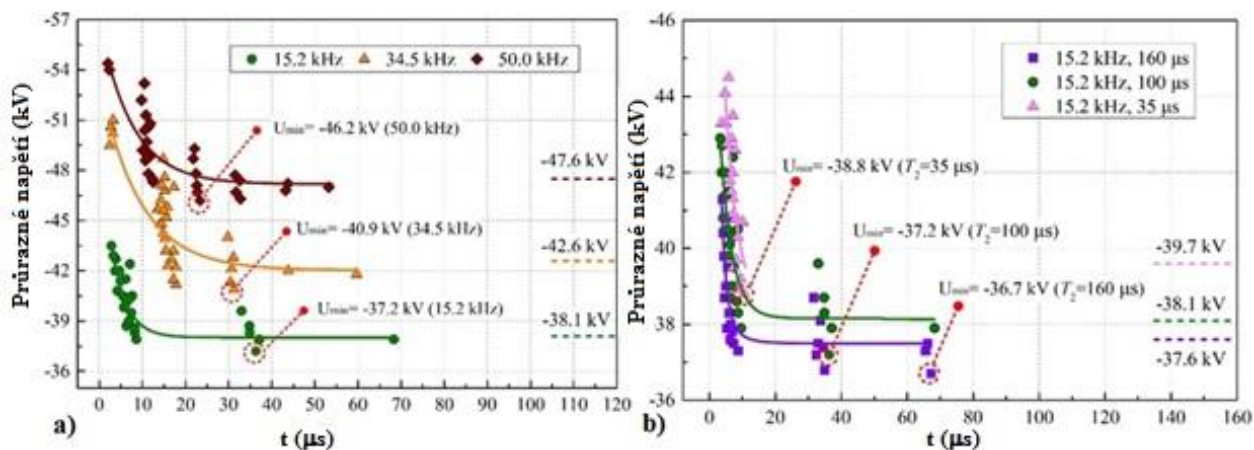
Různým tvarům zkušebnímu atmosférického impulzního napětí jsou vystavovány izolační systémy výkonových transformátorů, které představují jednu z nejdůležitějších a nejdražších součástí přenosových a distribučních soustav. Kvůli intenzivnímu rozvoji rozvodných sítí dochází k nárůstu poruch izolačních systémů výkonových transformátorů způsobených přepětovými jevy, a proto je pro jejich izolační systém nezbytné charakterizovat chování v případech, kdy je vystavován impulzům o různém tvaru. [7] Jako názorný příklad lze uvést výsledky studie: „*Breakdown Characteristics of Oil-impregnated Paper and Influential Factors for Damped Alternating Oscillation Waveforms*“, jejímž předmětem bylo testování olejem impregnovaného izolačního transformátorového papíru:

- Napětí  $U_{50}$  impulzního napětí s tlumenými oscilacemi dosahovalo vždy hodnoty **1,061 – 1,435** krát vyšší než napětí  $U_{50}$  standardního atmosférického impulzního napětí. [7]
- Práce též sledovala vliv kmitočtu oscilací. Za tímto účelem byla aplikována impulzní napětí záporné polaritě s tlumenými kmitočetmi o frekvencích **15,2 - 50 kHz**.

Průběh aplikovaného tlumeného oscilujícího impulzního napětí spolu se svými definovanými parametry je uveden na Obr. 4.1. Ukázalo se, že se průrazné napětí zvyšovalo s rostoucím kmitočtem aplikovaného impulzního napětí (Obr. 4.2 a) a též se zvyšovalo s rostoucí mírou tlumení (klesající dobou  $T_2$ ) (Obr. 4.2 b) aplikovaných impulzních napětí. Studie tak mezi hlavní faktory, které ovlivňují velikost průrazného napětí testované izolace, zařadila strmost vzrůstu napětí do vrcholu impulsu a sumární dobu přiložení vysoké hodnoty napětí v okolí vrcholů jednotlivých oscilací impulsu. [7]



Obr. 4.1 Průběh aplikovaného tlumeného oscilujícího impulzního napětí (převzato z [7])



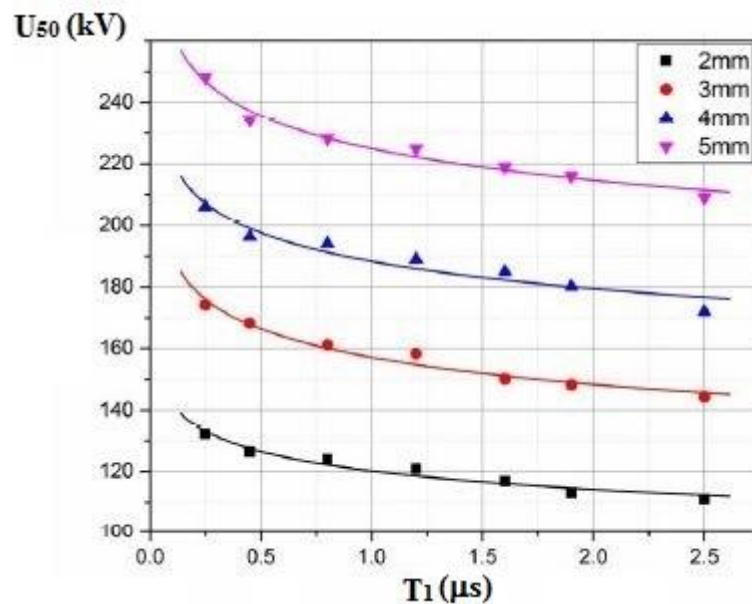
Obr. 4.2 Napětí  $U_{50}$  v závislosti na: a) frekvenci; b) míře tlumení (převzato z [7])

Lze také uvést výsledky studie: „*Dependence of the Impulse Strength of Typical Insulation Structures in Oil-immersed Transformer on Waveshapes*“, která vystavovala transformátorový izolační systém atmosférickým impulzním napětím, u kterých byly měněny parametry čela v rozmezí  $0,07 - 2,6$  μs a parametry pultýlu v rozmezí  $3 - 300$  μs.

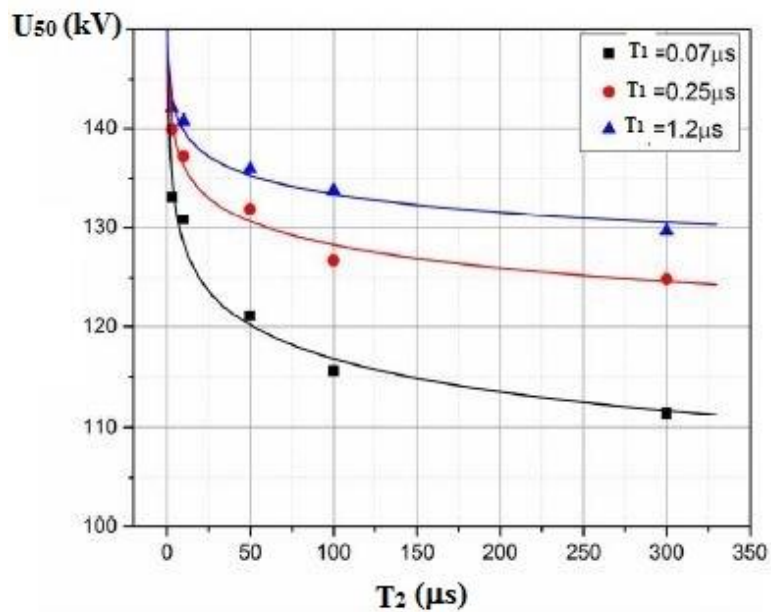
- Při porovnání napětí  $U_{50}$  v závislosti na době trvání čela zkušební impulsní napětí aplikovaného na zkušební vzorky pro různé vzdálenosti elektrod se

ukázalo, že s rostoucí dobou trvání čela impulsu hodnota napětí  $U_{50}$  ve všech případech exponenciálně klesá. (Obr. 4.3) [8]

- Pokud bylo napětí  $U_{50}$  porovnáváno v závislosti na trvání půltýlu vlny a pro různé doby čela, tak napětí  $U_{50}$  vykazovalo stejný trend jako v předchozím případě. (Obr. 4.4) [8]



Obr. 4.3 Průrazné napětí v závislosti na době trvání čela vlny (převzato z [8])



Obr. 4.4 Průrazné napětí v závislosti na době trvání půltýlu vlny (převzato z [8])

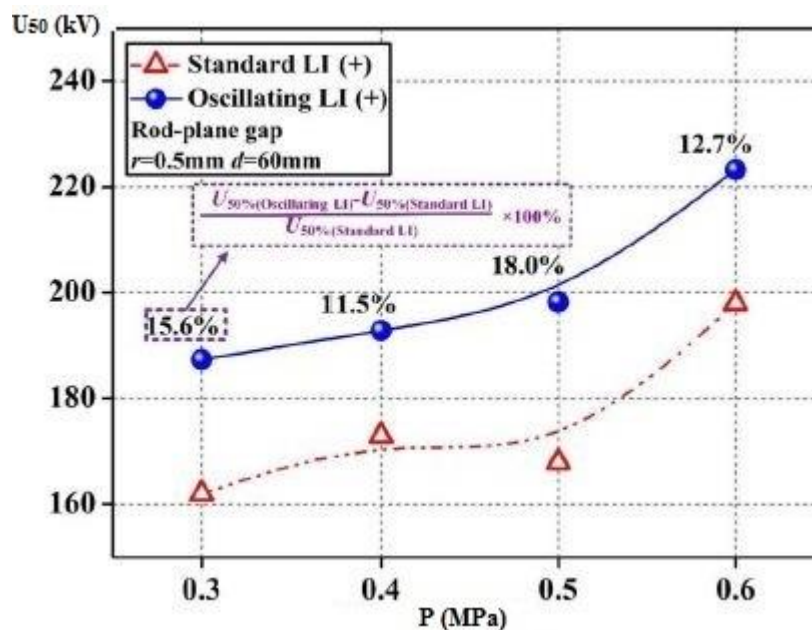
Co se týče energetických systémů, tak v dnešní době jsou stále hojně užívány plynem izolované rozvodny (GIS) vzhledem k jejich vysoké spolehlivosti a malým rozměrům. GIS je zcela uzavřené zařízení, u kterého případná porucha znamená velkou ekonomickou ztrátu. S ohledem na dopravní obtíže jsou GIS vždy sestaveny až na místě a stav izolačního systému je kontrolován prostřednictvím zkoušek střídavého napětí. Zkoušky výdržným střídavým napětím však nejsou dostatečně spolehlivé pro kontrolu všech možných závad, které v izolačním systému GIS mohou vzniknout při přepravě nebo instalaci. Proto je systém nezbytné podrobit zkouškám impulzním napětím. Provádění zkoušek impulzním napětím však není jednoduchá záležitost z důvodu velikosti impulzního generátoru, který je nezbytný pro generování zkušebních impulzních napětí. Norma **IEC 60060-3** doporučuje používat pro zkoušky výdržným napětím na místě impulzní napětí oscilujícího průběhu z důvodu jeho vysoké účinnosti. Průrazné charakteristiky plynu SF<sub>6</sub>, který se používá jako izolační médium v GIS, nejsou stále zcela jasné při jeho vystavování jak oscilujícím, tak neoscilujícím impulzním napětím, která nejsou standardizovaného průběhu. Proto se uskutečňuje mnoho experimentálních výzkumů, které plyn SF<sub>6</sub> podrobují impulzním napětím s různým tvarem zkušební vlny. [9], [10]

Příklad studie, která se touto problematikou zabývala je: „*Research on Impulse Withstand Test Effectiveness from Insulation Characteristics of SF<sub>6</sub> Gas Gap with Highly Inhomogeneous Electric Field*“. Výzkumný tým zkoumal izolační charakteristiky plynu SF<sub>6</sub> v nehomogenním poli za použití impulzů s různými parametry tvaru zkušební vlny. Pro testování byla použita atmosférická impulzní napětí, jejichž doba trvání čela se pohybovala v rozmezí **0,08 – 23,5 μs**, a oscilující atmosférická impulzní napětí s dobou trvání čela kolem **10 μs**. Pro vytvoření nehomogenního pole byl použit systém elektrod hrot-deska, přičemž hrotová elektroda měla poloměr zakřivení **0,5 mm**, uzemněná desková elektroda kruhového tvaru měla v průměru **300 mm** a vzájemná vzdálenost elektrod byla pro experiment nastavena na vzdálenost **45 a 65 mm**. Plyn SF<sub>6</sub> byl uzavřen v hermetické nádobě a tlak se pohyboval v rozmezí **0,3 – 0,6 MPa**. [10]

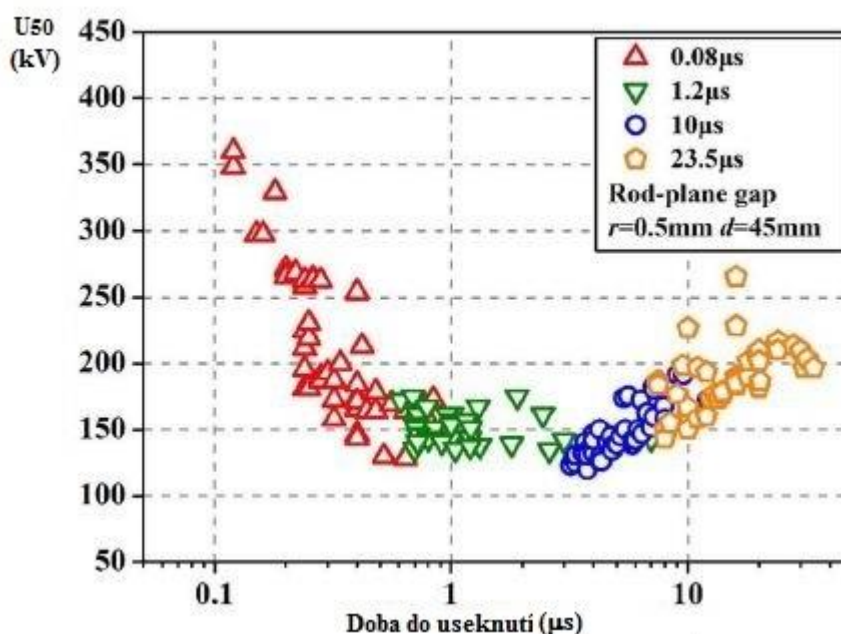
- Výsledky experimentálního výzkumu ukázaly, že v rozmezí tlaků 0,3 – 0,6 MPa dosahují oscilující impulzní zkušební napětí vyšší hodnoty průrazného napětí  $U_{50}$  o **15,6 %**, **11,5 %**, **18 %** a **12,7 %** než standardní atmosférické impulzní napětí. To dokazuje, že oscilující atmosférický impulz s dlouhou dobou trvání čela okolo

10  $\mu\text{s}$  detekuje možnou vadu izolačního systému GIS s nižší účinností než standardní atmosférický impuls. (Obr. 4.5) [10]

- V dalším kroku byla porovnávána průrazná napětí v závislosti na době do průrazu pro čtyři zkušební napětí, jejichž doby trvání čel byly **0,08, 1,2, 10 a 23,5  $\mu\text{s}$** . Tlak plynu  $\text{SF}_6$  byl v nádobě nastaven na hodnotu 0,6 MPa a vzdálenost elektrod byla 45 mm. Obvykle platí, že doba do průrazu se zkracuje s rostoucí hodnotou zkušebního napětí. Ukázalo se, že tento fakt platil pro impulzní napětí s dobou trvání čel **0,08 a 1,2  $\mu\text{s}$** . Ale impulzní napětí, jejichž doba trvání čela byla **10 a 23,5  $\mu\text{s}$** , vykazovala opačnou tendenci, tedy že doba do průrazu se zvyšovala spolu s rostoucím zkušebním napětím, což v grafu vytvořilo křivku do tvaru písmene U. V případě, kdy byla vzdálenost elektrod nastavena na hodnotu 60 mm, tak trend křivky do písmene U byl ještě více zřejmý. (Obr. 4.6) [10]
- Dále byl zpozorován zajímavý poznatek, že pro impuls s krátkou dobou trvání čela **0,08  $\mu\text{s}$**  došlo ke všem průrazným výbojům v týlu vlny. Naopak u impulsů s dlouhou dobou trvání čela (**10 a 23,5  $\mu\text{s}$** ) docházelo k průrazným výbojům přímo v čele, popř. blízko vrcholu vlny. Z toho vyplývá, že doba čela  $T_I$  hraje velmi důležitou roli při odhalování možných závad izolace. Pro tyto účely výsledky studie doporučují použít atmosférické impulzní napětí s dobou trvání čela  $T_I < \mathbf{1,56 \mu\text{s}}$ , jelikož má vyšší pravděpodobnost odhalení závady, která se může v izolačním systému potencionálně vyskytovat. [10]



Obr. 4.5 Napětí  $U_{50}$  v závislosti na tlaku pro oscilující atmosférický impulz a standardní atmosférický impulz (převzato z [10])



Obr. 4.6 Napětí  $U_{50}$  v závislosti na době do průrazu pro čtyři impulzy s různými dobami trvání čel vln pro plyn  $SF_6$  o tlaku 0,6 MPa (převzato z [10])

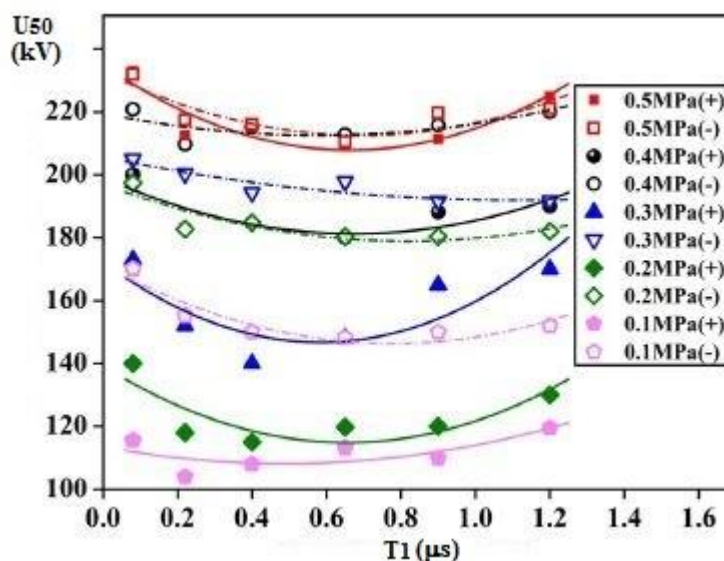
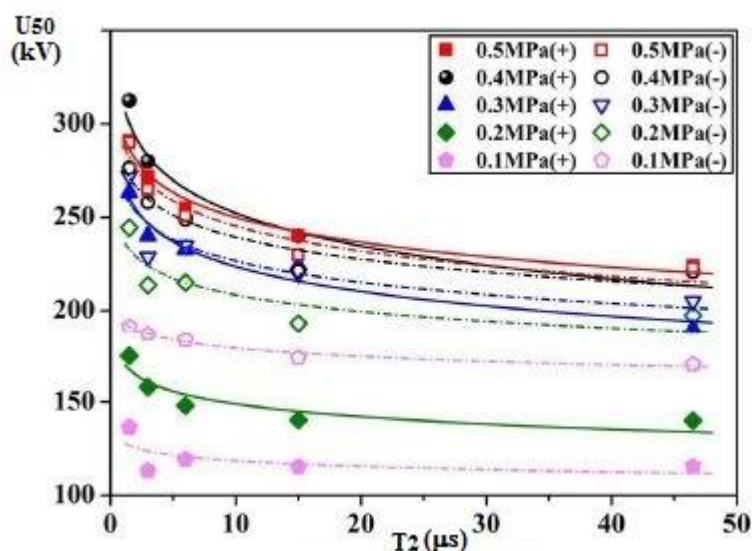
Výše uvedené poznatky potvrzuje i studie: „Discussion on Lightning Impulse Test Waveform According to Breakdown Characteristics of  $SF_6$  Gas Gaps“, která opět zkoumala průrazné chování plynu  $SF_6$ . Výzkum byl zaměřený na vliv doby trvání čela a půltýlu a výsledky potvrdily podstatný vliv na průrazné chování izolace. [11]

Pro testování byl použit impulzní generátor v Marxově zapojení, který generoval impulzy s  $T_1$  v rozmezí 0,08 – 1,2  $\mu$ s a s  $T_2$  v rozmezí 1,5 – 46,5  $\mu$ s, přičemž když se zkoumal vliv

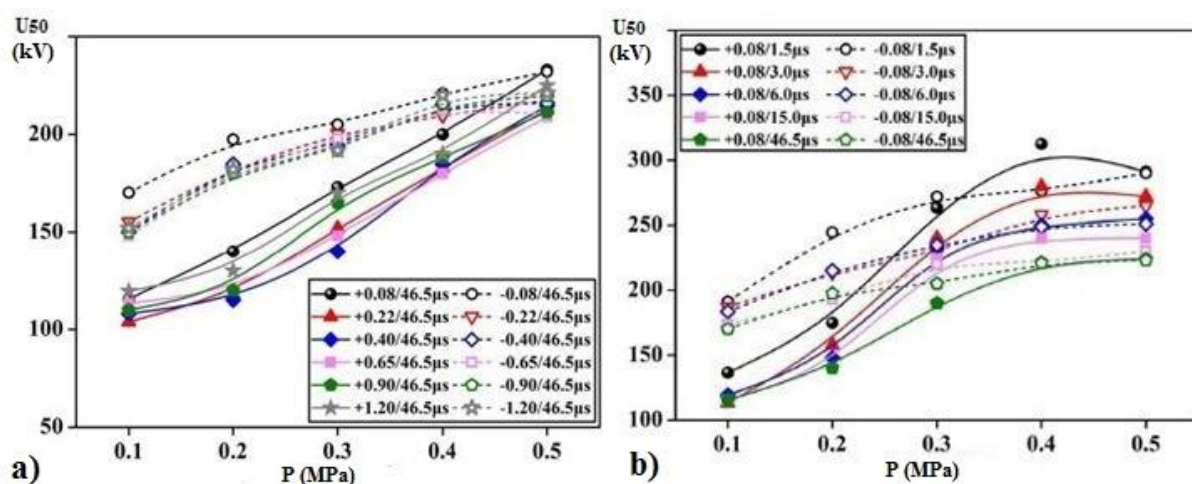


dobou  $T_1$ , tak  $T_2$  bylo nastaveno na hodnotu **46,5  $\mu\text{s}$** . V opačném případě, kdy byl sledován vliv doby  $T_2$ , tak doba  $T_1$  byla nastavena na pevnou hodnotu **0,08  $\mu\text{s}$** . Hermeticky uzavřená nádoba plněná plynem  $\text{SF}_6$  o tlaku **0,1 – 0,5 MPa** simulovala GIS. Testování probíhalo v nehomogenním poli, které bylo opět vytvořeno elektrodovým systémem hrot-deska, kdy poloměr zakřivení hrotové elektrody byl 0,5 mm, uzemněná desková elektroda kruhového tvaru měla v průměru 300 mm a vzájemná vzdálenost elektrod pro měření byla 45 a 60 mm. Další část experimentu se zabývala zkoumáním vlivu různého poloměru zakřivení  $r$  hrotové elektrody v rozmezí  $r = 15 - 0,5 \text{ mm}$  (různé homogenity pole) a vzájemná vzdálenost elektrod  $d$  byla nastavena na  $d = 15$  a  $33 \text{ mm}$ . [11]

- Testováním bylo potvrzeno, že různé parametry zkušební vlny mají významný vliv na průrazné charakteristiky systému GIS. Z grafů je patrné, že s prodlužující se dobou  $T_1$  se hodnota  $U_{50}$  zřetelně mění a křivka grafu má tendenci tvaru písmene U. Trend křivky do písmene U byl ještě výraznější v případech, kdy se snižoval poloměr zakřivení  $r$  hrotové elektrody. (Obr. 4.7) Z výsledků si lze dále povšimnout, že napětí  $U_{50}$  klesalo s rostoucí dobou  $T_2$  aplikovaných impulzů, zvláště když se doba  $T_2$  pohybovala v rozmezí **1,5 – 15  $\mu\text{s}$** . (Obr. 4.8) Z toho lze vyvodit, že standardní atmosférický impulz s  $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$  nemusí být tak citlivý pro odhalování možných závad izolace jako atmosférický impulz s  $T_1 < 1,2 \mu\text{s}$ . Proto tato studie doporučuje pro zkoušky používat impulzy s  $T_1$  v rozmezí **0,2 – 0,7  $\mu\text{s}$** , jelikož z experimentálních výsledků bylo patrné, že impulzy s touto dobou trvání čela dosahovaly nejnižší hodnoty  $U_{50}$  a tím pádem mají vyšší pravděpodobnost odhalit možnou závadu izolačního systému. Naopak doba  $T_2 = 50 \mu\text{s}$  standardního atmosférického impulzního napětí se ukázala vhodná z hlediska účinnosti odhalování závad izolačního systému. [11]

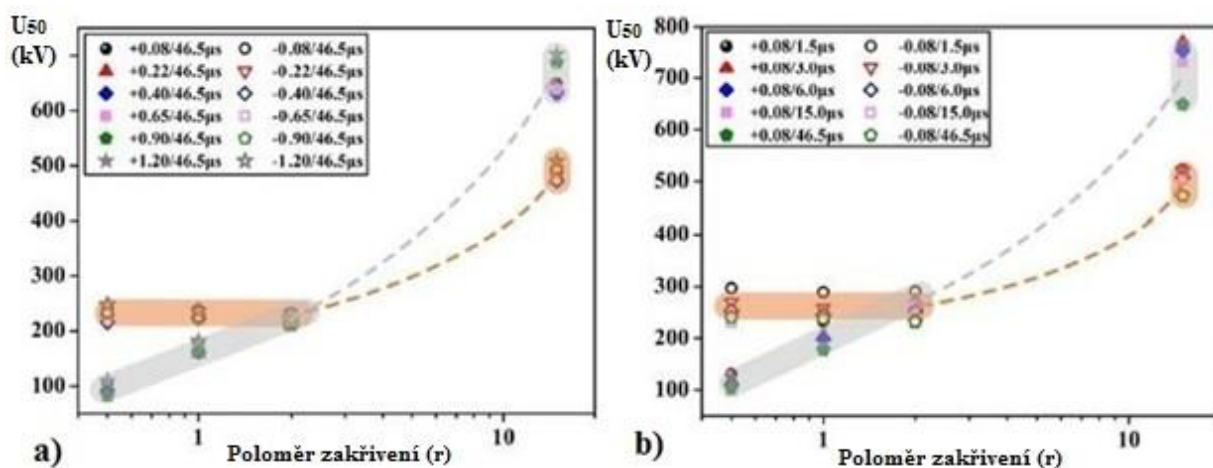
Obr. 4.7 Napětí  $U_{50}$  v závislosti na  $T_1$  pro  $r/d = 2/33$  mm (převzato z [11])Obr. 4.8 Napětí  $U_{50}$  v závislosti na  $T_2$  pro  $r/d = 2/33$  mm (převzato z [11])

- Další zajímavý poznatek, který byl na základě experimentu formulován, je výskyt tzv. „polarizační reverzace“. Polarizační reverzace se projevovala tak, že napětí  $U_{50}$  záporné polaridy impulzu dosahovalo při nižších tlacích vyšší hodnoty než v případě kladné polaridy impulzu, ale když tlak dosáhl určité (kritické) hodnoty, tak napětí  $U_{50}$  bylo naopak vyšší pro impulzy kladné polaridy a nižší pro impulzy záporné polaridy a to platilo pro všechny poloměry  $r$  hrotové elektrody. Kritická hodnota tlaku, při které dochází k polarizační reverzaci, může být zvýšena zvýšením nehomogenity pole. (Obr. 4.9) [11]



Obr. 4.9 Polarizační reverzace: a) Pro různé doby čel; b) Pro různé doby půltýlů (převzato z [11])

- Sledován byl i vliv různého zakřivení hrotové elektrody na napětí  $U_{50}$  pro různé tvary zkušebních vln, kdy vzdálenost elektrod byla **33 mm** a tlak v nádobě byl **0,5 MPa**. Ukázalo se, že při snižujícím se poloměru zakřivení  $r$  hrotové elektrody se též snižuje hodnota napětí  $U_{50}$  pro zápornou polaritu až do okamžiku, kdy poloměr zakřivení elektrody dosáhne tzv. „kritického poloměru zakřivení“, od kterého  $U_{50}$  zůstane prakticky konstantní i při dalším snižování poloměru zakřivení  $r$ . Hodnota kritického poloměru, získaná z experimentálních dat, se pohybovala okolo **2 mm** (Obr. 4.10). Pro polaritu kladnou se efekt kritického poloměru nevyskytoval [11]



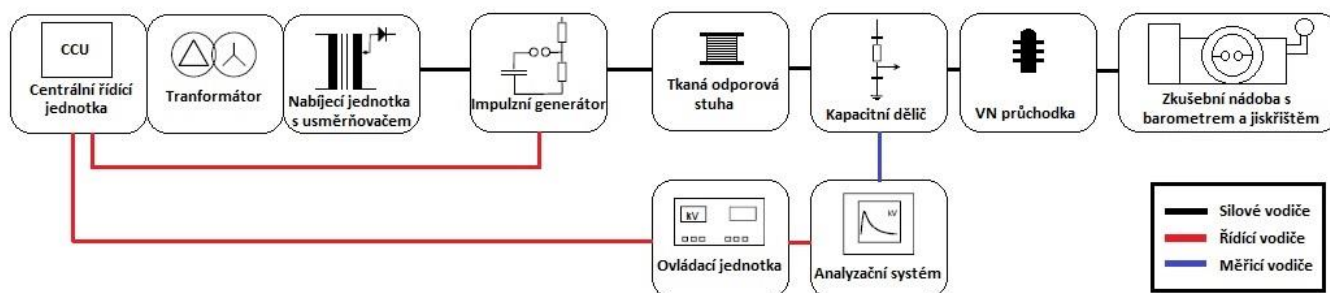
Obr. 4.10 Vliv poloměru zakřivení hrotové elektrody na napětí  $U_{50}$ : a) Pro různé doby čel; b) Pro různé doby půltýlů (převzato z [11])

## 5 Praktická část

Stěžejní částí této diplomové práce je experimentální měření s cílem realizovat obdobný experiment jako výše uvedené studie a porovnat získané výsledky. V případě experimentu realizovaného v této práci ale není použitým izolačním médiem plyn SF<sub>6</sub>. Celé měření bylo provedeno v prostředí syntetického vzduchu (směs 20 % O<sub>2</sub> a 80 % N<sub>2</sub>). Volba jiného typu izolačního média jako alternativního řešení souvisí s uvedením plynu SF<sub>6</sub> v Kjótském protokolu. S ohledem na výsledky studií byla pro praktické měření jako variabilní parametr zvolena doba čela zkušební atmosférického impulzního napětí s cílem ověřit její vliv na napěťovou pevnost plynné izolace. Konfigurace elektrodového systému se v celém experimentu neměnila. Elektrodový systém tvořil hrot  $r = 2$  mm a kulová elektroda s poloměrem  $R = 75$  mm. Vzdálenost mezi elektrodami byla  $d = 40$  mm. Dalším proměnným parametrem byl kromě doby čela ještě tlak izolačního plynu, který dosahoval hodnot 0,1, 0,2 nebo 0,3 MPa. Jako metoda pro stanovení napěťové pevnosti byla použita metoda více hladinami, viz ČSN EN 60060-1. Experiment se prováděl v laboratoři Vysokého napětí a elektromagnetické kompatibility na Západočeské univerzitě v Plzni.

### 5.1 Podmínky realizovaného experimentu

Blokové schéma měřicího obvodu použitého pro praktický experiment je znázorněno na Obr. 5.1.



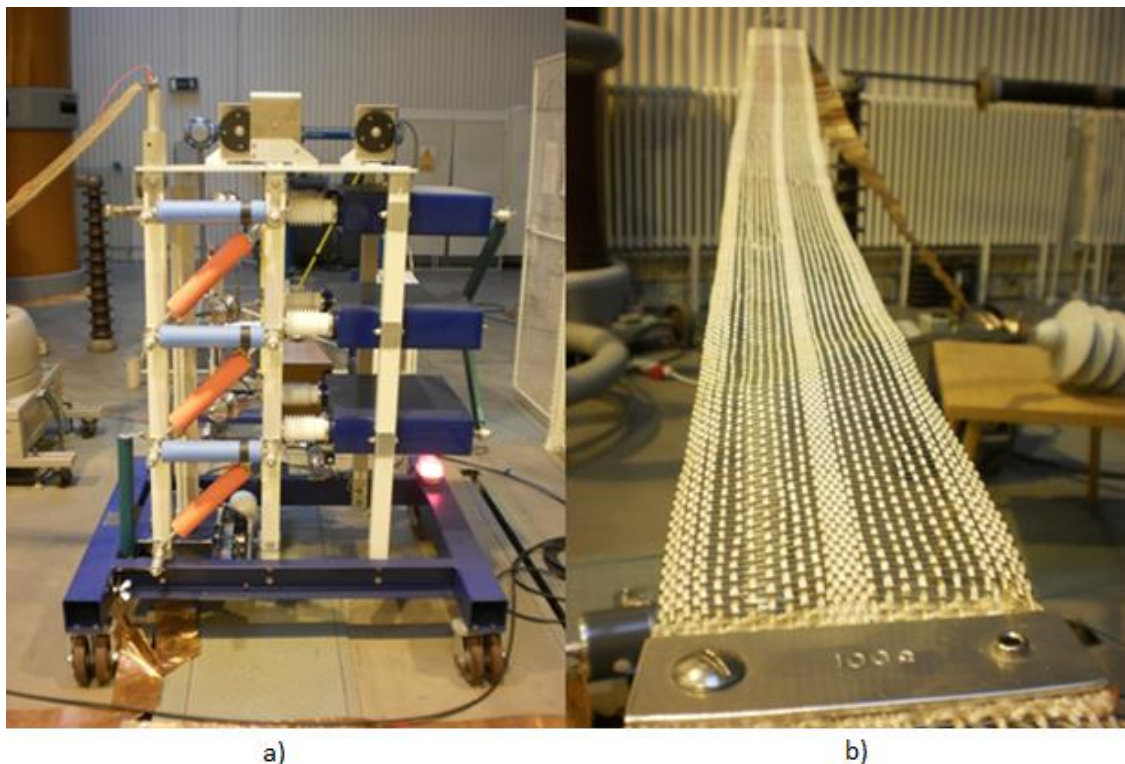
Obr. 5.1 Blokové schéma měřicího obvodu

Během experimentu jsem zkoumal vliv celkem čtyř různých tvarů zkušebních impulzů, u kterých byla nastavena různá doba trvání čela, na napěťovou pevnost izolace. Pro vlastní praktický experiment jsem zvolil zkušební metodu více hladinami, jejíž princip je podrobně popsán v kap. 3.4.1. Na každé napěťové hladině bylo vždy aplikováno celkem dvacet

napěťových impulzů, napěťový krok mezi hladinami byl nastaven na hodnotu 5 kV. Záznam každého impulzu se ukládal pro potřeby vyhodnocení počtu přeskoků na každé hladině a odečet doby do přeskoku. Časový interval mezi jednotlivými impulzy byl 30 s. Z napěťových hladin a jim příslušných počtů přeskoků, ke kterým při aplikaci skupiny impulzů došlo, jsem následně vyhodnotil 50% přeskokové napětí  $U_{50}$  pro každý tvar ze čtyř použitých zkušebních impulzních napětí. Vyhodnocení napětí  $U_{50}$  bylo provedeno pomocí statistického počítačového programu.

Pro generování zkušebních atmosférických impulzních napětí byl použit Marxův třístupňový rázový generátor od společnosti Haefely (Obr. 5.2 a)). Generátor umožňoval generovat zkušební atmosférická impulzní napětí s různou dobou trvání čel pomocí změny aktivní délky tkané odporové stuhy na výstupu rázového generátoru. Při změně délky této stuhy jsem dosahoval hodnot externího odporu  $R_{ext} = 0, 30, 100, 250 \Omega$  (Obr. 5.2 b)).

Vlastní zkoušený objekt byla tlaková nádoba s elektrodovým systémem hrot  $r = 2 \text{ mm}$  – kulová elektroda  $R = 75 \text{ mm}$  naplněná syntetickým vzduchem. Tlak vzduchu v nádobě byl kontrolován v pravidelných intervalech po dobu celého experimentu a pro posouzení vlivu tlaku izolačního média na elektrickou pevnost jsem zvolil hodnoty tlaku 0,1, 0,2 a 0,3 MPa. Celý postup měření jsem provedl pro kladnou i zápornou polaritu zkušebního napětí.



Obr. 5.2 a) Třístupňový rázový generátor Haefely; b) Tkaná odporová stuha

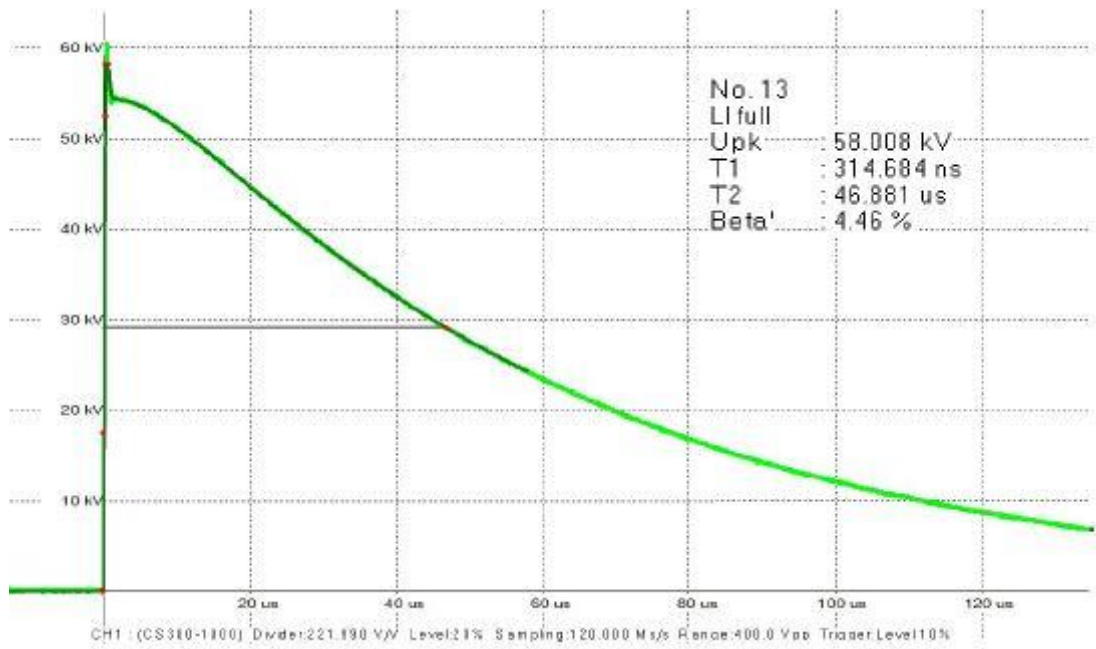
### 5.1.1 Parametry zkušebních impulzních napětí

Jak bylo již výše uvedeno, napěťová pevnost izolace byla testována prostřednictvím čtyř různých tvarů zkušebních impulzních napětí, u kterých byla měněna doba trvání čela  $T_1$  a jejichž průběhy jsou uvedeny v Obr. 5.3 - Obr. 5.10. Parametry impulzních napětí a jim odpovídající hodnota odporu externího rezistoru  $R_{ext}$  jsou uvedeny v následující tabulce:

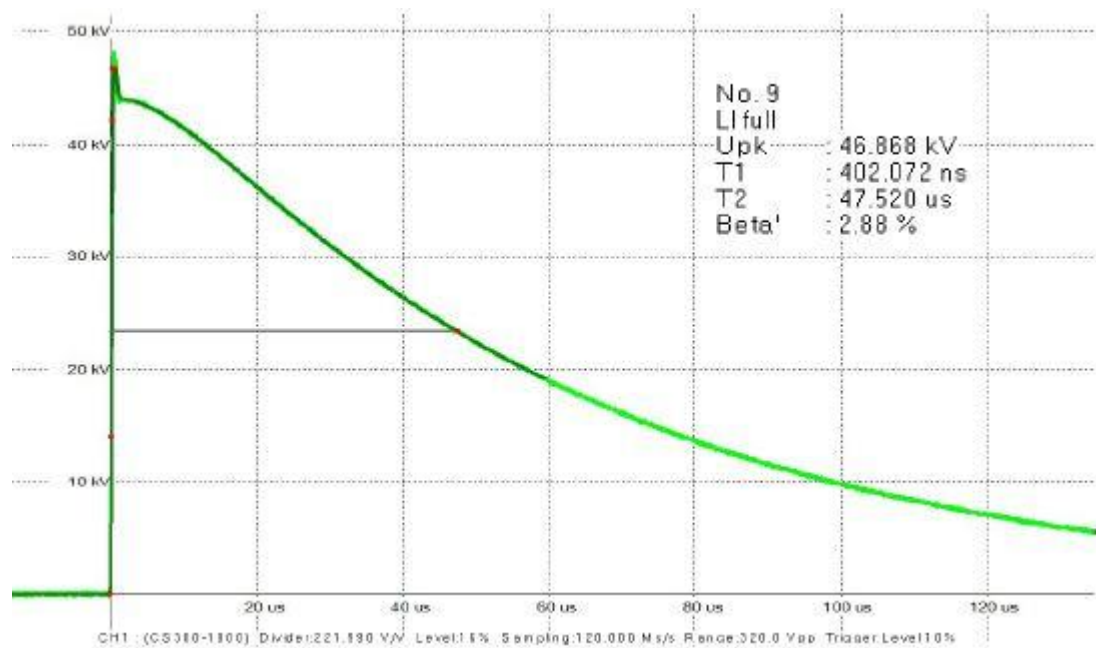
Tab. 5.1 Aplikované tvary zkušebních impulzních napětí

$R_{ext}$ ( $\Omega$ )	Doba čela $T_1$ ( $\mu s$ )	Doba půltýlu $T_2$ ( $\mu s$ )
0	0,3	50
30	0,4	50
100	0,6	50
250	1,2 (standardní atmosférické impulzní napětí)	50

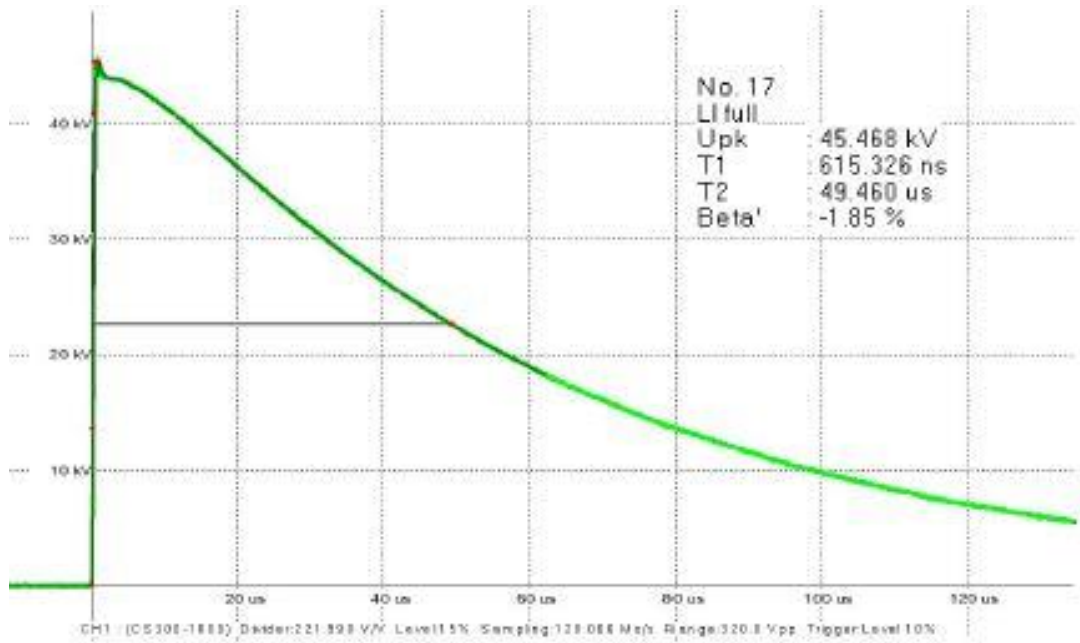
V důsledku postupného vyřazování částí tkané odporové stupy  $R_{ext}$  docházelo ke změně konfigurace zkušebního obvodu a ve vrcholech zkušebních impulzů nestandardních průběhů (pro  $T_1$  od 0,3 do 0,6  $\mu s$ ) vznikaly překmity. Překmity jsou patrné jak pro kladnou (Obr. 5.3 - Obr. 5.5), tak pro zápornou polaritu zkušebních impulzních napětí (Obr. 5.7 - Obr. 5.9). Průběhy zkušebních impulzních napětí byly zaznamenávány prostřednictvím měřicího systému impulzních napětí HIAS a následně ukládány.



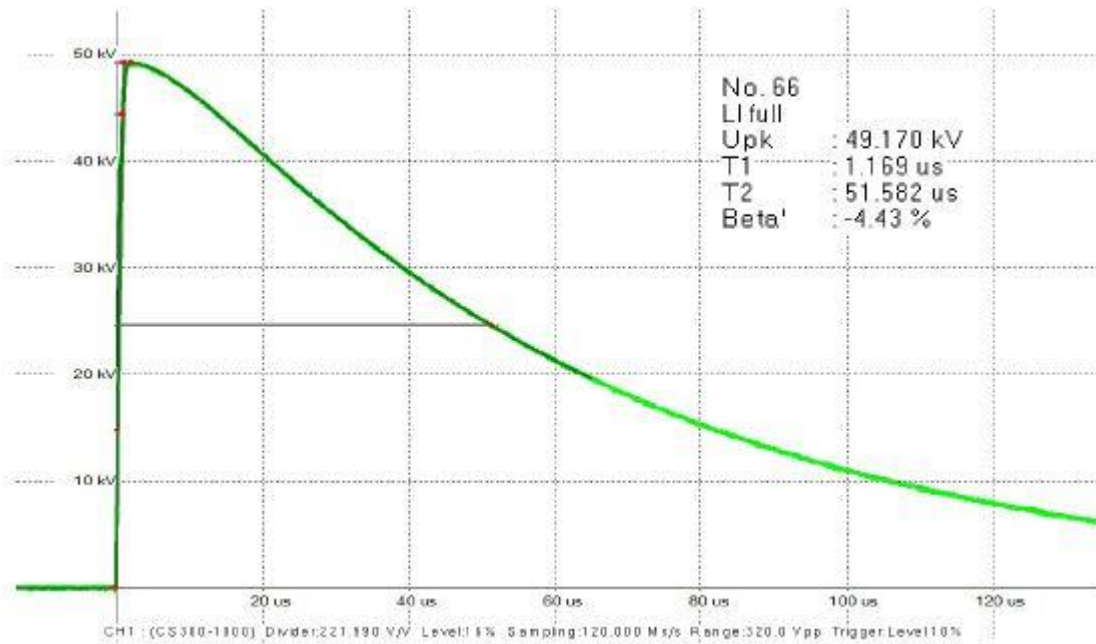
Obr. 5.3 Průběh zkušební atmosférického impulzního napětí 0,3/50 (+)



Obr. 5.4 Průběh zkušební atmosférického impulzního napětí 0,4/50 (+)

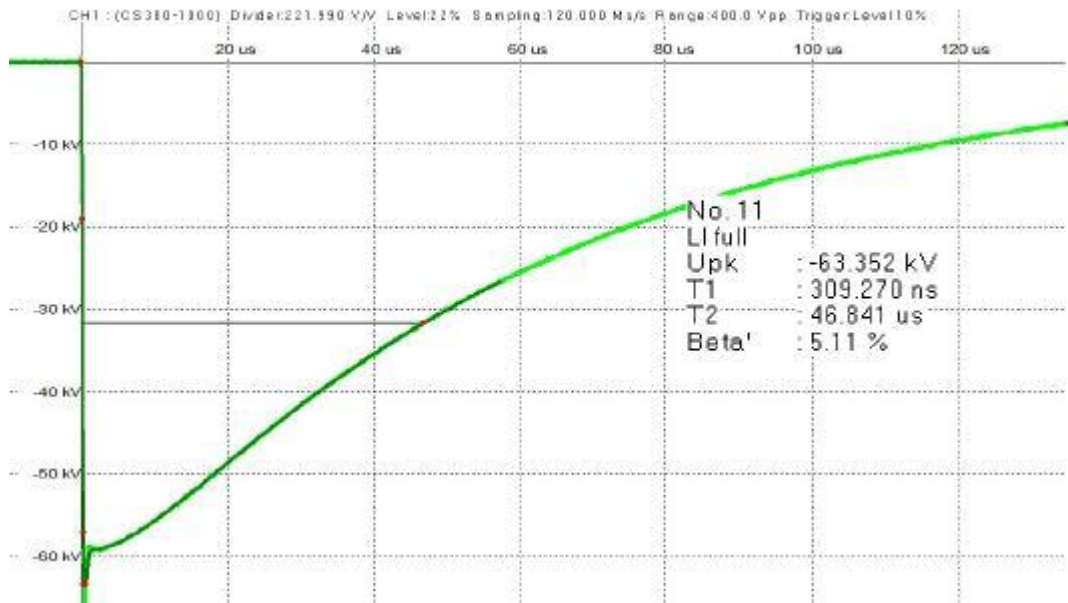


Obr. 5.5 Průběh zkušebního atmosférického impulzního napětí 0,6/50 (+)

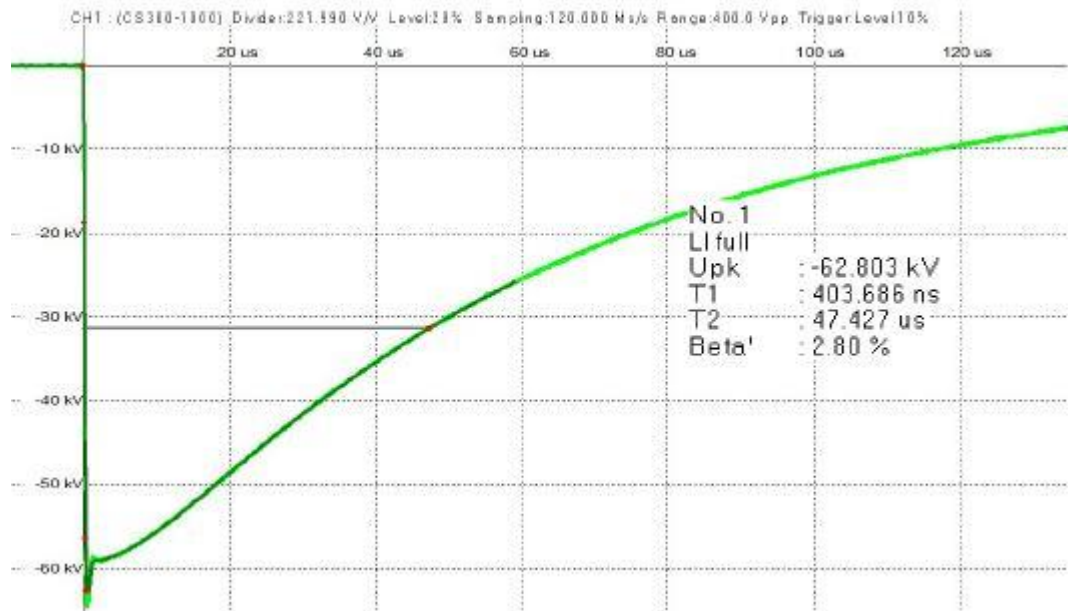


Obr. 5.6 Průběh zkušebního atmosférického impulzního napětí 1,2/50 (+)

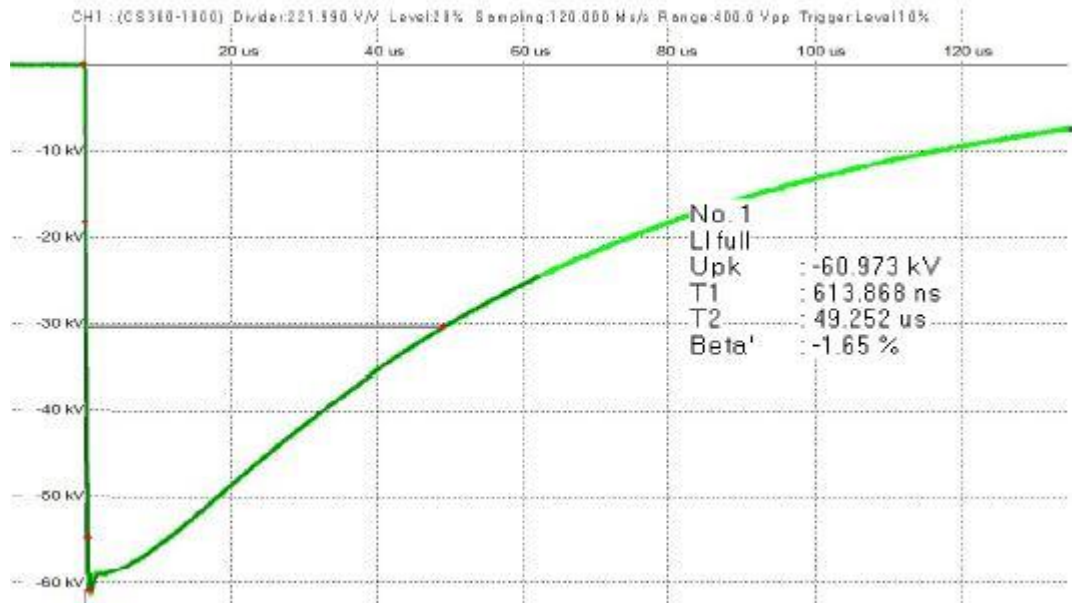




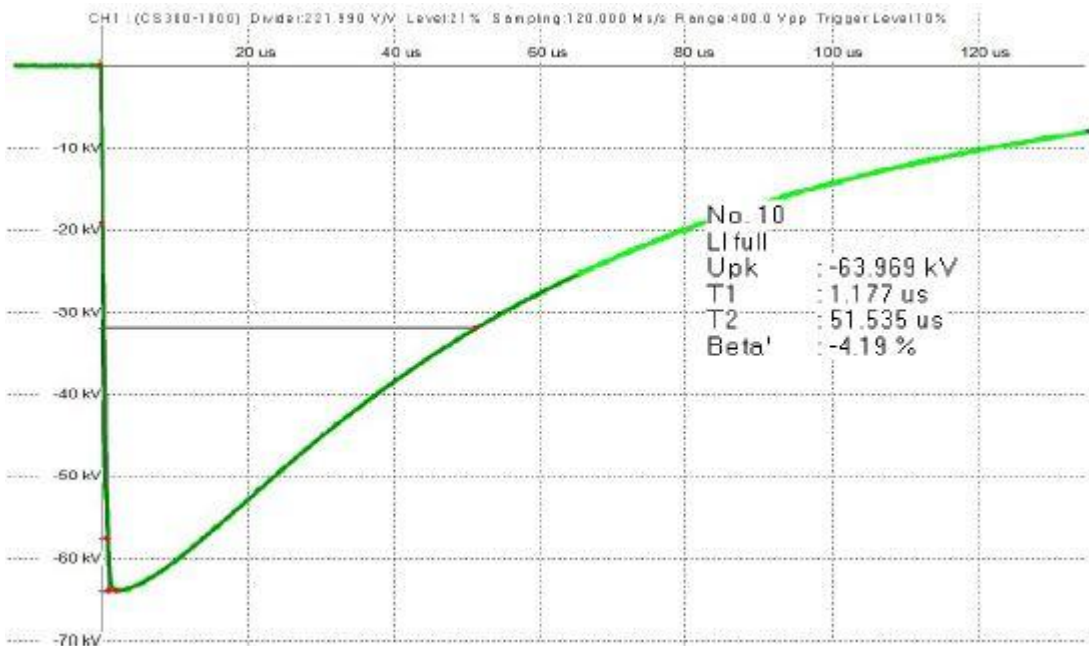
Obr. 5.7 Průběh zkušební atmosférického impulzního napětí 0,3/50 (-)



Obr. 5.8 Průběh zkušební atmosférického impulzního napětí 0,4/50 (-)



Obr. 5.9 Průběh zkušební atmosférického impulzního napětí 0,6/50 (-)



Obr. 5.10 Průběh zkušební atmosférického impulzního napětí 1,2/50 (-)

### 5.1.2 Zkušební objekt

V hermeticky uzavřené nádobě byl uložen elektrodový systém hrot-koule. Poloměr zakřivení  $r$  hrotové elektrody, která byla pro měření použita, byl 2 mm a poloměr  $R$  kulové elektrody byl 75 mm, vzájemná vzdálenost  $d$  elektrod byla nastavena na 40 mm. Nádoba byla naplněna syntetickým vzduchem se složením 20 %  $O_2$  a 80 %  $N_2$ . Měření pevnosti syntetického vzduchu jsem prováděl pro vzájemné kombinace všech čtyř variabilit tvaru zkušební atmosférického impulzního napětí a pro tři různé tlaky  $p$ , pro tlak 0,1, 0,2 a 0,3

MPa. Při testování kladnou polaritou zkušebních impulzů byla napěťová pevnost zkoumána pro všechny tři uvedené tlaky. Pro testování zápornou polaritou zkušebních impulzů byly s ohledem na výsledky testů s kladným impulzem i na výsledky výše uvedených studií zvoleny dva tlaky 0,1 a 0,2 MPa. Důvodem výběru pak byly především výsledky mezinárodních studií, kde byl rozdíl pro velikost průrazného napětí v závislosti na polaritě přiváděných zkušebních impulzních napětí nejmarkantnější právě pro tyto dva tlaky.



Obr. 5.11 Zkušební nádoba s barometrem

## 5.2 Interpretace experimentálních výsledků

### 5.2.1 Analýza stupně homogenity elektrického pole

Správně navržené zapouzdržené zařízení (jako je např. GIS) je velmi spolehlivé. Může se však stát, že se při výrobě zařízení dopustí výrobce bezděčné konstrukční vady, která se uvnitř izolačního systému projevuje vytvořením nehomogenního pole, které výrazně mění izolační schopnosti celého zařízení. Zkoušky atmosférickým impulzním napětím se používají i pro odhalování těchto případů.

Pomocí programu Agros2D jsem proto vypočítal stupeň homogenity elektrického pole a rozložení intenzity elektrického pole v okolí elektrod R2-R75, které byly pro praktické měření použity.

Stupeň homogenity, též známý jako Schwaigerův faktor a označovaný řeckým písmenem  $\eta$  [-], nabývá hodnot v intervalu od  $0 < \eta < 1$ . Pokud je známa přesná hodnota faktoru  $\eta$  uvažovaného pole, lze toto pole zařadit do jedné z následujících tříd: [12]

Tab. 5.2 Stupeň homogenity elektrického pole

Elektrické pole		
<b>Homogenní pole</b> $U_i = U_b$ $\eta = 1$ (žádné výboje před průrazem)	<b>Nehomogenní pole</b> $\eta < 1$	
	<b>Slabě nehomogenní</b> $U_i = U_b$ $\eta \geq 0,25$ (žádné výboje před průrazem)	<b>Silně nehomogenní</b> $U_i \ll U_b$ $\eta < 0,25$ (stabilní výboje před průrazem)

$U_i$  – zapalovací napětí předprůrazných výbojů

$U_b$  – průrazné napětí

Schwaigerův faktor je definovaný vztahem:

$$\eta = \frac{E_{mean}}{E_{max}} = \frac{U}{d} \cdot \frac{1}{E_{max}} \quad (5.1)$$

kde  $E_{mean}$  je střední hodnota intenzity elektrického pole,  $E_{max}$  je maximální hodnota intenzity elektrického pole,  $U$  vrcholová hodnota přeskového napětí mezi elektrodami a  $d$  vzdálenost elektrod. [12]

Ze vztahu (5.1) je patrné, že jediná veličina, která je pro výpočet faktoru  $\eta$  doposud neznámá je hodnota maximální dosažené intenzity elektrického pole  $E_{max}$ . Tu bylo možné zjistit simulačním výpočtem v programu Agros2D. Za vrcholové přeskového napětí  $U$  je možné dosadit hodnotu přivedeného zkušebnímu napěťového impulzu, při němž došlo na elektrodách k přeskoku.

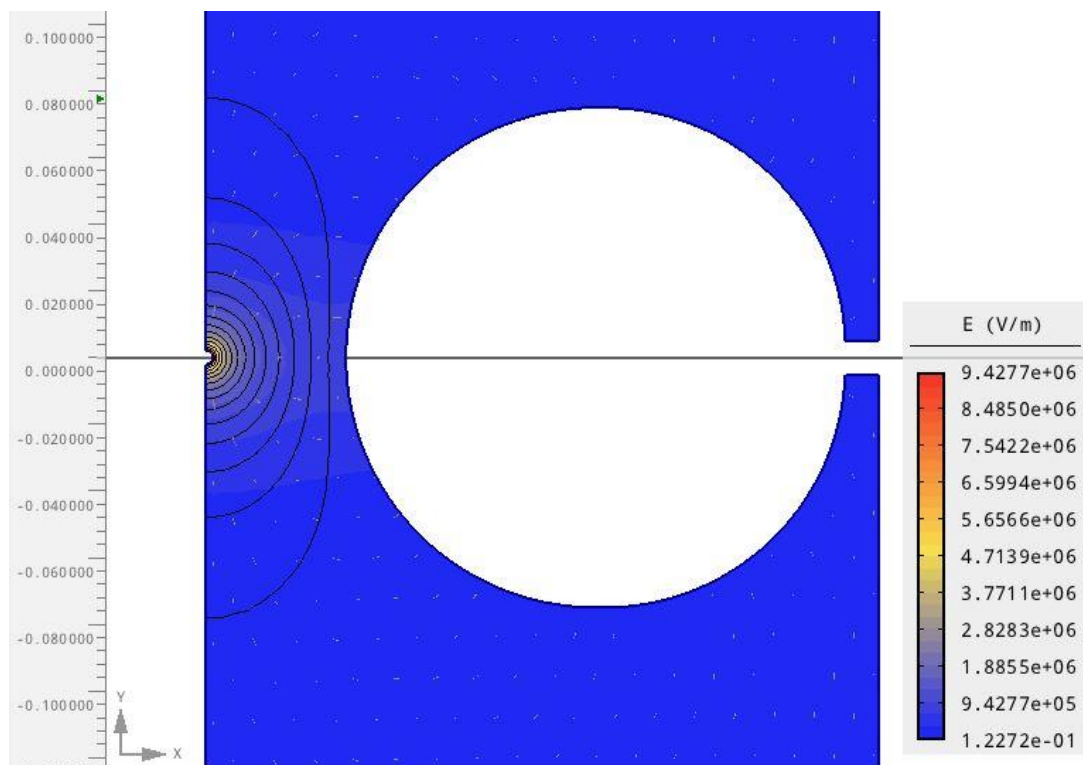
Pro simulaci v programu Agros2D se nejprve nastavila mřížka s krokem 1 mm, ve které se narysoval elektrodový systém R2-R75 se vzájemnou vzdáleností elektrod 40 mm. Poté, co již byla geometrie systému hotová, bylo nutné charakterizovat prostředí, ve kterém byly elektrody uloženy, okrajové hrany celého systému a zároveň okrajové hrany samotných

elektrod. Pro prostředí byla nastavena relativní permitivita vzduchu  $\epsilon_r = 1$ . Pro hrotovou elektrodu bylo nastaveno pevné napětí  $U_1 = 63,913$  kV, které bylo naměřeno jako přeskokové napětí pro standardní atmosférický impulz 1,2/50 kladné polarity pro tlak 0,1 MPa. Naopak pro kulovou elektrodu bylo nastaveno pevné napětí  $U_0 = 0$  V. Jako poslední bylo nutné definovat okrajové hrany oblasti, ve které byly elektrody umístěny, a které obklopovaly prostor. Těmto hranám byla přiřazena Neumannova okrajová podmínka.

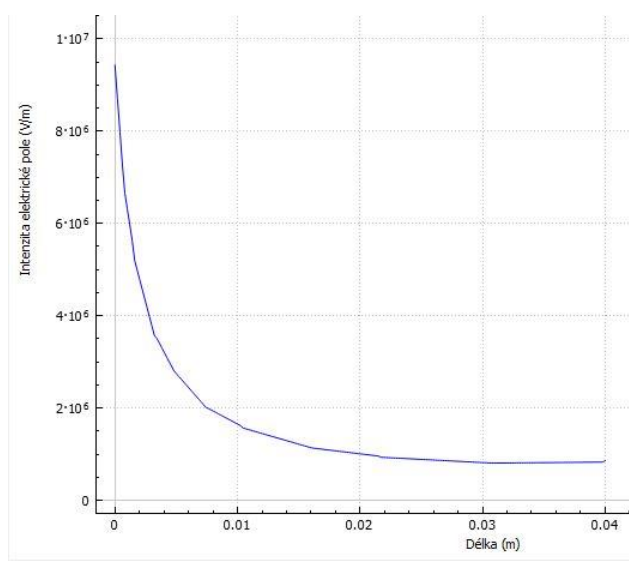
Výsledkem simulace bylo grafické vykreslení rozložení intenzity elektrického pole kolem elektrod (Obr. 5.12) a graf rozložení intenzity elektrického pole od hrotové elektrody ke kulové (Obr. 5.13). Z grafu bylo možné vyčíst poslední potřebný parametr  $E_{max}$  pro výpočet Schwaigerova faktoru stupně homogenity pole  $\eta$ .

$$\eta = \frac{E_{mean}}{E_{max}} = \frac{U}{d} \cdot \frac{1}{E_{max}} = \frac{63913}{0,04} \cdot \frac{1}{9427700} = 0,169 \quad (5.2)$$

Dle výsledku simulace  $\eta = 0,169$  lze elektrické pole elektrod R2-R75 použitých pro praktické měření klasifikovat jako pole **silně nehomogenní**.



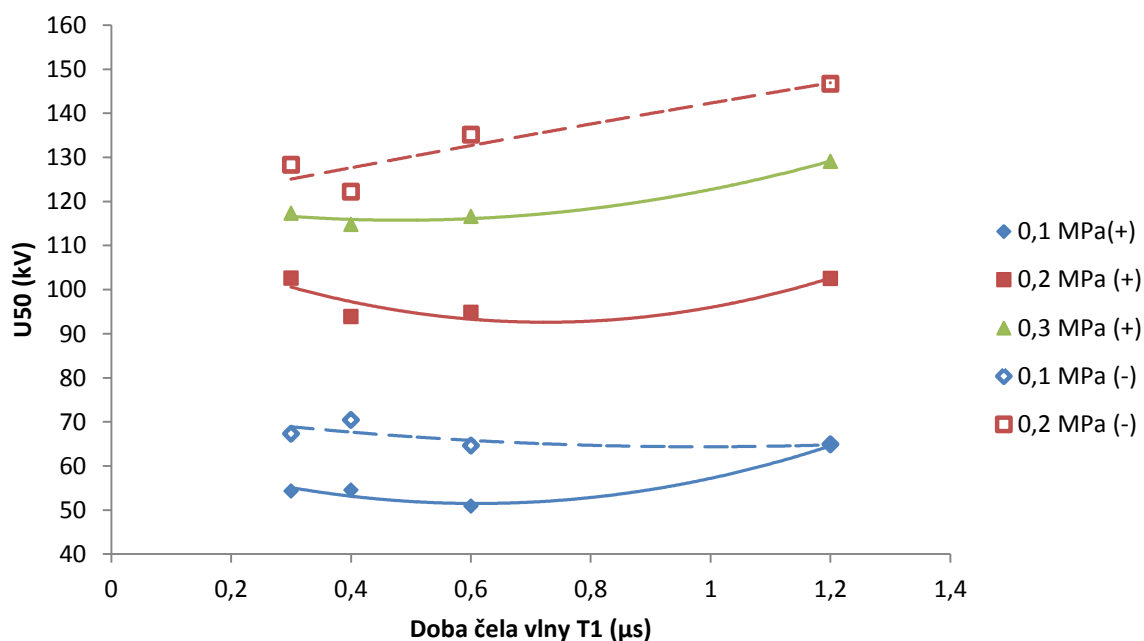
Obr. 5.12 Intenzita elektrického pole kolem elektrod



Obr. 5.13 Rozložení intenzity elektrického pole od hrotové elektrody ke kulové elektrodě

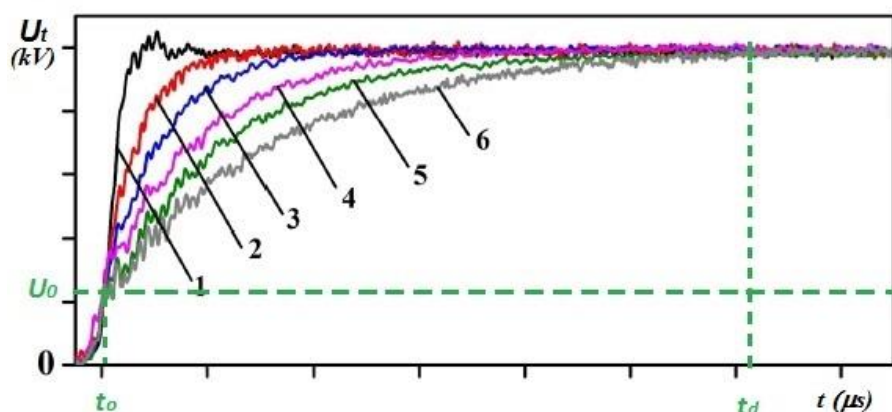
## 5.2.2 Vliv doby čela na hodnotu průrazného napětí

Obr. 5.14 znázorňuje 50% průrazná napětí  $U_{50}$  atmosférických impulzních napětí s různými dobami trvání čel  $T_1$  pro různé tlaky. Na první pohled je patrné, že s rostoucí dobou trvání  $T_1$  se hodnota průrazného napětí  $U_{50}$  značně mění. Křivky závislosti pro jednotlivé tlaky mají tendenci mít tvar do písmene U. Tímto se potvrzují výsledky z mezinárodních studií, které prováděly identické testy na plynu SF<sub>6</sub>, a které tento fenomén též vykazují (Obr. 4.7).

Obr. 5.14 Průrazné napětí  $U_{50}$  v závislosti na  $T_1$

Tendence je zřejmá především pro impulzní napětí kladné polarity a lze to vysvětlit zavedením tzv. kritické doby čela  $T_k$ , která odpovídá nejnižšímu průraznému napětí  $U_{50}$  přivedených zkušebních impulzních napětí a dobou zpoždění  $t_d$ , jejíž velikost je závislá na mechanismu výstavby výboje mezi elektrodami. V případě, kdy dochází ke zkracování doby čela  $T_l$  přiváděných impulzních napětí a zároveň platí podmínka  $T_l < T_k$ , tak doba zpoždění  $t_d$  klesá spolu s klesající dobou  $T_l$ . Tím podle vztahu (5.3) klesá hodnota integrálu pro stejnou hodnotu amplitudy napětí. Aby byla rovnost rovnice zachována, je proto nutné zvýšit hodnotu amplitudy přiváděných impulzních napětí  $U(t)$ .  $A_f$  ve vztahu vyjadřuje konstantu, jejíž hodnota závisí především na použitém elektrodovém systému. Napětí  $U_0$  reprezentuje počáteční napětí (napětí prvotní ionizace, vzniku striméru nebo vzniku lídru, podle použitého typu elektrodového systému), kterému odpovídá čas  $t_0$ . (Obr. 5.15) V důsledku toho napětí  $U_{50}$  roste s klesající dobou  $T_l$ . [11], [13]

$$\int_{t_0}^{t_d} \{U(t) - U_0\} dt = A_f \quad (5.3)$$



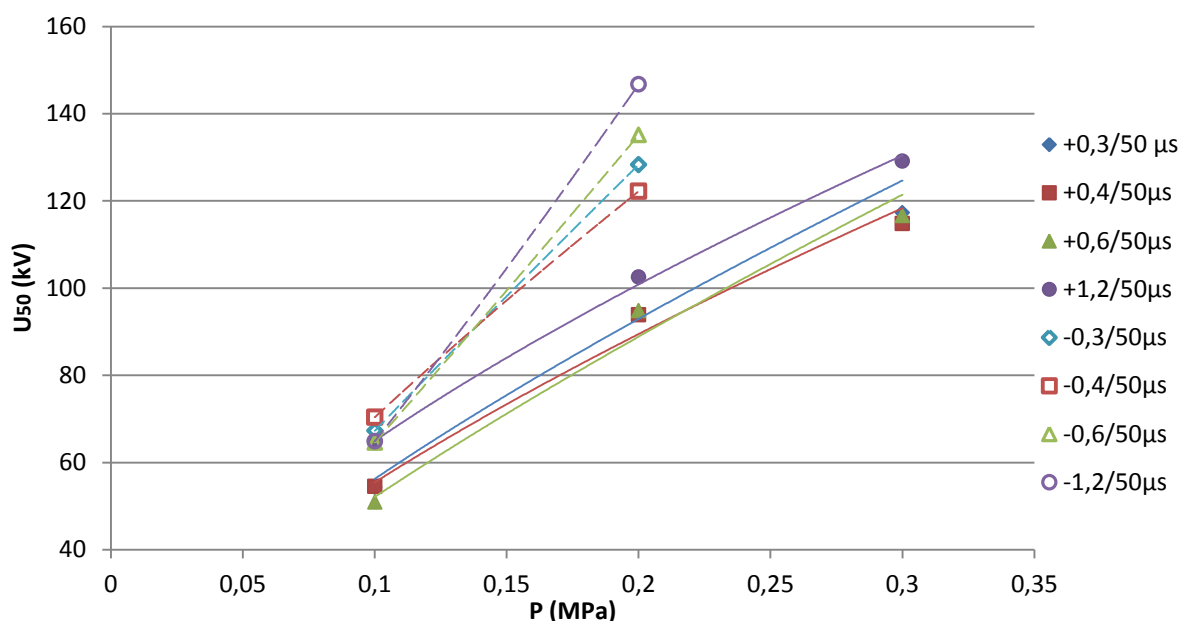
Obr. 5.15 Integrál napětí (převzato z [11])

V opačném případě, kdy  $T_l > T_k$  vliv strmosti impulzního napětí na dobu  $t_d$  klesá. Uplatňuje se však více stabilizační efekt koróny na hrotové elektrodě, který se projevuje zejména u impulzů s menší strmostí čela, a který způsobuje fakt, že s rostoucí dobou  $T_l$  roste i napětí  $U_{50}$  přiváděných impulzních napětí. [11]

Z výsledků je na první pohled patrné, že standardní atmosférické impulzní napětí 1,2/50 ve všech případech dosahuje nejvyšší hodnoty průrazného napětí, a z toho důvodu ho lze v rámci těchto zkoušek označit jako napětí nejméně citlivé pro identifikaci případných vad izolace. Naopak jako vhodná napětí se podle výsledků jeví impulzní napětí s  $T_l$  v rozmezí od 0,4 – 0,6  $\mu$ s.

### 5.2.3 Vliv tlaku na průrazné napětí

Elektrická pevnost plyných izolantů se v homogenním poli řídí tzv. Paschenovým zákonem. Vzhledem ke konfiguraci experimentální úlohy a s tím spjatou nehomogenitou elektrického pole ve zkušební nádobě lze však očekávat, že elektrická pevnost syntetického vzduchu se bude zvyšovat spolu s rostoucím tlakem plynu. Toto tvrzení vychází z předpokladu, že zmenšením vzájemné vzdálenosti mezi molekulami plynu dochází ke snižování střední volné dráhy molekul a elektronů mezi dvěma srážkami. Aby v takovém případě proběhla nárazová ionizace, je nezbytné zvýšit intenzitu elektrického pole. Naopak pokud se tlak snižuje, vzájemná vzdálenost molekul roste, střední volná dráha molekul a elektronů mezi srážkami se prodlužuje a to následně vede ke snižování elektrické pevnosti plynu. [2]



Obr. 5.16 Napětí  $U_{50}$  v závislosti na tlaku

Experimentální výsledky vynesené v Obr. 5.16 tuto teorii potvrzují, s rostoucím tlakem roste elektrická pevnost syntetického vzduchu. Graf však vykazuje další zajímavý poznatek, ve kterém se uplatňuje různá doba  $T_1$  přiváděných zkušebních impulzních napětí a jejich polarita. Je možné konstatovat, že u impulzů záporné polaritě dochází k podobnému úkazu jako ve studii: „Discussion on Lightning Impulse Test Waveform According to Breakdown Characteristics of SF<sub>6</sub> Gas Gaps“. Dochází zde také k určité „reverzaci“. Záporné impulzní napětí 1,2/50 má při nejnižším tlaku 0,1 MPa nejnižší hodnotu průrazného napětí. Naopak při nejvyšším tlaku 0,2 MPa je jeho hodnota průrazného napětí nejvyšší ze všech. Převrácený princip vykazuje záporný napěťový impulz 0,4/50, který má při nejnižším tlaku nejvyšší



hodnotu průrazného napětí, ale při nejvyšším tlaku dosahuje nejnižší hodnoty průrazného napětí. Podobným způsobem se chovají záporná impulzní napětí 0,3/50 a 0,6/50. Impulzní napětí 0,3/50 má při nejnižším tlaku vyšší hodnotu průrazného napětí než záporné impulzní napětí 0,6/50. Při nejvyšším tlaku však vyšší hodnoty průrazného napětí dosahuje impulzní napětí 0,6/50.

#### 5.2.4 Vliv polarit y zkušebního impulzního napětí

Praktickým experimentem byl také ověřován vliv polarit y zkušebního impulzního napětí na napěťovou pevnost izolace. Polarit a hrotu zaujímá jednu z velmi důležitých rolí při tvorbě a rozložení prostorového náboje v silně nehomogenním poli, který následně významně ovlivňuje dielektrickou pevnost plynného izolantu, což je názorně vidět na Obr. 5.14 a Obr. 5.16. Je možné si povšimnout, že vyšší elektrické pevnosti je dosaženo v případech, kdy byly prostřednictvím hrotové elektrody přiváděny zkušební impulzní napětí záporné polarit y. U hrotu záporné polarit y se totiž uplatňují zcela jiné děje při vzniku koróny než u hrotu kladné polarit y.

V homogenním poli nástup měřitelné ionizace obvykle vede k úplnému průrazu mezi elektrodami. V nehomogenním poli se dlouho před úplným průrazem objevují výboje. Mohou být nestabilní nebo stabilní a na volné elektrodě v plynném prostředí jsou známé jako koróna. Koróna jako předvýboj v nehomogenním poli se vyskytuje při všech 3 typech výbojového procesu – lavinovém, streamérovém i leaderovém, které se odlišují především mezielektrodovou vzdáleností. [14]

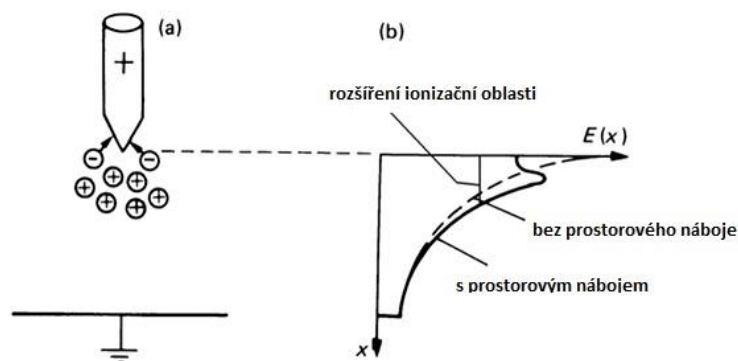
Pokud v elektrodovém systému hrot – deska dosáhne napětí na hrotové elektrodě hodnotu pro vznik částečného výboje – koróny, začne v okolí hrotu probíhat proces intenzivní ionizace, který vytváří prostorový náboj složený z elektronů a kladných iontů. Struktura a chování prostorového náboje je závislé na polaritě hrotové elektrody, protože pohyblivost elektronů a iontů je velmi rozdílná. Elektrické pole vytvořené prostorovým nábojem laviny bude ovlivňovat přiložené elektrické pole a to v závislosti na polaritě hrotu pokaždé jiným způsobem. [14]

Z toho důvodu rozeznáváme v silně nehomogenním poli dva druhy koróny:

- kladná nebo také anodová koróna
- záporná nebo také katodová koróna

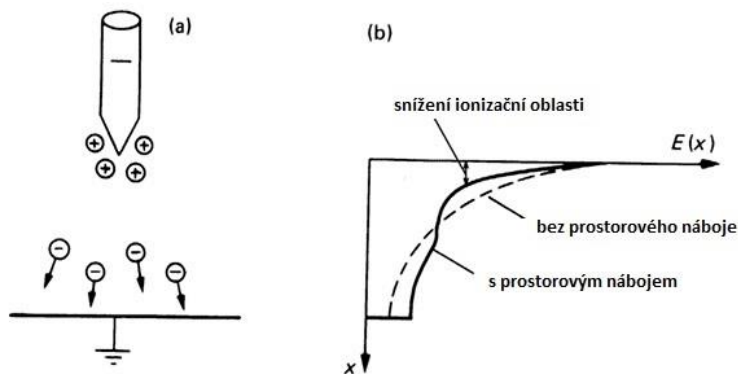
Je nutné si ale uvědomit, že konkrétní způsob výstavby výboje (lavina, streamer, leader a jejich přechodné fáze) vedoucího k průrazu v extrémně nehomogenním poli nezávisí pouze na polaritě elektrod. Významnou roli hraje faktor homogenity spojený s geometrií elektrodového systému, který zohledňuje i vzdálenost mezi elektrodami. Další neznámou vstupující do výbojového procesu je tlak, který v koeficientu homogenity zohledněn není, ale působí jako další parametr ovlivňující mechanismus průrazu na úrovni fyziky částic. [14]

Stejně jako v homogenním poli, je možné i v silně nehomogenním poli popsat model výboje (koróny) založený na lavinovém procesu. Pouze v malé oblasti okolo hrotu  $\Delta x$  je intenzita elektrického pole  $E$  dostatečná pro nárazovou ionizaci. Pro kladný hrot (Obr. 5.17) elektrony velmi rychle rekombinují na anodě (hrot) a v prostoru laviny zůstává kladný prostorový náboj složený z pomalých kladných iontů (hmotnost částice a pokles intenzity elektrického pole ve směru ke katodě jsou příčinou nízké pohyblivosti iontů). Prostorový náboj vyvolá snížení intenzity elektrického pole v oblasti před hrotem. Další nárazová ionizace je možná pouze tehdy, pokud je kladný náboj odsáván ke katodě. Prostorový náboj tak vyvolá zvýšení intenzity pole v oblasti dále od hrotu na hodnotu dostatečně velkou pro nárazovou ionizaci a proces vzniku nábojů může pokračovat. Důsledkem je **pulzní výbojový proud** s dobou čela v řádu několika desítek ns a dobou půltýlu 100 ns. Velikost proudu je okolo 50  $\mu\text{A}$ , náboj 1 pC a frekvence může být přes 400 MHz. Při nárůstu napětí nad minimální hodnotu nutnou pro zapálení koróny se lavinový proces zintenzivní a časové překrývání tvorby laviny vede k nastavení rovnovážného stavu mezi ionizací, difuzí a rekombinací. Proud postupně ztrácí pulzní charakter a přechází na stejnosměrný proud, který nepravidelně kolísá. V důsledku intenzivní ionizace se produkuje velké množství kladných iontů, které jsou schopné se dostat do větší vzdálenosti od hrotové elektrody a vytvořit prostorový náboj. Výsledkem popsaného procesu je prodloužení katody směrem k anodě, protože kladný prostorový náboj se z hlediska vlivu na rozložení intenzity elektrického pole chová jako součást anody. Zkrácení vzdálenosti vytváří příznivější podmínky pro průraz a průrazné napětí je mnohem nižší, než u homogenního pole (**10 – 15 kV/cm**). [14]



Obr. 5.17 Kladná koróna (převzato z [14])

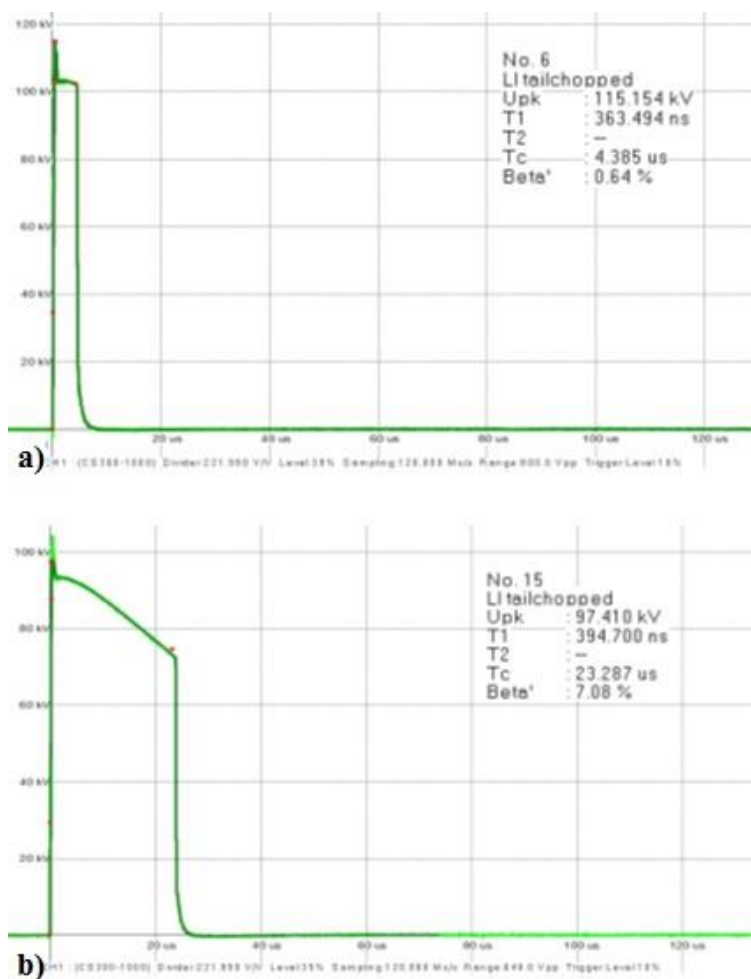
Při záporné hrotové elektrodě (Obr. 5.18) lavinový proces probíhá stejným způsobem jako u anodové koróny. Podstatný rozdíl je ve struktuře prostorového náboje. Elektrony v lavině v případě záporného hrotu nerekombinují, ale vzdalují se od hrotu k deskové elektrodě. V důsledku rychlého poklesu intenzity elektrického pole s narůstající vzdáleností od katody a také proto, že kyslík je elektronegativní plyn, jsou elektrony zachyceny neutrálními částicemi a vytvářejí prostorový náboj ze záporných iontů. Záporný prostorový náboj sníží intenzitu elektrického pole v blízkosti hrotové elektrody a zabrání dalšímu rozvoji lavinového procesu. Kladné ionty, které se z laviny mezi tím dostaly do těsné blízkosti hrotové elektrody, v této oblasti výrazně zvýší intenzitu elektrického pole. Potlačení lavinového procesu záporným prostorovým nábojem vede k tomu, že ionizace ustává a obnoví se až po odchodu záporného náboje z oblasti blízko hrotu. Důsledkem existence záporného náboje je vyšší průrazné napětí, než u uspořádání s kladným hrotem (**15 – 20 kV/cm**). Stejně jako u anodové koróny, je proces vytváření náboje nespojitý a výbojový proud má podobu velmi pravidelných „Trichelových“ pulzů s frekvencí od několika kHz do MHz. [14]



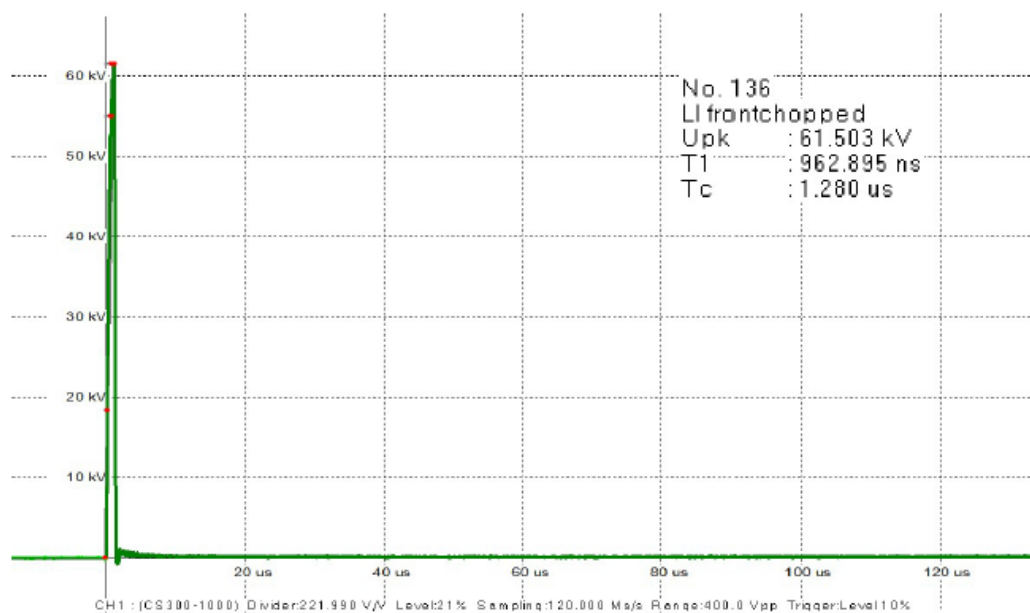
Obr. 5.18 Záporná koróna (převzato z [14])

### 5.2.5 Vliv doby čela na dobu do useknutí

Při zkoumání doby  $T_c$ , při které došlo u aplikovaných zkušebních impulzních napětí k jejich zhroucení, se opět potvrdily výsledky mezinárodních výzkumů. Stejně jako tomu bylo ve studii: „*Research on Impulse Withstand Test Effectiveness from Insulation Characteristics of SF<sub>6</sub> Gas Gap with Highly Inhomogeneous Electric Field*“ z kap. 4, docházelo i u syntetického vzduchu u impulzních napětí s krátkou dobou  $T_1$  k výbojům zpravidla v týlu impulsu (Obr. 5.19). Čím více se však doba  $T_1$  prodlužovala, tím častěji docházelo naopak ke zhroucení napětí v čele impulsu (Obr. 5.20). Co však syntetický vzduch s plynem SF<sub>6</sub> nesdílí je trend charakteristiky do písmene U. Při porovnání hodnot doby do useknutí plynu SF<sub>6</sub> spolu s hodnotami do useknutí syntetického vzduchu, mají ty pro syntetický vzduch mnohem vyšší rozptyl. U syntetického vzduchu tedy nelze potvrdit skutečnost, ke které docházelo u plynu SF<sub>6</sub>, že od určité hodnoty napětí a jejího dalšího zvyšování se doba do useknutí impulsu opět prodlužuje. Charakteristika závislosti průrazného napětí na době  $T_c$  zkušebních impulzních napětí pro tlaky 0,1 - 0,3 MPa kladné polarity jsou na Obr. 5.21 - Obr. 5.23.

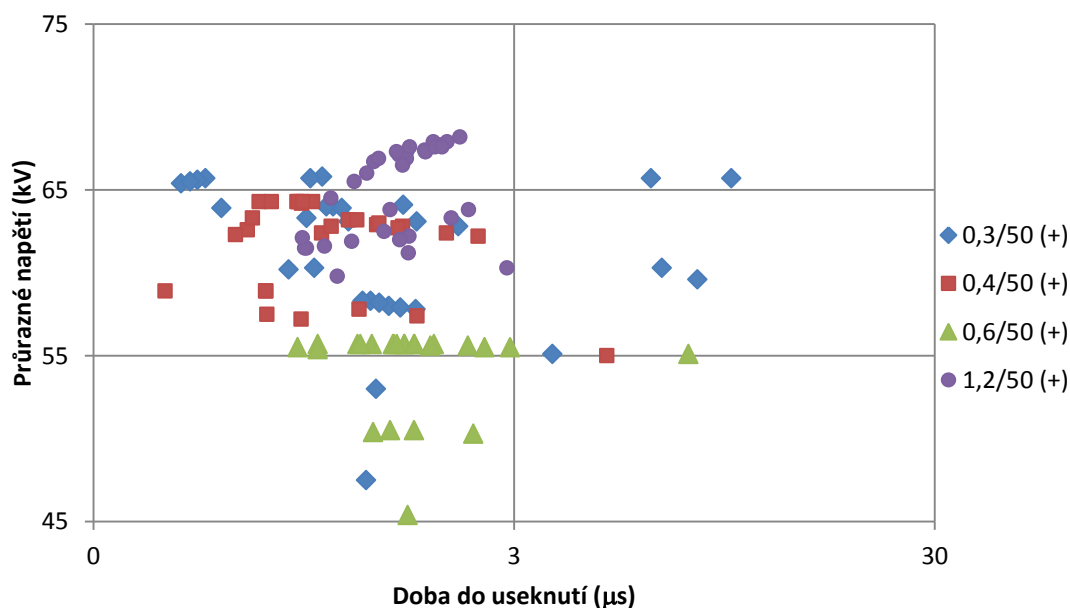


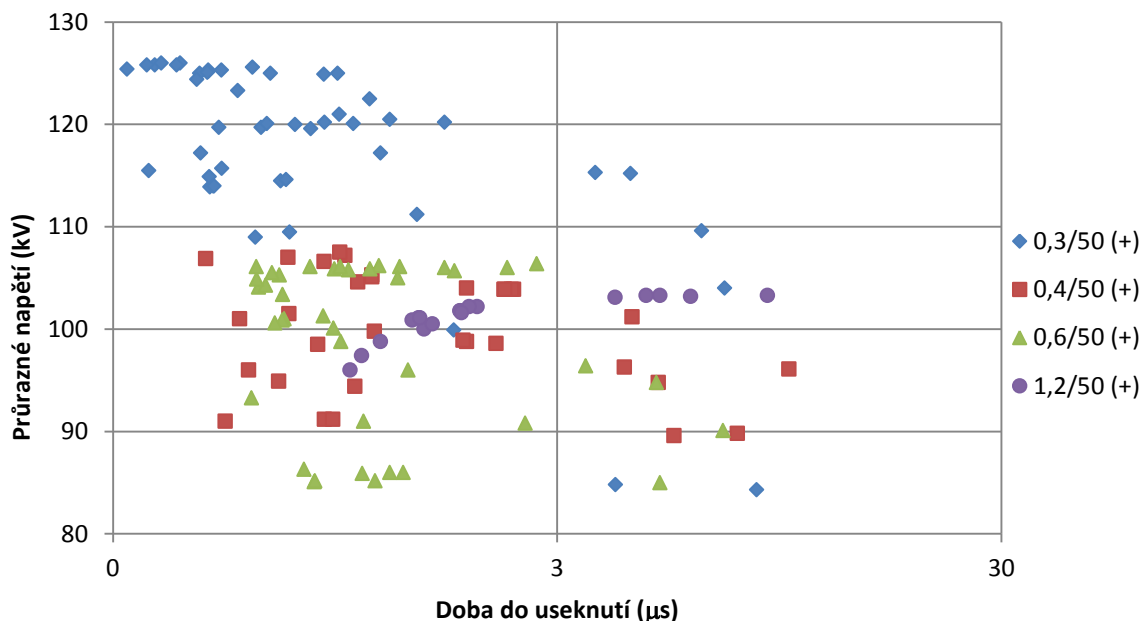
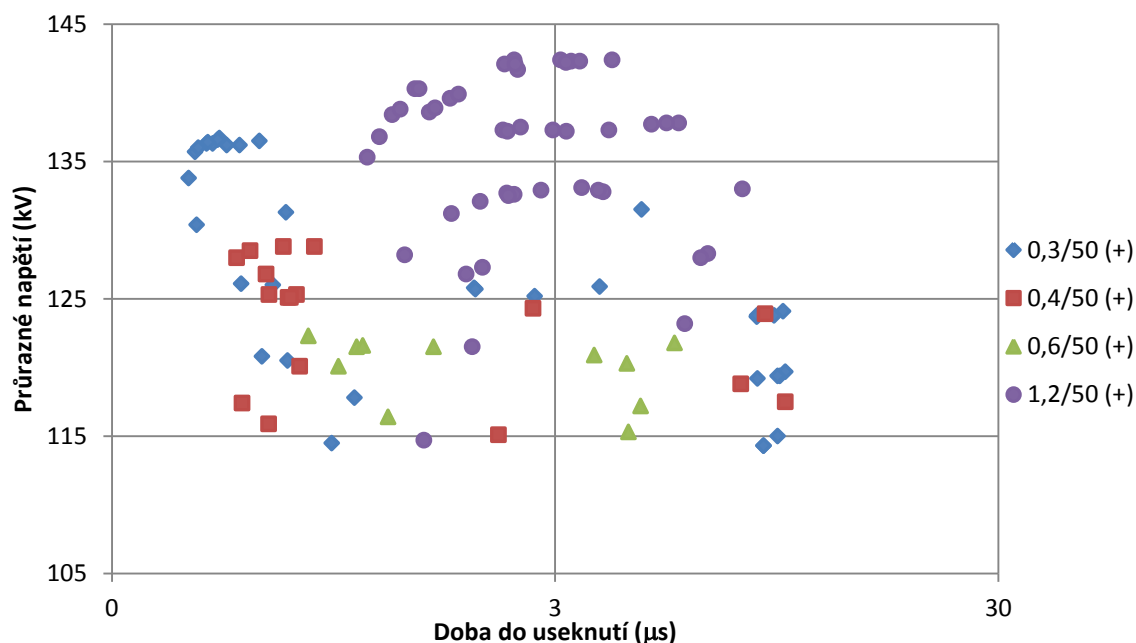
Obr. 5.19 Impulz 0,3/50 (+) usekнутý v týle spolu s názornou ukázkou rozptylu hodnot dob do useknutí pro syntetický vzduch



Obr. 5.20 Impulz 1,2/50 (+) useknutý v čele

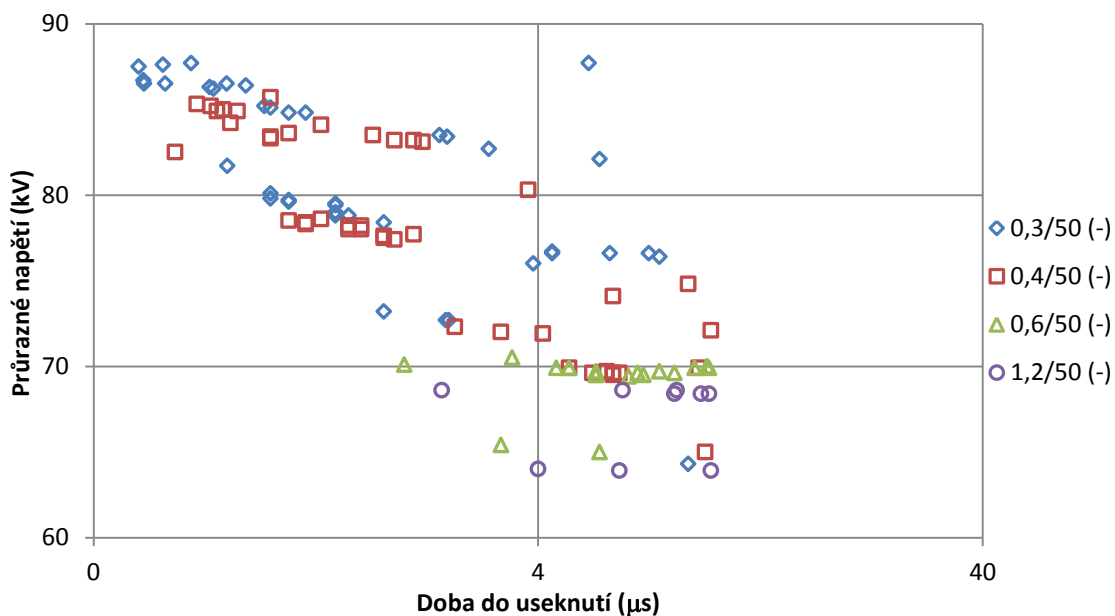
Z vynesných grafů pro kladnou polaritu si lze povšimnout určité tendence – se zvyšujícím se tlakem dochází k prodlužování doby  $T_c$ , při které dochází u jednotlivých zkušebních impulzních napětí k jejich zhroucení a to platí pro všechny tvary impulzů. Pokud byl tlak v nádobě nastaven na hodnotu 0,1 MPa, tak pouze u 7 impulzních napětí z celkového počtu 121 přesáhla celková doba trvání jejich průběhů délku 3  $\mu\text{s}$ . U standardizovaného impulzního napětí 1,2/50 po této době dokonce nedošlo ani k jedinému přeskoku mezi elektrodami. Doba  $T_c$  se pro impulzy při tlaku 0,1 MPa nejčastěji pohybovala v rozmezí od 1 do 2  $\mu\text{s}$ . Naopak při nejvyšším tlaku 0,3 MPa došlo k výraznému prodloužení doby  $T_c$ , která v některých případech přesahovala dobu 7  $\mu\text{s}$ .

Obr. 5.21 Průrazné napětí v závislosti na  $T_c$  pro tlak 0,1 MPa pro impulzní napětí kladné polarity

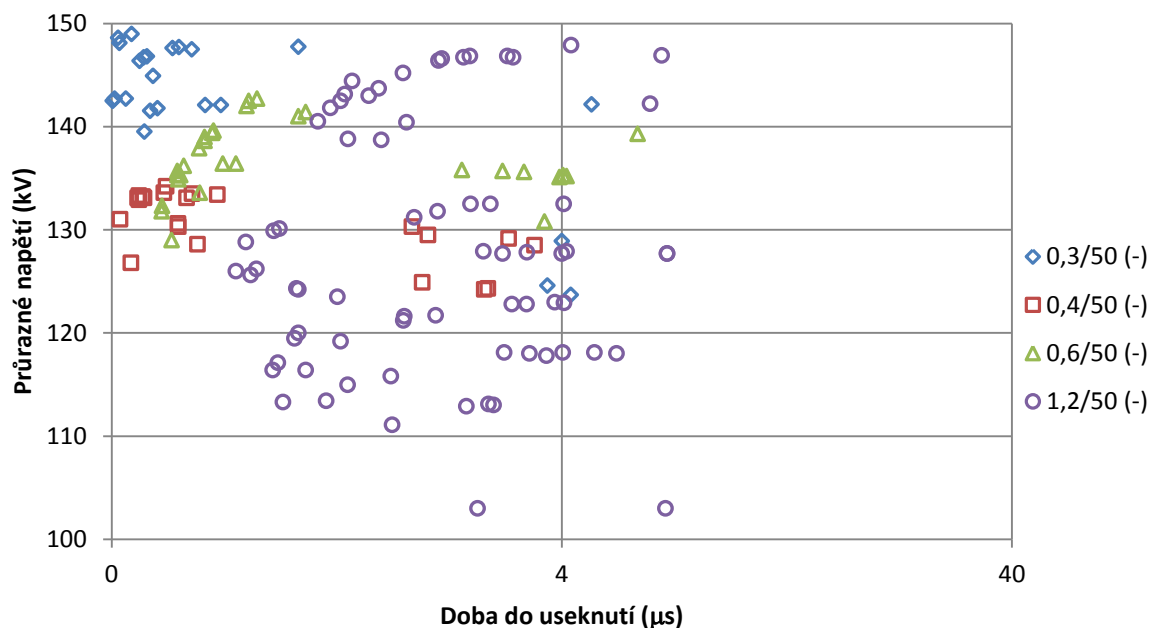
Obr. 5.22 Průrazné napětí v závislosti na  $T_c$  pro tlak 0,2 MPa pro impulzní napětí kladné polarityObr. 5.23 Průrazné napětí v závislosti na  $T_c$  pro tlak 0,3 MPa pro impulzní napětí kladné polarity

Impulzní napětí záporné polarity (Obr. 5.24 a Obr. 5.25) se chovala zcela opačným způsobem – se zvyšujícím se tlakem se doba trvání průběhů do okamžiku zhroutení napětí zkracovala. Při tlaku 0,2 MPa došlo pouze u 6 impulzů z celkového množství 157 k useknutí průběhu po době 5  $\mu\text{s}$ , u mnoha impulzů docházelo ke zhroutení napětí již před 1  $\mu\text{s}$ . Při nižším tlaku 0,1 MPa se doba  $T_c$  ztelně prodloužila, a ke zhroutení napětí po době 5  $\mu\text{s}$  došlo naopak až u jedné třetiny impulzů ze 109. U 8 impulzů z tohoto množství překročila doba do useknutí dokonce 9  $\mu\text{s}$ . Ze získaných výsledků lze jednoznačně usuzovat, že zkušební

impulzní napětí s různou dobou trvání  $T_1$  se za stejných podmínek chovají odlišným způsobem, a že modifikace tvaru zkušebního impulzu zaujímá velmi důležitou pozici při zkouškách impulzním napětím.



Obr. 5.24 Průrazné napětí v závislosti na  $T_c$  pro tlak 0,1 MPa pro impulzní napětí záporné polarity



Obr. 5.25 Průrazné napětí v závislosti na  $T_c$  pro tlak 0,2 MPa pro impulzní napětí záporné polarity

## Závěr

Standardní atmosférický impulz 1,2/50 definovaný normou ČSN EN 60060-1 se v současné době používá pro provádění zkoušek impulzním napětím izolačních systémů. Hlavním cílem této diplomové práce bylo ověřit, jaký vliv má variabilita tvaru standardizovaného atmosférického zkušebnímu impulznímu napětí na napěťovou pevnost izolace.

Úvodní teoretická část práce je zaměřena na objasnění základních pojmů problematiky zkoušek impulzním napětím. Dále jsou podrobně popsány časové průběhy a parametry zkušebních impulzních napětí, jak atmosférických, tak spínacích, přičemž důraz je kladen na atmosférická impulzní napětí, jejichž variabilitou tvaru se diplomová práce zabývá.

Třetí kapitola je věnována zkouškám impulzním napětím. Nejprve je zde uvedený ucelený přehled požadavků, které jsou na zkoušky impulzním napětím kladeny normou ČSN. Jsou zde popsány principy zkušebních postupů výdržným napětím a vymezena kritéria, která rozhodují o tom, zda zkoušený objekt danou zkouškou úspěšně projde, či nikoli. Způsob, jakým se generují zkušební atmosférická impulzní napětí, je popsán v následující části o rázových generátorech impulzního napětí, základních i víceúrovňových, přičemž vyšší pozornost je zde zaměřena na jeden z úkolů práce a to na analýzu faktorů zkušebního obvodu, kterými lze ovlivnit výsledný tvar generovaného zkušebnímu impulznímu napětí. Vzápětí jsou popsány principy druhů zkoušek impulzním napětím - metody zkoušky více hladinami, zkoušky metodou nahoru-dolů a zkoušky postupným namáháním, na základě jejichž výsledků se následně určuje hodnota průrazného napětí. Zde je nutné vyzdvihnout zkoušku metodou více hladinami, která byla využita v praktické experimentální části. Na zkoušky impulzním napětím plynule navazuje poslední část kapitoly popisující metodiku, prostřednictvím které se vyhodnocují parametry zkušebnímu atmosférickému impulznímu napětí. Zde je nezbytné poznamenat, že v současné době se atmosférická impulzní napětí vyhodnocují z tzv. „*křivky zkušebnímu napětí*“, a že úsilím výzkumných týmů na zpřesnění metodiky vyhodnocení atmosférických impulzních napětí stále pokračují.

Dalším úkolem bylo zpracovat přehled aktuálních poznatků o vlivu tvaru zkušebnímu atmosférickému impulznímu napětí na napěťovou pevnost izolace. V současné době se uskutečňuje mnoho experimentálních výzkumů, které zkoumají chování izolačních systémů



při jeho vystavování jinému než standardizovanému tvaru zkušebnímu atmosférického impulzního napětí. Izolační systémy totiž zpravidla během svého aktivního chodu čelí atmosférickým impulzním napětím, jejichž časové průběhy se značně liší od standardního průběhu 1,2/50. Proto je nezbytné dimenzovat izolační systémy elektrických zařízení co možná nejvíce efektivním způsobem i proti účinkům nestandardních atmosférických impulzních napětí, neboť např. v případě proražení izolace silového transformátoru dojde ke vzniku velké ekonomické ztráty. Na základě zjištěných poznatků z mezinárodních studií jsem provedl experimentální měření, které ověřuje vliv variability tvaru atmosférického impulzu na napěťovou pevnost izolace, a které je popsáno a vyhodnoceno v poslední kapitole této práce.

Experimentální měření se zabývalo testováním napěťové pevnosti syntetického vzduchu o složení 20 % O<sub>2</sub> a 80 % N<sub>2</sub>, který reprezentuje jednu z možných alternativ na místo použití plynu SF<sub>6</sub> zahrnutého v Kjótském protokolu, jako izolačního média. Experiment byl prováděn v silně nehomogenním poli, jehož stupeň homogenity byl v praktické kapitole vypočítán pomocí simulace v programu Agros2D. S ohledem na výsledky studií ze čtvrté kapitoly byla jako variabilní parametr zvolena doba čela zkušebnímu atmosférického impulzního napětí. Bylo ověřeno, že různá doba trvání čela atmosférického zkušebnímu impulzního napětí má zásadní vliv na průrazné chování izolace. Ukázalo se, standardizované atmosférické impulzní napětí 1,2/50 nemusí být dostatečně citlivé pro identifikaci případných vad izolace. Naopak jako vhodná atmosférická impulzní napětí se jeví impulzy s dobou trvání čela od 0,4 do 0,6 μs. Z charakteristiky průrazného napětí v závislosti na tlaku je pro záporná atmosférická impulzní napětí zřejmá určitá „*reverzace*“ projevující se různým chováním zkušebních impulzů s různou dobou trvání čela při nízkém a vysokém tlaku. Ověřováním vlivu polarity zkušebnímu atmosférického impulzního napětí bylo potvrzeno, že impulzy záporné polarity dosahují vyšších hodnot průrazných napětí než impulzy kladné polarity. Při zkoumání vlivu doby čela impulzu na dobu do useknutí se ukázalo, že hodnoty pro syntetický vzduch mají mnohem vyšší rozptyl než hodnoty dob plynu SF<sub>6</sub>. Bylo ale potvrzeno, že u impulzních napětí s krátkou dobou trvání čela docházelo k výbojům zpravidla v týlu impulzu. S prodlužující se dobou trvání čela však docházelo stále častěji ke zhroucení napětí v čele impulzu.

Variabilita čela atmosférického impulzního napětí má nezpochybnitelný vliv na průrazné chování izolace. Proto je nezbytné pokračovat v experimentálních měřeních tohoto druhu za účelem lepšího pochopení dějů, ke kterým zde dochází a měnit např. parametry půltýlu impulzu nebo parametry oscilujících impulzních napětí.

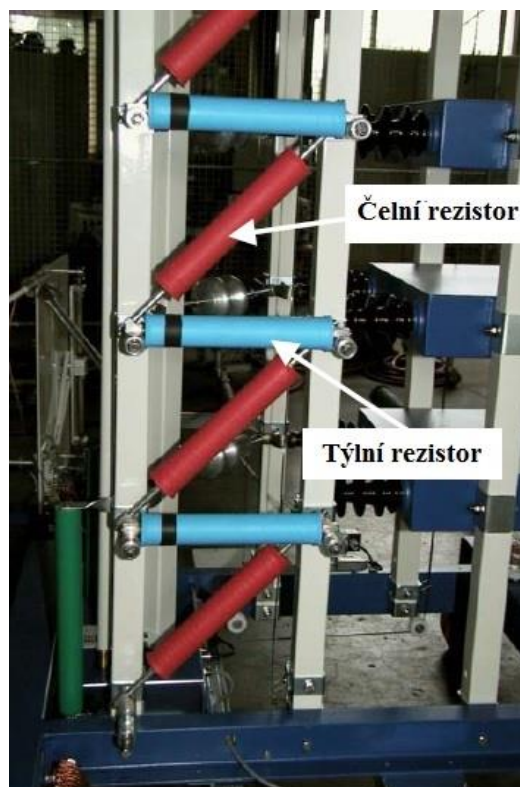
## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0189-6.
- [2] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí: vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty*. 2., přeprac. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1978, 295 s. Rada elektrotechnické literatury.
- [3] KUFFEL, E., W. S. ZAENGL a J. KUFFEL. *High voltage engineering: fundamentals*. 2nd ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000. ISBN 07-506-3634-3.
- [4] ČSN EN 60060-1. *Technika Zkoušek vysokým napětím – Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zastupitelství, 2011.
- [5] HAUSCHILD, Wolfgang a Eberhard LEMKE. *High-voltage test and measuring techniques*. Aufl. 2014. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. ISBN 978-364-2453-526.
- [6] WOLF, Jürgen a Klaus SCHWENK, GAMLIN, Michael, ed. *SGS Impulse Voltage Generator*. 2006.
- [7] SIMA, Wenxia, Jingyu WU, Potao SUN, Ming YANG a Jiefang HUA. Breakdown characteristics of oil-impregnated paper and influential factors for damped alternating oscillation waveforms. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 2016, **23**(4), 2079-2087 [cit. 2018-03-01]. DOI: 10.1109/TDEI.2016.7556481. ISSN 1070-9878. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7556481/>
- [8] NI, Heli, Yuan LI, Weixiong YUAN, Meng GAO, Yuqin DING, Yi ZHAO, Qiaogen ZHANG a Zhe WANG. Dependence of the impulse strength of typical insulation structures in oil-immersed transformer on waveshapes. *2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL)* [online]. IEEE, 2017, 2017, , 1-4 [cit. 2018-03-01]. DOI: 10.1109/ICDL.2017.8124662. ISBN 978-1-5090-4877-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8124662/>
- [9] LI, Junhao, Degui HU, Liang ZHANG a Bin CHE. Dielectric breakdown characteristics of the rod-plane electrode system in SF<sub>6</sub> gas under oscillating impulse voltage. *2016 IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC)* [online]. IEEE, 2016, 2016, , 38-311 [cit. 2018-03-01]. DOI: 10.1109/IPMHVC.2016.8012845. ISBN 978-1-5090-2354-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8012845/>
- [10] WEN, Tao, Qiaogen ZHANG, Lingli ZHANG, Jiangtan MA, Min CHEN, Naoyuki SHIMOMURA a Zhibing LI. Research on impulse withstand test effectiveness from insulation characteristics of SF<sub>6</sub> gas gap with highly inhomogeneous

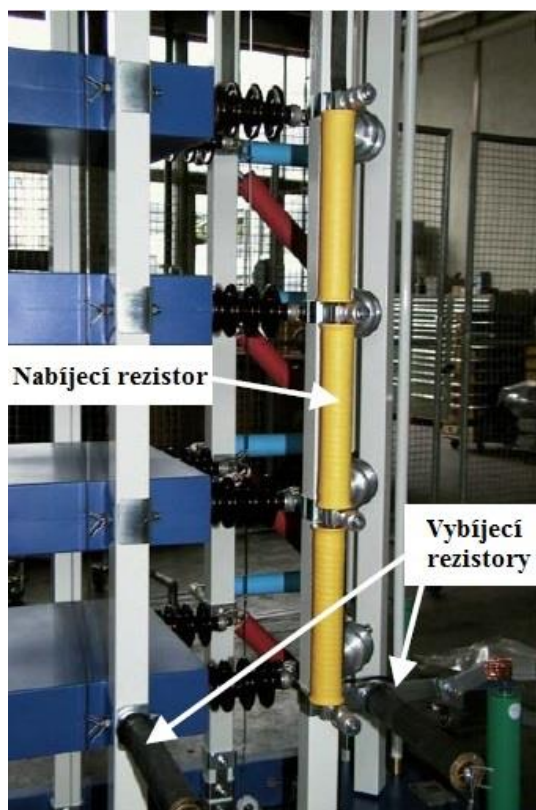
- electric field. *2017 1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE)* [online]. IEEE, 2017, 2017, , 482-485 [cit. 2018-03-01]. DOI: 10.1109/ICEMPE.2017.7982134. ISBN 978-1-5090-5736-8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7982134/>
- [11] WEN, Tao, Qiaogen ZHANG, Lingli ZHANG, et al. Discussion on lightning impulse test waveform according to breakdown characteristics of SF<sub>6</sub> gas gaps. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 2017, **24**(4), 2306-2313 [cit. 2018-03-01]. DOI: 10.1109/TDEI.2017.006605. ISSN 1070-9878. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8035406/>
- [12] *NPTEL: IIT KANPUR* [online]. [cit. 2018-03-29]. Dostupné z: <http://nptel.ac.in/courses/108104048/3>
- [13] HAMA, Hiroyuki a Shigemitsu OKABE. Factors dominating dielectric performance of real-size gas insulated system and their measures by dielectric coatings in SF<sub>6</sub> and potential gases. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* [online]. 2013, **20**(5), 1737-1748 [cit. 2018-03-31]. DOI: 10.1109/TDEI.2013.6633704. ISSN 1070-9878. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6633704/>
- [14] BORG, Xavier. *Blaze labs research* [online]. 2004 [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <http://blazelabs.com/index.htm>

## Přílohy

### Příloha A – Rázový generátor Haefely



Obr. 1 Čelní a týlní rezistory rázového generátoru (převzato z [6])



Obr. 2 Nabíjecí a vybíjecí rezistory rázového generátoru (převzato z [6])



Obr. 3 Potenciální rezistory rázového generátoru (převzato z [6])



Obr. 4 Zemnicí spínače rázového generátoru (převzato z [6])



Obr. 5 Ocelové zemnicí pásy rázového generátoru (převzato z [6])

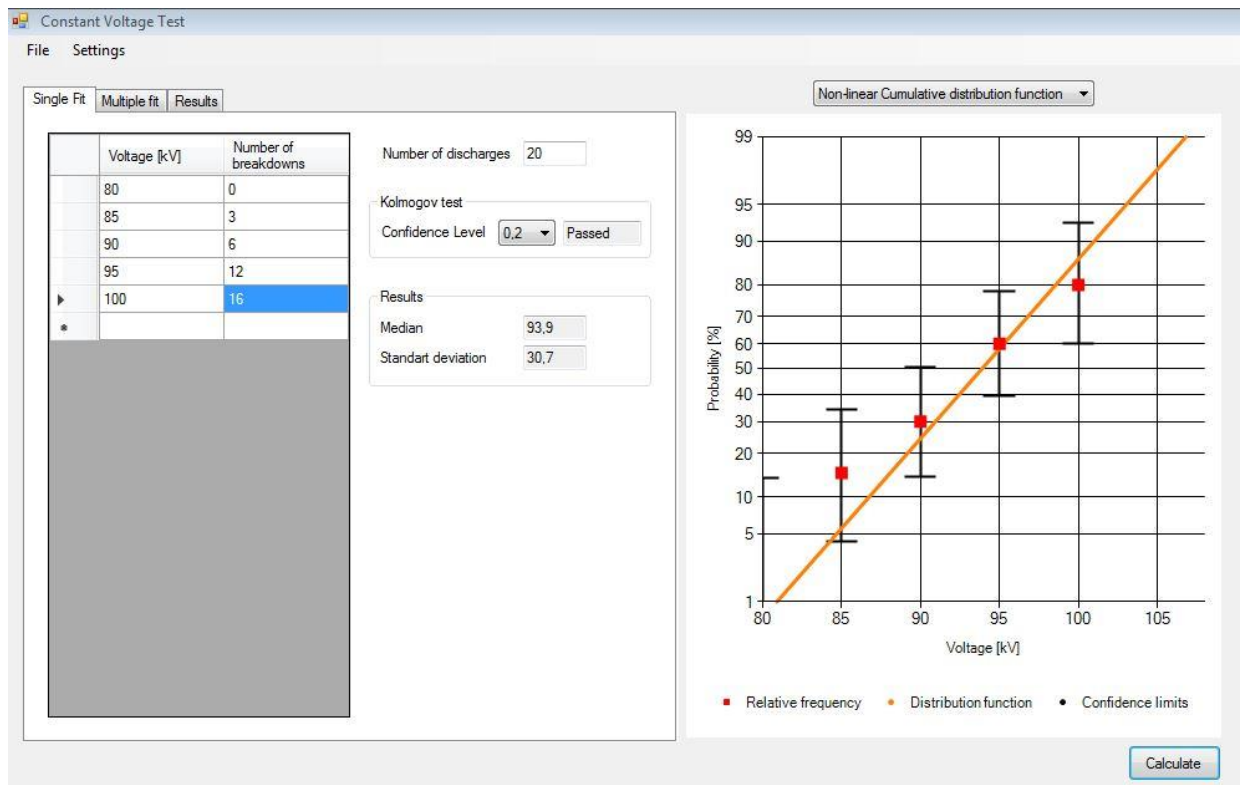


Obr. 6 Ovládací jednotka rázového generátoru



*Obr. 7 Centrální řídicí jednotka a nabíjecí jednotka s transformátorem a usměřovačem*

**Příloha B – Prostředí statistického softwaru pro vyhodnocení napětí  $U_{50}$**



Obr. 8 Prostředí statistického softwaru pro vyhodnocení napětí  $U_{50}$