

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Reprodukovatelnost výsledků při měření průrazného
napětí izolačního média**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

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

Jméno a příjmení: **Bc. Martin ZEMAN**
Osobní číslo: **E13N0090P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Reprodukovatelnost výsledků při měření průrazného napětí izolačního média**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Zpracujte přehled postupů a požadavků na zkoušky impulzním napětím podle ČSN EN 60060-1.
2. Analyzujte faktory ovlivňující reprodukovatelnost testů impulzním napětím.
3. Experimentálně ověřte vliv variability některých parametrů testu na výsledky a ze získaných poznatků vyvodte doporučení pro zkušební postup.

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


1. ČSN EN 60060-1
2. <http://knihovna.zcu.cz/elektronicke-informacni-zdroje/>

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

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**


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




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

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na opakované měření průrazu izolačního média při použití atmosférického impulsu a zjištění možností reprodukovatelnosti změřených hodnot. Práce se blíže zabývá určitými druhy modelových uspořádání laboratorních zapojení, při kterých byly zjištěny opakující se anomálie naměřených hodnot, a na základě kterých docházelo ke zkreslení statistického vyhodnocení konkrétního zkušebnímu testu.

Hlavním bodem této práce bylo nalezení uspořádání laboratorního zapojení, kde se nejčastěji vyskytovaly anomálie nebo se nejvíce projevíly ve výsledcích. Cílem této práce bylo pomocí opakovaného měření laboratorních úloh analyzovat vlastnosti anomálií při dodržení či změně některých parametrů.

Klíčová slova

Atmosférický impuls, rázový impuls, rázový generátor, impulzní generátor, Marxův generátor, impuls 1,2/50, měření, ČSN EN 60060-1, jiskřiště, statistické vyhodnocení

Abstract

This thesis is about repeated measurements of breakdown voltage in gas insulation system using standardized Lightning Impulse-voltage in High-Voltage Laboratory to determine the possibilities of measurement reproducibility in connection with the standards. It focuses on laboratory test configuration where the anomalies were discovered. This anomalies cause errors in results and decrease the reproducibility of measurements.

The main point of this thesis was to find the laboratory test configuration with many anomalies and the lowest reproducibility of measured results. The aim of this work was to analyze and describe anomalies behaviour.

Keywords

Atmospheric impulse, Lightning impulse, surge generator, impulse generator, Marx generator, 1,2/50 impuls, measuring, ČSN EN 60060-1, spark-gap, statistical evaluation

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 10.5.2015

Martin Zeman

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí své diplomové práce doc. Ing. Evě Müllerové, Ph.D. za metodické vedení práce, odborné rady a obětavý přístup při realizaci celé práce. Velmi si cením jejího pracovního nasazení, časovou flexibilitu, trpělivost a pomoc při měření ve vysokonapěťové laboratoři.

Dále bych rád poděkoval Bc. Františku Kováčovi za poskytnutí softwaru pro vyhodnocení výsledků zkušebních testů.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 ÚVOD	11
2 ATMOSFÉRICKÝ IMPULS	13
2.1 PŘIROZENÝ VZNIK A OCHRANA.....	13
2.2 NORMALIZOVANÝ ATMOSFÉRICKÝ IMPULS.....	14
2.2.1 Plný atmosférický impuls (full lightning impulse voltage).....	18
2.2.2 Useknutý atmosférický impuls (chopped lightning-impulse voltage).....	20
2.3 GENEROVÁNÍ ZKUŠEBNÍHO NAPĚTÍ.....	22
3 ZKUŠEBNÍ POSTUPY	25
3.1.1 Zkoušky výdržným napětím	25
3.1.2 Zkoušky výdržným napětím: postup A.....	26
3.1.3 Zkoušky výdržným napětím: postup B.....	26
3.1.4 Zkoušky výdržným napětím: postup C.....	26
3.1.5 Zkoušky výdržným napětím: postup D.....	27
3.2 STATISTICKÉ ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK	28
3.2.1 Třída 1: Zkoušky více hladinami.....	28
3.2.2 Třída 2: Zkoušky metodou nahoru-dolů.....	30
4 REPRODUKOVATELNOST TESTŮ ATMOSFÉRICKÝM NAPĚTÍM	33
4.1 KOEFICIENT NEHOMOGENITY, SCHWAIGRŮV KOEFICIENT	33
4.2 ČÁSTEČNÉ VÝBOJE	34
4.3 VLIV REÁLNÉHO USPOŘÁDÁNÍ ZA ZKUŠEBNÍ TEST	36
4.3.1 Velikost mezery jiskřiště.....	38
4.3.2 Druh aplikovaného napětí.....	40
4.3.3 Tvar elektrod a geometrie okolí.....	42
4.3.4 Zdrojová impedance.....	44
4.3.5 Atmosférické podmínky.....	48
5 ZKUŠEBNÍ TESTOVÁNÍ	50
5.1 STANOVENÍ ZÁKLADNÍCH POŽADAVKŮ.....	50
5.2 VÝSLEDKY TESTŮ	51
6 ZÁVĚR A ZHODNOCENÍ	57
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	62
PŘÍLOHY	64

Seznam symbolů a zkratek

β	Velikost překmitu	[V]
β'	Relativní velikost překmitu	[-]
η	Schwaigerův koeficient	[-]
BD	BreakDown (průraz, průrazný výboj)	
f	Frekvence	[Hz]
$k(f)$	Funkce zkušebního napětí	[1/Hz ²]
k_i	Počet průrazných výbojů	[-]
LI	Lightning impulse voltage (překlad: atmosférické impulsní napětí)	
m	Počet skupin přiložení napětí	[-]
n_i	I-tá napěťová hladina	[-]
p	Pravděpodobnost průrazného výboje	[%]
PD	PartialDischarge (překlad: částečný výboj)	
RG	Rázový generátor	
s	Směrodatná odchylka	[%]
S	Zdánlivá strmost	[kV/ μ s]
T_1	Doba čela	[s]
T_2	Doba pultýlu	[s]
T	Doba trvání čela od 30% do 90% U_t	[s]
T'	Doba od počátku O do 30	[s]
T_e	Doba do vrcholu	[s]
T_c	Doba useknutí impulzu	[s]
T_λ	Časový interval napětí	[s]
U_{10}	Hodnota napětí s 10% pravděpodobností průrazného výboje	[V]
U_{50}	Hodnota napětí s 50% pravděpodobností průrazného výboje	[V]
$U_{50,1}$	Hodnota U_{50} u smíšeného rozdělení pravděpodobnosti pro napěťově nižší distribuční přímku	[V]
$U_{50,2}$	Hodnota U_{50} u smíšeného rozdělení pravděpodobnosti pro napěťově vyšší distribuční přímku	[V]
U_{90}	Statistické zaručené výdržné napětí	[V]
U_{100}	Hodnota napětí se 100% pravděpodobností průrazného výboje	[V]
U_b	Vrcholová hodnota základní křivky	[V]

U_e	Vrcholová hodnota zaznamenané křivky	[V]
U_i	Hodnota napětí i-té napěťové hladiny	[V]
U_p	Odhad napětí průrazného výboje	[V]
U_t	Vrcholová hodnota křivky zkušebního napětí	[V]
U_v	Výdržné napětí	[V]
w	Pravděpodobnost průrazu	[%]

1 Úvod

První část této diplomové práce se zabývá teoretickými znalostmi a druhá část analýzou výsledků zkušebních testů. Závěr a zhodnocení této práce obsahuje shrnutí dosavadních znalostí v oblasti reprodukovatelnosti měření atmosférickým impulzem a nové informace a poznatky získané po zpracování této diplomové práce.

Teoretická část je zaměřena na základní postupy používané při zkouškách impulzním napětím ve vysokonapěťové laboratoři a na vysvětlení základních pojmů potřebných k pochopení naměřených výsledků, vyřčených závěrů a práce jako takové. Stěžejní literaturou pro práci byla technická norma [1] a zahraniční výzkumy [12] a [13], které jsem využil pro vytvoření harmonogramu měření v laboratoři a pro analýzu změřených výsledků.

Teoretický popis začíná fyzikální podstatou atmosférického impulsu a objasňuje důležitost jeho použití při měření ve vysokonapěťové laboratoři. Základní definice, pojmy, postupy měření a statistické vyhodnocení byly čerpány z technické normy **ČSN EN 60060-1: Technika zkoušek vysokým napětím – Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky**. Tato norma přesně definuje pojmy, slovní spojení a postupy pro kompletní popis problematiky v tomto oboru. Samostatná kapitola je věnována schematickému znázornění zapojení rázového generátoru a jeho zjednodušenému funkčnímu popisu. Dále je uveden popis měřicí soustavy, která byla pro zkoušení použita.

Velmi důležitá je kapitola **4.3 VLIV REÁLNÉHO USPOŘÁDÁNÍ ZA ZKUŠEBNÍ TEST**, která čerpá ze zahraničních výzkumů v oboru vysokonapěťového měření převážně provedených v 70. letech 20. století a autorem je pan Prof. Dr. – Ing. Dr. h. c. Kurt Feser. Výzkum tohoto autora se jako jeden mála zabývá reprodukovatelností měření při aplikování různých napětí ve vysokonapěťové laboratoři na vertikálním jiskřišti, přesností naměřených hodnot a fyzikálním vysvětlením dějů, které byly vyzorovány při měření v laboratoři. Cílem těchto výzkumů byla snaha objasnit původ některých nepřesností v měřených hodnotách nebo odchylkách od očekávaných trendů.

Druhá část práce je věnována měření ve vysokonapěťové laboratoři. Je zde uveden postup výběru zkušebního testu, u kterého výsledky vykazovaly nejnižší míru

reprodukovatelnosti a nejvyšší výskyt anomálií. Provedená měření jsou opatřena komentářem, v němž je uvedena výchozí situace, důvod pro provedení daného typu měření a podmínek, za nichž mělo být měření ověřeno. Každé měření je statisticky vyhodnoceno pomocí softwaru a grafické znázornění pravděpodobnosti průrazu v závislosti na zvyšujícím se napětí je uvedeno na konci této práce v kapitole **PŘÍLOHY**.

2 Atmosférický impuls

2.1 Přirozený vznik a ochrana

Vznik atmosférického výboje je podmíněn nahromaděním náboje v určitém místě a polarizováním tohoto místa. Může vzniknout mezi dvěma mraky nebo mezi mrakem a zemí. Elektrotechnické zkušebnictví se zajímá spíše o výboj mezi mrakem a zemí, před kterým je nutné chránit budovy, elektrická vedení, vysílací zařízení apod. Šíření výbojů může probíhat od mraku k zemi (sestupný blesk) nebo od země k mraku (vzestupný blesk). Výskyt vzestupného blesku je velmi ojedinělý a nejčastěji je způsobený horskými vrcholy, velmi vysokými budovami, rádiovými či telekomunikačními vysílači nebo stožáry. [3, s. 12-15]

Nejčastěji se v přírodě vyskytuje případ, představující záporný výboj mrak-zem (až 90 % ze všech výskytů výbojů). Mrak se skládá z horní a dolní části. V horní části jsou kladně nabitě sněhové vločky a v dolní části jsou těžší kusy ledu se záporným nábojem. Zemský povrch se proti tomuto mraku polarizuje opačně (vytvoří se kladný náboj) a po překročení kritické intenzity elektrického pole mezi mrakem a zemí (přibližně 100 kV/m) dochází ke vzniku atmosférického výboje, neboli blesku. [4, s. 12]

Rozdíl amplitud napětí mezi mrakem a zemí se pohybuje obvykle v řádu 1000 kV a více a může injektovat bleskové proudy i více než 100 kA do přenosové elektrické linky. Každý úder blesku je doprovázený postupnou vlnou, u které je amplituda limitována velikostí blesku a způsobem přestupu na vedení. Úroveň napětí lze jednoduše vypočítat z Ohmova zákona, kdy závisí na bleskovém proudu a velikost impedance elektrického vedení. [5]

U zařízení, které tomuto impulsu může být vystaveno, je požadováno, aby nebyla nijak ovlivněna jeho funkčnost a aby bylo odolné vůči těmto rušivým vlivům. Dimenzování bleskosvodů, zemních lan a elektrického zařízení s ohledem na impuls ve tvaru atmosférického přepětí vyžaduje důkladnou znalost elektrické pevnosti vzduchu. Vzduch je nejdůležitějším izolačním materiálem v oblasti velmi vysokého napětí. Důvodů je celá řada a mezi nejdůležitější patří dostupnost vzduchu, ekonomická výhodnost a jednoduchost údržby. Rozptyl spolu s U_{50} , vede k určení výdržného napětí U_v nebo 100% průrazného impulsního napětí U_{100} . [4][1]

2.2 Normalizovaný atmosférický impuls

Jedná se o druh impulsního napětí (*impulse voltage*), který má dobu čela kratší než 20 μs a jeho název definuje norma jako: Atmosférické impulsní napětí (*Lightning-impulse voltage*). Obecné impulsní napětí je aperiodické přechodné napětí, jehož časový průběh je složen z doby růstu do vrcholové hodnoty (čela) a doby poklesu k nule (týlu). Bývá pravidlem, že doba čela je několikanásobně kratší, než doba týlu. Pro zvláštní účely se používají impulsy s lineárním růstem, přechodně oscilující, nebo přibližně pravoúhlého tvaru. [1, s. 33]

Rozlišují se dva druhy normalizovaného atmosférického impulsního napětí: plný (*full lightning-impulse voltage*) a useknutý (*chopped lightning-impulse voltage*). [1, s. 26, 30]

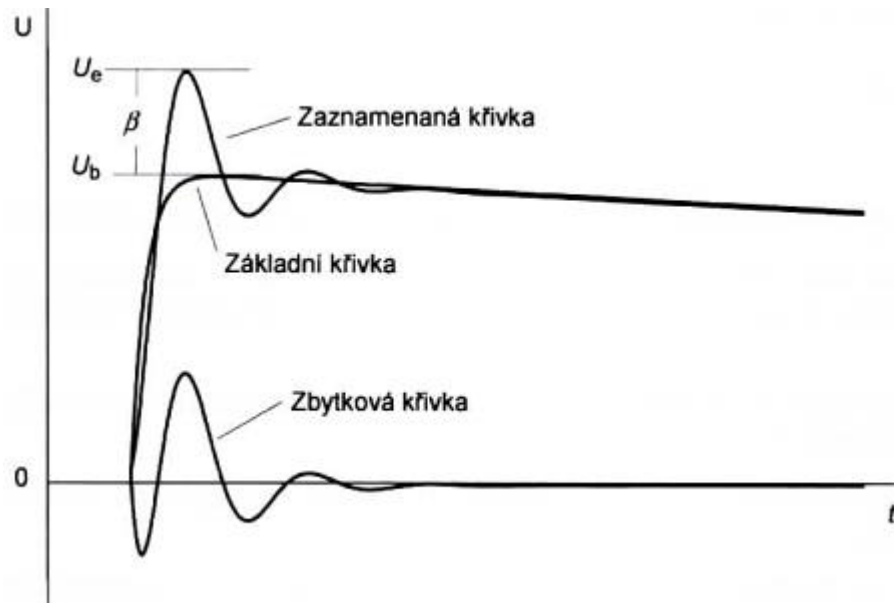
Ideálním normalizovaným charakteristikám se lze však v reálném světě pouze přiblížit. Zkreslení časového průběhu či zanesení některých parazitních vlivů způsobuje technická konstrukce rázového generátoru, parazitní vlastnosti elektrotechnického obvodu pro generování časového průběhu napěťové křivky, parametry připojeného zkoušeného zařízení či vliv okolního prostředí. [1, s. 26-37] [2]

Velmi nežádoucí vlastností je překmit (*overshoot*) napětí, který je nutné u každé měřicí aparatury co nejvíce omezit. Ve vrcholu napěťového impulsu dochází k nárůstu amplitudy v důsledku tlumených oscilací způsobených indukčností obvodu o frekvencích v rozmezí 0,1 – 2 MHz. Často jim nelze zabránit u zkoušek rozměrných obvodů či obvodů s velkou indukčností. [1]

Překmit je možné popsat těmito parametry: velikost překmitu (*overshoot magnitude*) β [V] a relativní velikost překmitu (*relative overshoot magnitude*) β' [%]. Jsou dány rozdílem mezi krajními hodnotami naměřených napětí. Tyto hodnoty jsou odečítány z osciloskopu ze zaznamenané křivky průběhu napětí v závislosti na čase. [1]

Pokud technická komise pro danou laboratorní zkoušku nestanoví přísnější kritérium, akceptují se odchylky od normalizovaného impulsu v těchto mezích [1, s. 33]:

- Vrcholová hodnota křivky zkušebního napětí $U_t \pm 3\%$
- Doba čela $T_1 \pm 30\%$
- Doba půltýlu $T_2 \pm 20\%$
- Relativní velikost překmitu $\beta' \leq 10\%$



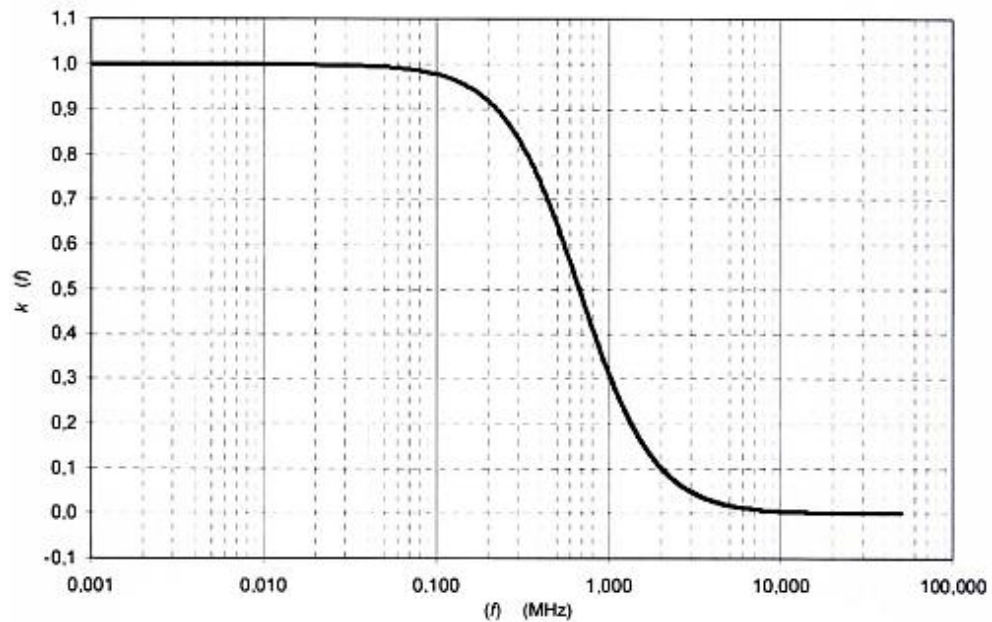
Obr. 1 Časový průběh zaznamenané a základní křivky s ukázkou překmitu a zbytkové křivky (převzato z [1, s. 51])

Na Obr. 1 je vidět normou definované pojmy, kterými je popsán teoretický vs. reálný atmosférický impuls. Zaznamenaná křivka (*recorded curve*) je časový průběh impulsního napětí zaznamenaný při testu osciloskopem. Tato křivka obsahuje superponované oscilace. Základní křivkou (*base curve*) nazveme odhad plného atmosférického impulzního napětí bez superponovaných oscilací a zbytková křivka (*residual curve*) je rozdíl mezi zaznamenanou křivkou a základní křivkou. [1, s. 50-53]

Funkce zkušebního napětí $k(f)$, viz Obr. 2 je amplitudově-kmitočtová funkce, která slouží k interpretaci odezvy izolace na impulzy s překmitem pro účely vyhodnocení dle tohoto vztahu [1]:

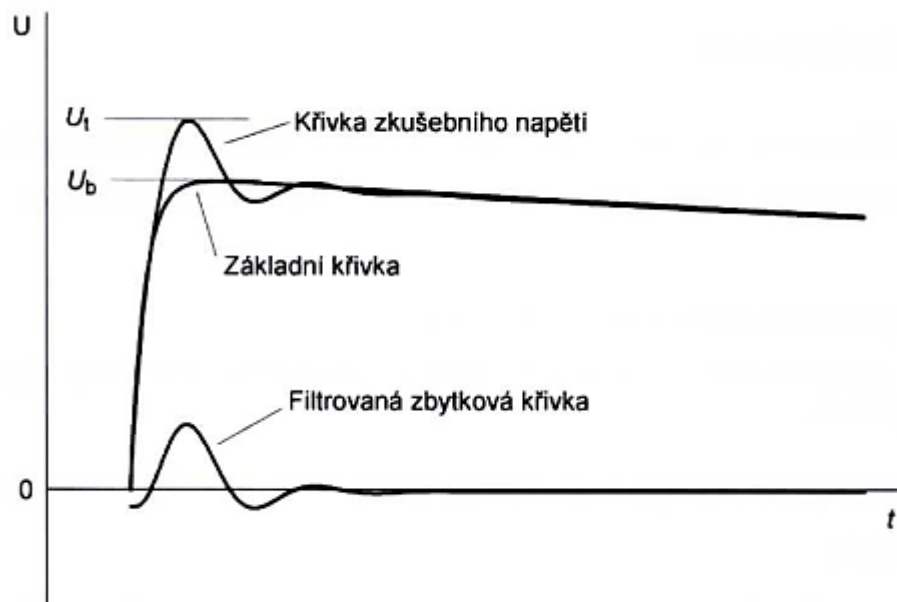
$$k(f) = \frac{1}{1+2,2f^2} \quad (2.2-1)$$

kde: f kmitočet



Obr. 2 Funkce zkušebního napětí jako funkce frekvence (převzato z [1])

Bude-li tato funkce použita jako filtr na zbytkovou napěťovou křivku, bude tím umožněn výpočet hodnoty zkušebního napětí ekvivalentní plnému atmosférickému impulzu napětí, který je uveden ve vzorci 2.2.-2. Tuto aplikaci je možné názorně vidět na *Obr. 3* a *Obr. 4*. Křivka zkušebního napětí (*test voltage curve*) je dána součtem základní křivky a filtrované zbytkové křivky. [1]



Obr. 3 Časový průběh křivky zkušebního napětí – součtu základní křivky a filtrované zbytkové křivky (převzato z [1, s. 51])



Obr. 4 Časový průběh zaznamenané křivky a křivky zkušebního napětí (převzato z [1, s. 51])

Pokud není možné realizovat pro některé druhy zkoušených zařízení určené tvary vln s normalizovanými tolerancemi, je dovoleno upravit normalizovaný atmosférický impulz tak, že se prodlouží dobu čela T_1 nebo zvětší překmit β . Zkušební napětí U_t je hodnota, které je vystavena izolace při zkoušce atmosférickým impulsním napětím s velikostí překmitu β . Je to také maximální hodnota křivky zkušebního napětí měřená od základní hladiny stejným způsobem jako aplikovaný impulz, definována vztahem [1]:

$$U_t = U_b + k(f) \times (U_e - U_b) [V] \quad (2.2-2)$$

kde: U_b maximální hodnota základní křivky (*base curve maximum*)

U_e maximální hodnota zaznamenané křivky měřené od základní hladiny ve stejném smyslu jako přiložený impulz

Velikost překmitu (*overshoot magnitude*) β , je definován jako [1]:

$$\beta = U_e - U_b [V] \quad (2.2-3)$$

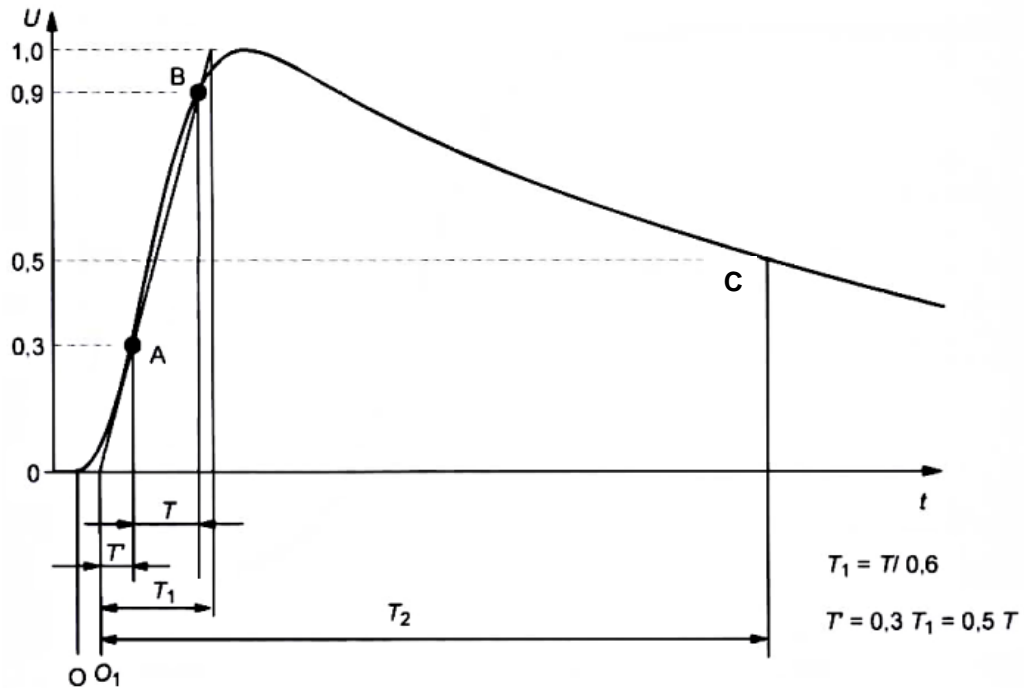
Relativní velikost překmitu (*relative overshoot magnitude*) β' , je definován jako [1]:

$$\beta' = \frac{U_e - U_b}{U_e} * 100 [\%] \quad (2.2-4)$$

2.2.1 Plný atmosférický impuls (full lightning impulse voltage)

V normě ČSN EN 60060-1, která je v [1], je uvedena tato definice:

“Normalizovaný atmosférický impuls napětí je hladký plný atmosférický impuls napětí, který má dobu čela 1,2 μ s a dobu půltýlu 50 μ s. Je popsán jako impuls 1.2/50.”



Obr. 5 Časové parametry plného impulsu napětí (převzato z [1, s. 28])

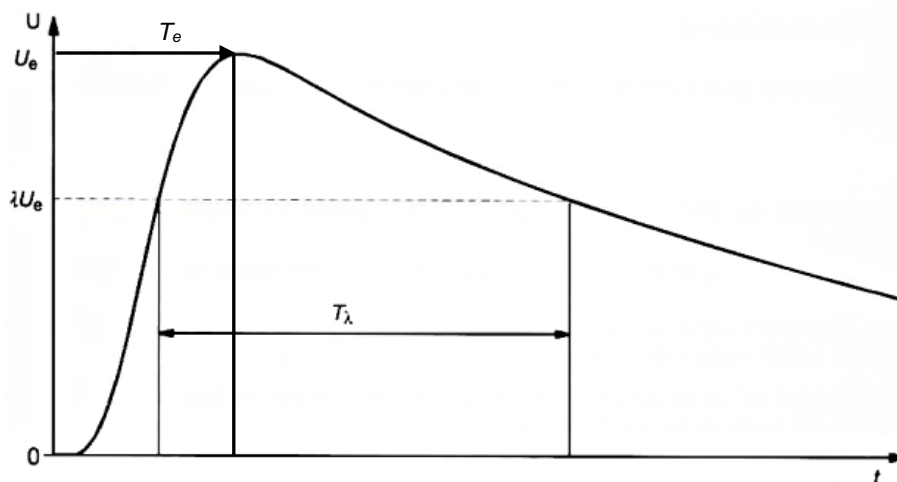
Obr. 5 popisuje časový průběh plného atmosférického impulsu. Časový průběh charakteristiky napětí začíná ve zdánlivém počátku O (*virtual origin*), narůstá přes body A ($0,3U_t$) a B ($0,9U_t$) do vrcholové hodnoty zkušební napětí a dále klesá do bodu C ($0,5U_t$) a níže k nule. Nabíjecí i vybíjecí charakteristiky mají exponenciální průběh. [1]

V případě záznamu rázové charakteristiky s lineární časovou osou je zdánlivý počátek O_1 dán průsečíkem přímky proložené referenčními body A, B s časovou osou x. Časový parametr $T_1 = \frac{T}{0,6}$ [s] je definovaný jako doba čela (*front time*). Je to časový úsek, za který dosáhne impuls velikosti 100 % amplitudy zkušební napětí. [1]

Doba půltýlu (*time to half-value*), značená T_2 , se měří mezi zdánlivým počátkem O_1 a okamžikem, kdy napětí klesne na 50 % vrcholové hodnoty zkušební napětí. [1]

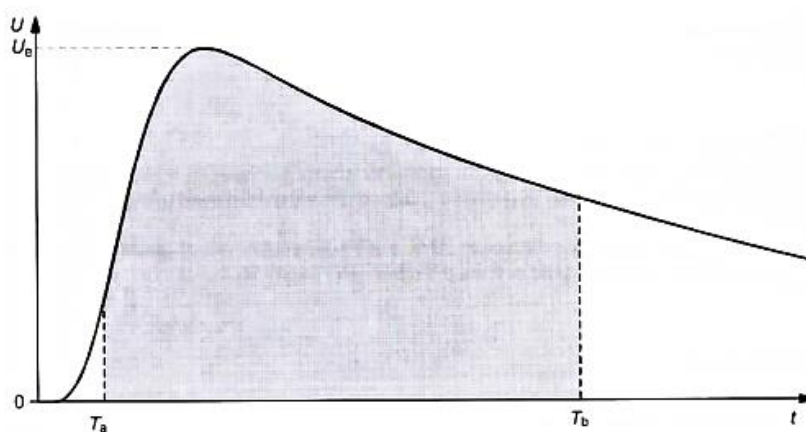
Průměrná strmost (*average rate to rise*) udává sklon nejlépe proložené přímky mezi krajními hladinami napětí odbodu A do B užitím všech měřených bodů mezi těmito

napětíovými hladinami. V případě šumu nebo oscilací v krajních hladinách napětí se do souboru měřených dat uvažuje pouze první bod po posledním přechodu hladiny 30 % a poslední bod před prvním překročením hladiny 90 %. [1]



Obr. 6 Časové parametry plného impulsu napětí (převzato z [1])

Na Obr. 6 je zakreslena doba do vrcholu T_e (peak time), která je definována jako podíl krajní hodnoty U_e a průměrné strmosti. Časový interval napětí T_λ (voltage time interval) je časový údaj, v němž má zaznamenaná křivka vyšší hodnotu napětí, než: $\lambda * U_e$, kde $0 < \lambda < 1$. [1]



Obr. 7 Integrál napětíové křivky (převzato z [1])

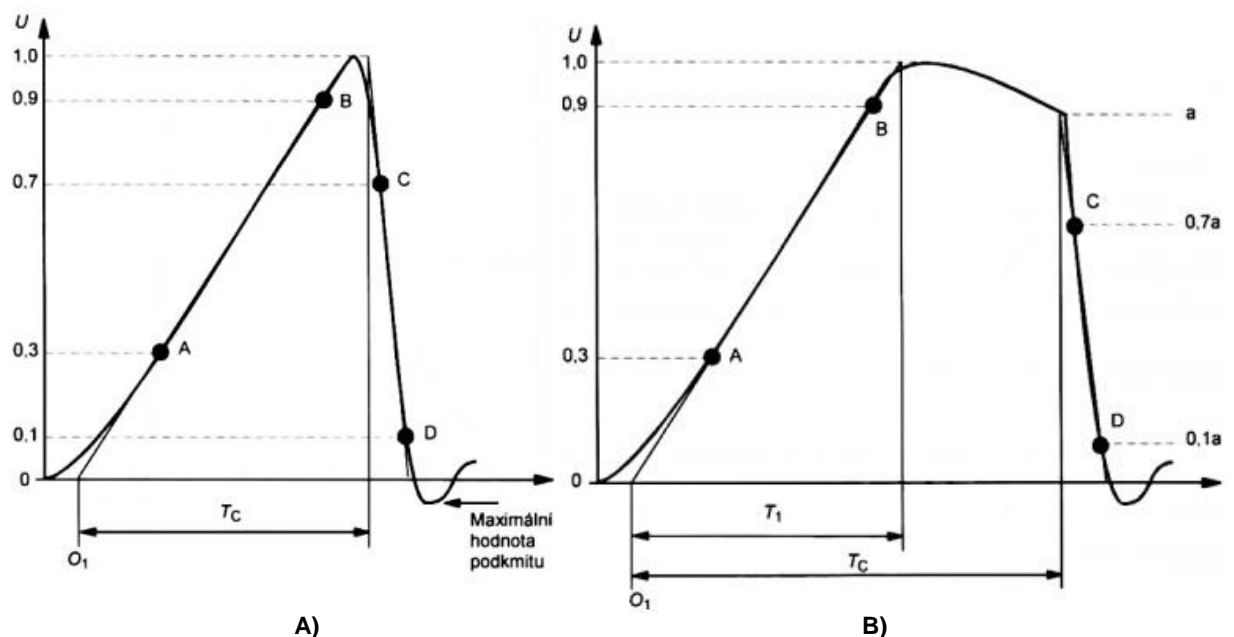
Doba do vrcholu T_e (Obr. 6), časový interval napětí T_λ a zvýrazněná plocha pod napětíovou křivkou znázorňující integrál této křivky (Obr. 7), jsou parametry, které se používají pro alternativní charakterizování atmosférického impulsu ve speciálních zkušebních případech, kdy není možné dodržet běžně stanovené toleranční meze. [1]

2.2.2 Useknutý atmosférický impuls (chopped lightning-impulse voltage)

Za normalizovaný useknutý atmosférický impuls napětí se považuje impuls useknutý vnějším jiskřištěm v době po $2 \mu\text{s}$ až $5 \mu\text{s}$, tzn. v době trvání týlu. Platí zde pravidlo, že doba trvání zhroucení napětí by měla být mnohem rychlejší, než doba čela. Podrobněji se tím zabývá norma **ČSN EN 60060-2: Technika zkoušek vysokým napětím – Část 2: Měřicí systémy**. [1]

Useknutí impulsu před jeho plynulým ukončením může být požadované nebo nechtěné. Požadovaného useknutí se docílí připojením vnějšího usekávacího jiskřiště a jedná se o druh zkušebního napětí. Nechtěné useknutí je způsobeno průrazným výbojem, což způsobí, že zkoušený objekt v provedené zkoušce nevyhoví. [1]

V některých případech je nutné použít zvláštní atmosférický impuls napětí. Impulsy mohou mít kratší dobu čela nebo krajní hodnoty odpovídající činiteli využití generátoru většímu než 1. Více informací viz **ČSN EN 60060-3: Technika zkoušek vysokým napětím – Část 3: Definice a požadavky na zkoušky na místě**. [1]



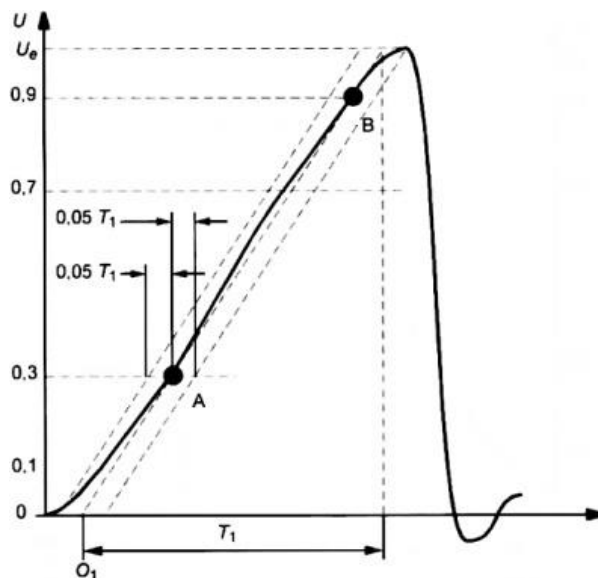
Obr. 8 Atmosférické impulsní napětí: A) useknuté v čele; B) useknuté v týlu (převzato z [1])

Na Obr. 8A, 8B a 9 jsou znázorněny časové průběhy useknutých atmosférických napětí. V průběhu procesu useknutí impulsu dojde k průraznému výboji, který způsobí rychlý pokles napětí, neboli zhroucení, na téměř nulovou hodnotu. Průběh zhroucení napětí definují body C a D, které v případě useknutí v čele odpovídají hodnotě 70 % a 10 % vrcholového napětí a v

případě useknutí v týle odpovídají hodnotě 70 % a 10 % z napětí v okamžiku zhroucení. Body C a D slouží pouze k teoretické definici děje. [1, s. 30-31]

Okamžik useknutí (*instant of chopping*) se určí extrapolovanou přímkou mezi těmito body, a to protnutím křivky v době před zhroucením, kdy napětí překročí hladinu napětí těsně před zhroucením (Obr. 8B). Časový interval T_C mezi zdánlivým počátkem O_1 a okamžikem useknutí se nazývá dobou do useknutí (*time to chopping*). [1]

Zhroucení napětí může mít za následek podkmit (*undershoot*) impulsu, který je vidět na Obr. 8A), kdy se na zkoušeném předmětu objeví záporná polarita impulsního napětí. Jeho velikost se měří v opačném smyslu od základní hladiny k přiloženému impulsu a nazývá se krajní hodnota podkmitu impulsu (*extreme value of the undershoot of an impulse*). [1]



Obr. 9 Usekнутý atmosférický impuls s lineárně rostoucím čelem (převzato z [1])

Zvláštním případem může být usekнутý impuls s lineárně rostoucím čelem (*linearly rising front-chopped impulse*), kde napětí roste ze zdánlivého počátku O_1 přibližně konstantní strmostí od 30 % do 90 % vrcholového napětí a v těchto hladinách napětí vytváří body A a B. Tolerance linearity nárůstu je dána dvěma hraničními rovnoběžnými přímkami s přímkou AB ve vzdálenosti $\pm 0,5 * T_1$, případně tuto toleranci může stanovit technická komise. [1]

Impuls je definovaný maximálním napětím U_e , dobou čela T_1 a zdánlivou strmostí [1]:

$$S = \frac{U_e}{T_1} \text{ [kV}/\mu\text{s}] \quad (2.2.2-1)$$

2.3 Generování zkušebního napětí

Ke generování požadovaných křivek napětí se používá rázový generátor, neboli Marxův generátor, který byl vynalezen roku 1924. Schéma zapojení vícestupňového generátoru HAEFELY, používaného v univerzitní VN laboratoři, je uvedeno na *Obr. 10*. [2]

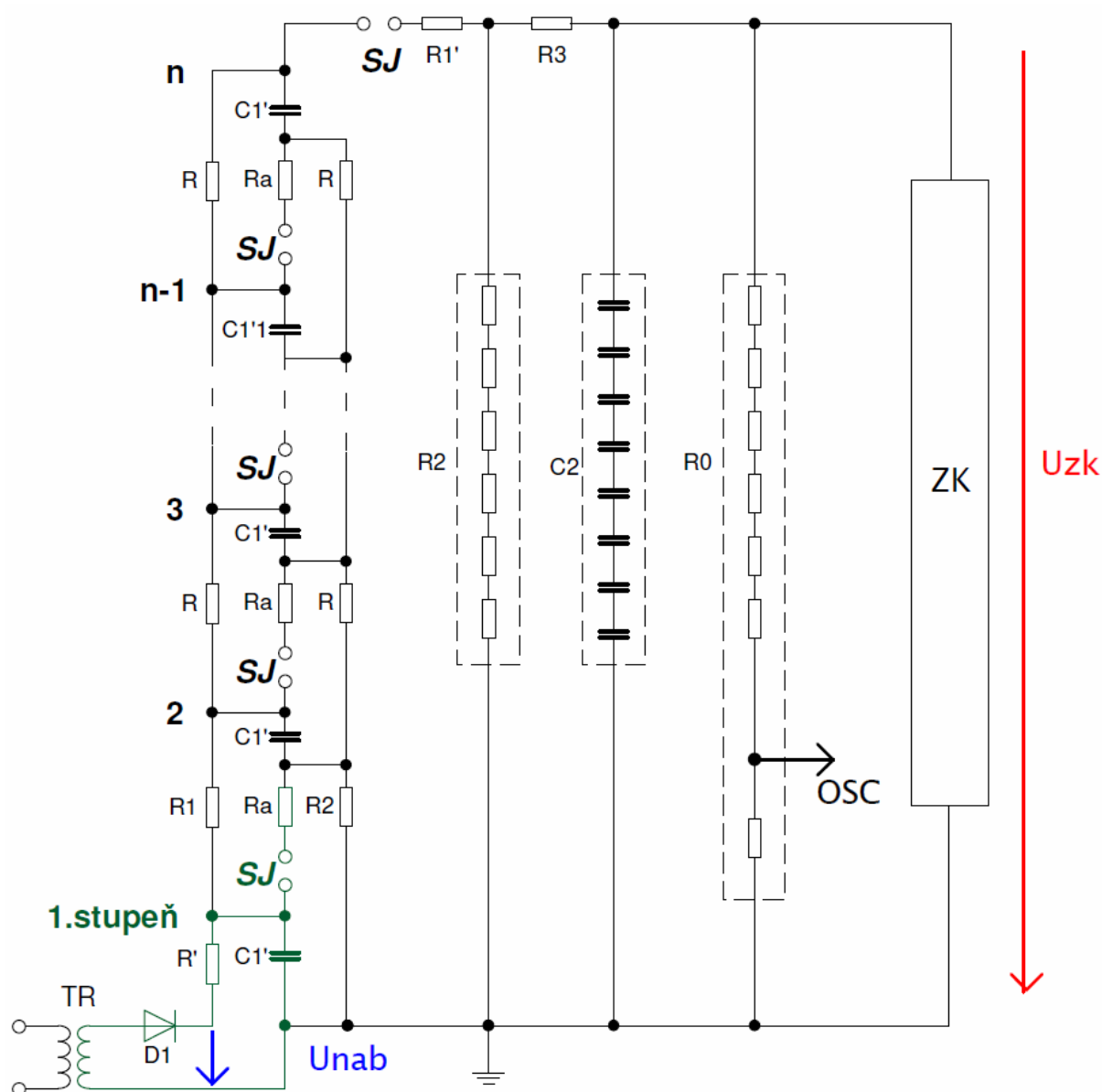
Účelem rázového generátoru je vytvořit impuls vysokého napětí z nízkonapěťového stejnosměrného napájecího zdroje. Marxovy generátory se užívají při fyzikálních experimentech, kde pracují s velmi vysokou energií pro simulaci účinků blesku na specifická elektrotechnická zařízení a zařízení letecké techniky. [11]

V energetice se používá rázový generátor k laboratornímu zkoušení odolnosti izolace transformátorů, přístrojů a elektrických vedení, dále pro určení rázových charakteristik, ke zjišťování ochranného působení zemnicích lan a pro studium výbojů vysokého napětí. Rozlišují se jednostupňové a vícestupňové rázové generátory. [2]

U jednostupňového rázového generátoru je značně omezeno výstupní zkušební napětí, které je dáno velikostí napětí použitého nabíjecího zdroje U_{NAB} . *Tab. 1* uvádí legendu ke značení v *Obr. 10*. V *Tab. 2* jsou uvedeny parametry univerzitního rázového generátoru pro tři způsoby zapojení. [2]

Tab. 1 Legenda k obecnému schématu vícestupňového rázového generátoru (převzato z [2])

Značení	Význam	Značení	Význam
TR	Transformátor pro převod napětí na danou hladinu	C_1'	Činná kapacita
D	Dioda pro jednostupňové usměrnění AC-DC	C_2	Zatěžovací kapacita
n	Počet stupňů	SJ	Spouštěcí jiskřiště
R, R'	Nabíjecí odpory	OSC	Měřicí výstup pro osciloskop nebo vrcholový voltmetr
R_1', R_3	Čelní odpor	ZK	Zkoušený systém
R_2	Týlní odpor	U_{ZK}	Zkušební napětí
R_0	Odporový dělič	U_{NAB}	Nabíjecí napětí
R_a	Tlumicí odpory	η	Koeficient využití



Obr. 10 Obecné schéma vícestupňového rázového generátoru (převzato z [2])

Na začátku nabíjecího procesu je řada kondenzátorů s označením C_1' připojena paralelně k rezistorům R . Proto se rezistory R a R' označují jako nabíjecí rezistory. Velikost odporu těchto rezistorů je mnohem větší, než odpor čelních rezistorů R_1' , R_3 a týlního rezistoru R_2 . Proces nabíjení probíhá tak, že po nabití každého kondenzátoru na hodnotu napětí připojeného zdroje dojde k jiskrovému výboji na spouštěcím jiskřišti SJ a tím dojde k spojení kondenzátorů do sériové kombinace. Dojde tak k součtu jejich napětí na výsledné $U_{ZK} = \eta * n * U_{NAB}$ [V], a začne probíhat vybíjecí proces přes rezistory R_a do obvodu mezi uzly ABCT. [2]

Pokud bude předpokládána velmi krátká doba trvání vybíjení, pak je možné považovat sériové řazení kondenzátorů za jedinou výslednou činnou kapacitu o velikosti $C_1 = \frac{C'_1}{n}$. Rezistory R_1' , R_2 a R_3 slouží vytvoření žádaného tvaru rázové vlny s ohledem na danou hodnotu zatěžovací kapacity C_2 . Rezistor R_0 respektuje odpor paralelně připojený na zem odporového děliče katodového osciloskopu. C_2 je zatěžovací kapacita a dále je zde zahrnuta i kapacita vedlejší, způsobená konstrukcí generátoru, jednotlivých stupňů rázového generátoru proti zemi, kapacita vedení, rezistorů, měřicího jiskřiště a děliče napětí pro osciloskop. [2]

Tab. 2 Parametry rázového generátoru HAEFELY, umístěného v univerzitní VN laboratoři

Zapojení	A	B	C
Generovaný signál	1,2/50 μ s		
Maximální celkové napětí	600	300	150
Sériové stupně	8	4	2
Paralelní stupně	1	2	4
Rázová kapacita	22,5 nF	90 nF	360 nF
Zatěžovací kapacita	2nF	2nF	2nF
Odpor rázového děliče	20 k Ω	20 k Ω	20 k Ω
Kadence rázů	6/min	6/min	6/min
Indukčnost	29 μ H	16 μ H	13 μ H
Zatěžovací kapacita zkoušence	0÷1000 pF	0÷1100 pF	0÷1400 pF
Vybíjecí odpor	150 Ω		
Zatěžovací kapacita zkoušence	700÷2700 pF	1100÷3000 pF	1400÷3800 pF
Vybíjecí odpor	90 Ω		

Všechny vodiče a elektrody v rámci generátoru musí být správně dimenzovány, aby se zabránilo těžkým korónovým výbojům v době nabíjení. Během krátké doby vybití částečným výbojům zabránit nelze. Kompletní obklopení či ponoření generátorů do materiálů s lepšími izolačními schopnostmi, než má vzduch (minerální oleje nebo vysokotlaké plyny), by mohlo účinně snížit velikost celého zařízení. Takové řešení se však používá pouze ojediněle a je určeno pouze pro speciální účely. [6]

3 Zkušební postupy

Přístroje pro provádění zkoušek vysokým napětím musí být v souladu s normou **ČSN EN 60060-2**. Při měření překmitu nebo oscilace zkušebního napětí musí být zkoušený objekt zapojený v obvodu a tvar impulsu musí být kontrolován pomocí měřicích přístrojů u každého zkoušeného objektu. Pokud po sobě následuje několik stejných zkoušek objektů, stejných z hlediska konstrukce, rozměrů a podmínek, tvar impulsu se ověřuje jen jednou. [1]

Při použití plného atmosférického impulsu dochází k zaznamenání vrcholové hodnoty napětí. U useknutého atmosférického impulsu může nastat zhroucení napětí v čele, vrcholu nebo v týlu. U impulsů useknutých v čele je zaznamenaná křivka křivkou zkušebního napětí. Impulsy useknuté v týle se považují za plný atmosférický impuls pro vyhodnocení zkušebního napětí a doby čela. [1]

S některými zkoušenými objekty nebo zkušebními uspořádáním může docházet ke zplošťování vrcholu nebo zaoblování napětí před dosažením konečného zhroucení napětí. Podobné účinky se mohou také objevit v důsledku nedokonalosti měřicího systému. Přesné určení parametrů souvisejících s useknutím vyžaduje přítomnost obou ostrých nespojitostí a rychlý měřicí systém. Ostatní případy jsou ponechány k projednání příslušné technické komisi. Při měření proudu během zkoušek impulsním napětím, který slouží pro účely porovnání, je důležitější tvar impulsu, než měření absolutní hodnoty tohoto proudu. Techniku zkoušek vysokým proudem, konkrétně definice a požadavky na zkušební proudy a měřicí systémy popisuje norma **ČSN EN 62475**. [1]

3.1.1 Zkoušky výdržným napětím

V dalších kapitolách jsou popsány různé zkušební postupy. Doporučený zkušební postup závisí na povaze zkušebního objektu a izolačních komponent. Na základě nich je pak vybrána nejvhodnější zkušební metoda. Postupem A, B a C se u izolace stanovuje pouze výdržná hodnota napětí a u postupu D se používá více napěťových hladin. [1]

Výdržné napětí zkoušeného objektu je vrcholová hodnota zkušebního napětí, v našem případě impulzního, určitého tvaru a polaritě, které musí předmět vydržet bez přeskočení za určených zkušebních podmínek. [24]

3.1.2 Zkoušky výdržným napětím: postup A

Na začátku je stanovena hladina výdržného napětí tak, že se na zkoušený objekt přiloží 3 impulsy daného tvaru a polarity. Zařízení zkoušce vyhoví, nedojde-li k průraznému výboji. Tento postup je vhodný především pro zkoušky degradující nebo samočinně se neobnovující izolace¹. [1]

3.1.3 Zkoušky výdržným napětím: postup B

Napěťová hladina, na které se na zkoušený objekt přiloží 15 impulsů daného tvaru a polarity, je stanovena normou v souladu s druhem zkoušené izolace. Zařízení ve zkoušce vyhoví, dojde-li nejvýše ke dvěma průrazným výbojům v části samočinně se obnovující izolace a k žádnému výboji v části se samočinně se neobnovující izolací. [1]

Pokud v samočinně se neobnovující části izolace v posledních třech přiložených napětí (pořadové číslo 13. – 15.) nedojde k výboji, lze brát zkoušený objekt jako vyhovující dané zkoušce. V případě jednoho průrazného výboje v impulsích s pořadovým číslem 13. – 15., lze provést další tři přiložení napětí (maximálně 18). Pokud v nich nedojde k průraznému výboji, lze považovat zkoušený objekt za vyhovující dané zkoušce. [1]

3.1.4 Zkoušky výdržným napětím: postup C

Na dané napěťové hladině se na zkoušený objekt přiloží tři impulsy daného tvaru a polarity. Nedojde-li k průraznému výboji, lze konstatovat, že zkoušený objekt při zkoušce vyhověl. Pokud dojde k průraznému výboji v části se samočinně se obnovující izolací, přiloží se navíc devět napěťových impulsů. Pokud nedojde k průraznému výboji, zkoušený objekt ve zkoušce vyhověl. [1]

¹ samočinně se neobnovující izolace = izolace, která ztrácí úplně nebo částečně (degraduje) své izolační vlastnosti po průrazném výboji

3.1.5 Zkoušky výdržným napětím: postup D

Pomocí této metody lze vyhodnotit 10% napětí průrazného výboje U_{10} u samočinně se obnovující izolace použitím statistických zkušebních postupů. Tato zkušební metoda umožňuje přímé vyhodnocení U_{10} a U_{50} či nepřímé vyhodnocení U_{10} pomocí následujícího vztahu [1]:

$$U_{10} = U_{50}(1 - 1,3s) [V] \quad (3.1.5-1)$$

Pokud je izolačním materiálem vzduch, zkouška je provedena za sucha a není zde zahrnuta jiná izolace, lze použít pro výpočet hodnotu směrodatné odchylky $s = 0,03$. [1]

Směrodatnou odchylku napětí průrazného výboje zkoušeného objektu (*standart deviation od the disruptive voltage of a test object*) lze vyjádřit v poměrných jednotkách nebo v procentech vztažených k U_{50} tímto vztahem [1]:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (U_i - U_a)^2} \quad (3.1.5-2)$$

kde: U_i i-té měřené napětí průrazného výboje

U_a aritmetická průměrná hodnota napětí průrazného výboje (nejčastěji identická s U_{50})

n počet pozorování (výbojů)

Pro zkoušky třídy 1 a 2 je vztah pro směrodatnou odchylku definován jako rozdíl kvantilů $s = U_{50} - U_{16} = U_{84} - U_{50}$ a je rovnocenný s předchozím, neboť v těchto hodnotách jsou všechny distribuční funkce téměř identické. [1]

Aritmetická průměrná hodnota napětí průrazného výboje zkoušeného objektu (*arithmetic mean value of the disruptive-discharge voltage of a test object*) je definována jako [1]:

$$U_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_i [V] \quad (3.1.5-3)$$

Pro symetrické rozložení je $U_a = U_{50}$. Zkoušený objekt prošel zkouškou, pokud U_{10} není menší než stanovené výdržné impulsní napětí. Příslušnou technickou komisí je stanovena hodnota předpokládané směrodatné odchylky napětí průrazného výboje. Např. lze použít hodnotu $s = 0,03$ pro zkoušky vzdušné izolace s absencí izolací jiného druhu. [1]

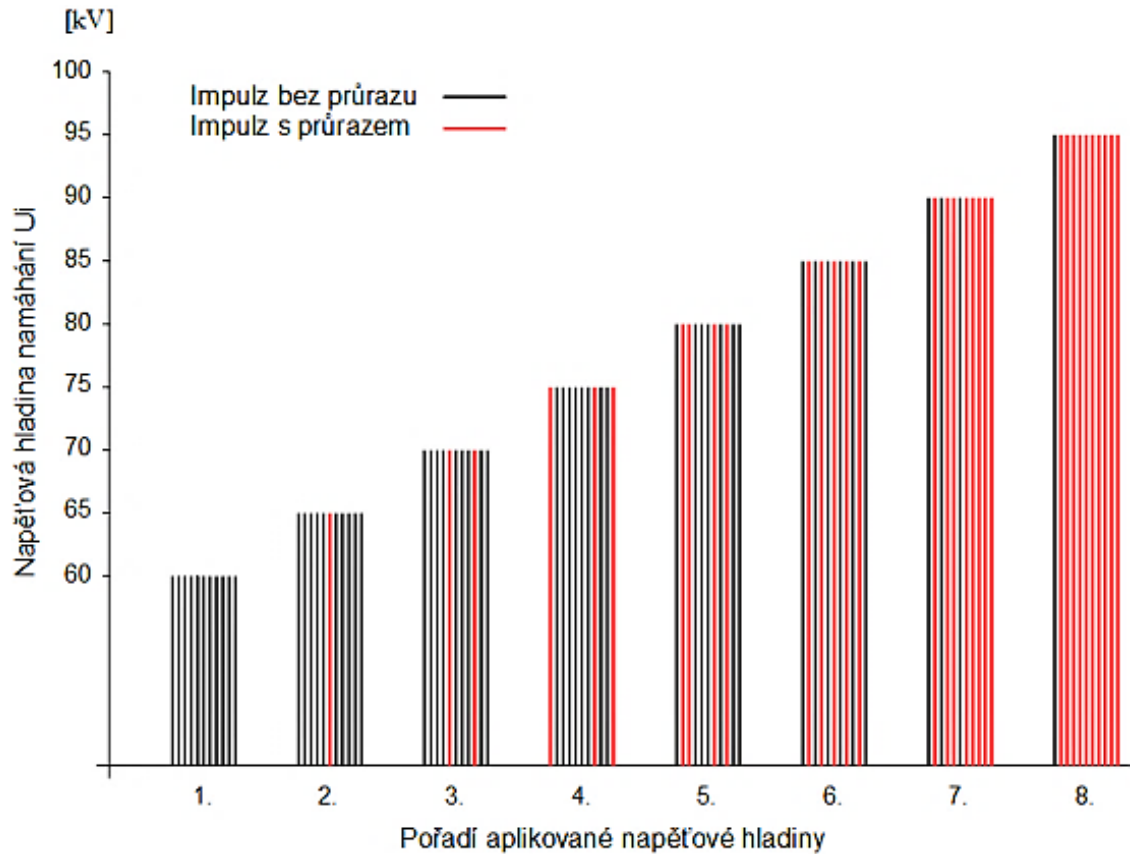
U_{50} lze určit metodou více hladin, kdy je počet hladin $m \geq 4$ a počet impulsů na hladině $n \geq 10$ nebo metodou nahoru-dolů pro počet impulsů na skupinu $n = 1$ a počet přiložení platných napětí $m \geq 20$. U_{10} se určí pomocí metody nahoru-dolů s počtem impulsů na hladinu $n = 7$ a $n = 8$ a více platnými skupinami. Ve všech případech by měl být rozdíl mezi hladinami ΔU v rozsahu od 1,5 % až 3 % odhadnuté hodnoty U_{50} . [1]

3.2 Statistické zpracování výsledků zkoušek

V následujících kapitolách 3.2.1 a 3.2.2 jsou uvedeny základní zkušební postupy pro zkoušky ve vysokonapěťové laboratoři atmosférickým impulsem. Tyto postupy i jejich vyhodnocení jsou striktně definovány normou ČSN EN 60060-1. [1]

3.2.1 Třída 1: Zkoušky více hladinami

Postup této zkoušky je vidět na Obr. 11. Zkouška se skládá z m skupin po n_i počtu napěťových impulsů aplikovaných nadané napěťové hladině $U_i = 1, 2, \dots, m$; přičemž se sleduje počet průrazných výbojů k_i . Princip je založen na zvyšování napěťové hladiny o krok $\Delta U = U_{i+1}$ ($i = 1, 2, \dots, m - 1$), způsobující $k_i < n_i$ průrazných výbojů. Zkouška končí při $k = n - 1$. Parametry zkoušky se obvykle volí $m \geq 5, n_i \geq 10$ ($i = 1 \div m$), $\Delta U = (0,01 \div 0,06) * U_{50}$. Výsledkem zkoušky je n_i přiložených napětí na napěťové hladině U_i , kde $i = 1 \div m$ odpovídající k_i průrazným výbojům. [1]



Obr. 11 Schéma zkoušky více hladinami (převzato z [1])

Četnost výbojů se vypočítá z naměřených hodnot na dané napětíové hladině $i = 1 \div m$ [1]:

$$f_i = \frac{k_i}{n_i} \quad (3.2.1-1)$$

Grafické znázornění pravděpodobnosti se dříve provádělo vynesáním funkce $f_i = f(U_i)$ pomocí Gaussova nebo normálního rozdělení na zvláštní grafický papír, kde se zakreslila přímka podléhající Gaussově distribuční funkci [1]:

$$p(U) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^U e^{-\frac{(u-U_{50})^2}{2s^2}} dU \quad (3.2.1-2)$$

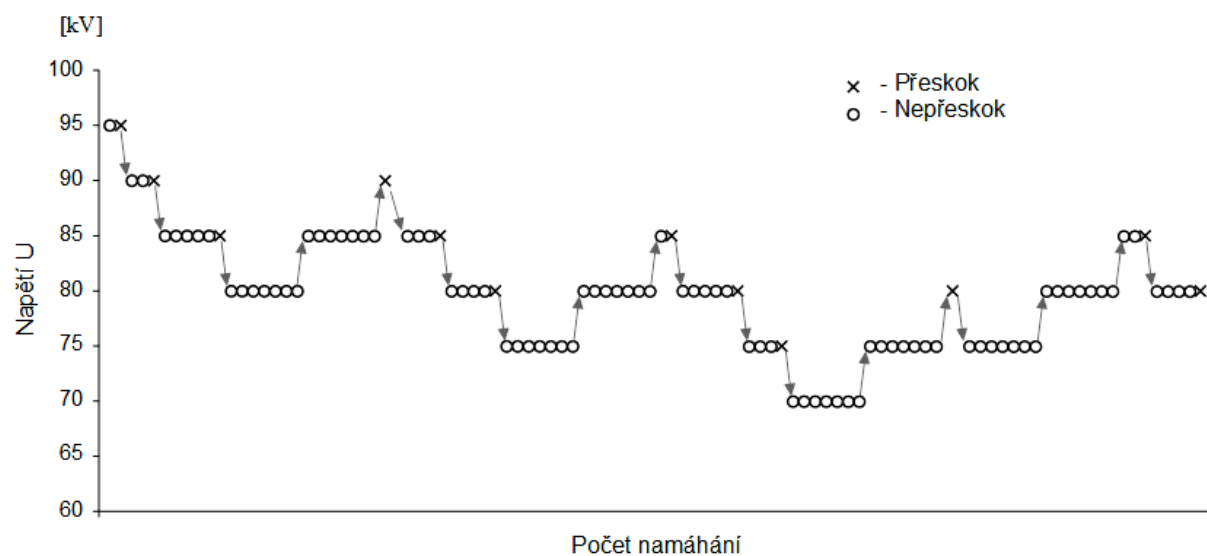
V dnešní době se pro výpočet U_{50} a s používá výpočetní technika, konkrétně analytická metoda nejmenších čtverců nebo metoda maximální věrohodnosti. Pro posouzení, zda odhadovaná pravděpodobnostní funkce odpovídá měřeným bodům s dostatečnou přesností, se používají konvenční regresní činitele nebo meze spolehlivosti. Podrobnosti lze najít v [16],

[17], [18] a [19]. Šířka meze spolehlivosti se mění nepřímo s druhou mocninou počtu přiložení napětí n_i na dané hladině U_i s počtem použitých napět'ových hladin m . Má tendenci být nejmenší při odhadu U_p v blízkosti $p = 0,5$ (50%). [1]

3.2.2 Třída 2: Zkoušky metodou nahoru-dolů

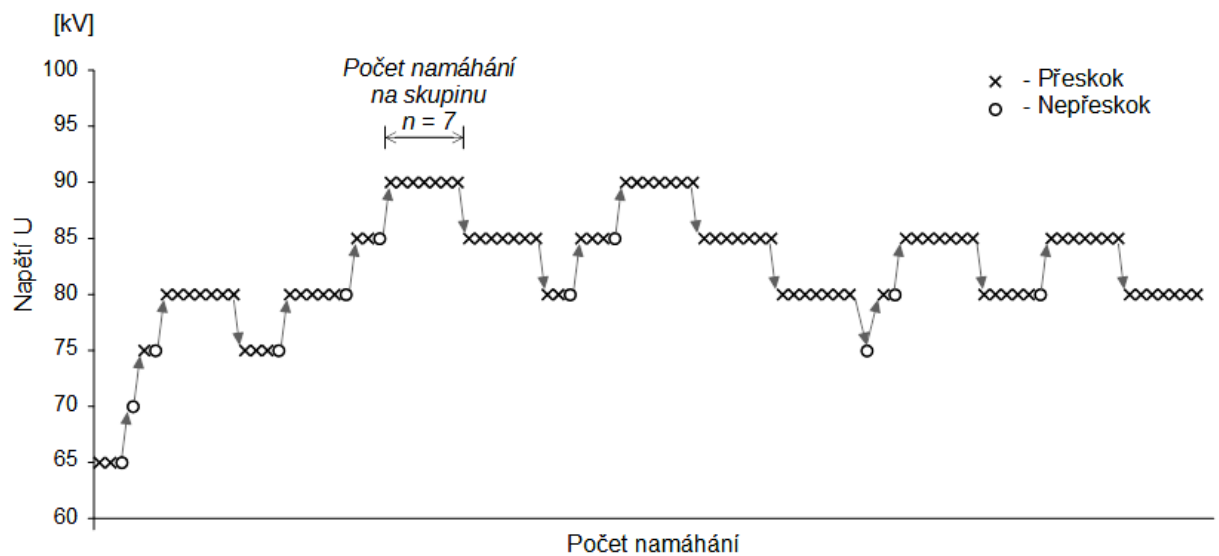
Zkouška třídy 2 je založena na použití m -skupin po n -napět'ových impulsích na celkovém počtu předem neznámých hladin l a napět'ové hladině U_i , kde $i = 1, 2, \dots, l$. Na dané napět'ové hladině při aplikování napět'ových impulsů se rozhoduje podle odezvy zkoušeného objektu na impuls o tom, zda dojde ke zvýšení, či zda dojde ke snížení napět'ové hladiny o rozdíl ΔU . Zkoušky metodou nahoru-dolů se rozdělují na dva druhy, výdržný a výbojový postup. [1]

Výdržný postup na *Obr. 12* je zaměřený na hledání napět'ových hladin odpovídajících nízké pravděpodobnosti průrazného výboje. Metoda začíná na vyšší napět'ové hladině, na které dochází k průraznému výboji a pokračuje směrem k nižším napět'ovým hladinám. Skupiny impulsů se skládají z většího počtu úspěšně aplikovaných impulsů a průrazné výboje jsou zde ojedinělé. Pokud v dané skupině impulsů na napět'ové hladině U_i dojde k průraznému výboji, pro další skupinu se napět'ová hladina sníží. Pokud k průraznému výboji nedojde, napět'ová hladina se zvýší. [1]



Obr. 12 Schéma zkoušky metodou nahoru-dolů – výdržný postup (převzato z [1])

Výbojový postup na Obr. 13 se užívá pro nalezení napět'ové hladiny odpovídající vysokým pravděpodobnostem průrazného výboje. Metoda začíná na nižší napět'ové hladině, na které ještě nedochází k průraznému výboji, a pokračuje k vyšším napět'ovým hladinám. Skupiny impulsů se skládají z většího počtu průrazných výbojů a ojedinelých úspěšně aplikovaných impulsů bez průrazu. Jestliže v dané skupině impulsů na napět'ové hladině U_i dojde k průraznému výboji při všech aplikovaných impulsích, pro další skupinu se napět'ová hladina sníží. Pokud při aplikování napět'ového impulsu nedojde k průraznému výboji, izolační vlastnosti zkoušeného objektu vyhoví, napět'ová hladina se zvýší. [1]



Obr. 13 Schéma zkoušky metodou nahoru-dolů – výbojový postup (převzato z [1])

Pro $n = 1$ se oběma předešlými způsoby zkoušek třídy 2 naleznou hodnoty U_{50} . Zkoušky s jinými hodnotami n se používají pro určení hodnot napětí s jinou pravděpodobností průrazného výboje. Např. pro zkoušky s $n = 7$ se naleznou hodnoty napětí s pravděpodobností 10 % (U_{10} – statistické výdržné napětí) a 90 % (U_{90} – statistické zaručené výdržné napětí). Napět'ový krok mezi hladinami by měl odpovídat $\Delta U = (0,01 \div 0,03)U_{50}$. [1]

Výsledkem zkoušky je k_i -skupin namáhání použitých na napět'ových hladinách U_i . První akceptovatelná skupina namáhání na dané napět'ové hladině je ta, na které se aplikovaly alespoň dvě skupiny namáhání. Celkový počet platných skupin je $m = \sum_{i=1}^l k_i$. [1]

Výsledkem zkoušky třídy 2 je odhad U_p s pravděpodobností napětí průrazného výboje $p * U'_p$. U_p je dáno následujícím vztahem [1]:

$$U_p^* = \sum_{i=1}^l \frac{k_i * U_i}{m} [V] \quad (3.2.2-1)$$

kde: k_i počet skupin namáhání

U_i napěťová hladina

m celkový počet platných skupin

Pro dosažení dostatečné přesnosti výpočtem je nutné uvažovat pouze ta napětí U_i , které odpovídají této podmínce: $U_i \in \pm 2\Delta U * U'_p$. U obou postupů je odhad U_p pro hodnoty p omezen podmínkou $n \in \mathbb{N}$, kde n je celé číslo. [1]

Výdržný postup slouží k odhadu U_p pro pravděpodobnost průrazného výboje p u výdržného postupu [1]:

$$p = 1 - (0,5)^{1/n} \quad (3.2.2-2)$$

Odhad U_p pro pravděpodobnost průrazného výboje p u výbojového postupu [1]:

$$p = (0,5)^{1/n} \quad (3.2.2-3)$$

4 Reprodukovatelnost testů atmosférickým napětím

4.1 Koeficient nehomogenity, Schwaigrův koeficient

Chování dielektrika je silně závislé na typu pole, kterému je vystaveno. Částečné výboje (PD) se vyskytují v homogenních a méně v nehomogenních podmínkách. Přejít od slabě nehomogenního k silně nehomogennímu poli v plynném dielektriku je doprovázen částečným výbojem, nebo korónou. [7]

Konfigurace pole lze analyticky popsat na základě koeficientu η , který zavedl v roce 1922 Schwaiger jako Schwaigrův koeficient, či Schwaigrův faktor, také známý jako stupeň nehomogenity pole. [7] Je definován takto [8]:

$$\eta = \frac{E_{mean}}{E_{max}} \quad (4.1-1)$$

kde: E_{mean} průměrná intenzita pole v mezeře

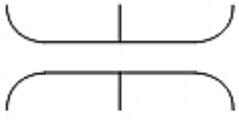
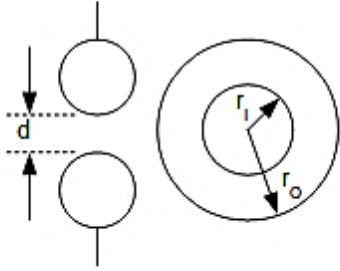
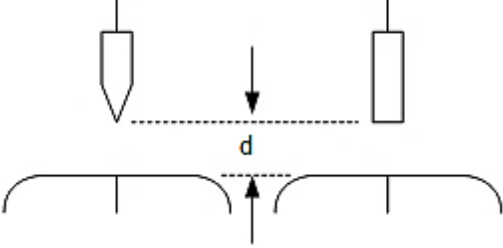
E_{max} maximální intenzita pole na povrchu elektrody

Hodnota Schwaigrova koeficientu leží mezi 0 a 1. Pro homogenní pole je $\eta = 1$. Nižší hodnota η znamená více nehomogenní pole. Mezní hodnota, označována jako η_{lim} , reprezentuje přechod od slabě nehomogenního k silně nehomogenním polím. Tato hodnota závisí na chování dielektrika a jeho fyzikálních podmínkách, jako je tlak a teplota. Dále to může záviset na typu aplikovaného napětí, velikosti elektrod a v neposlední řadě na atmosférických podmínkách měření. [7]

Elektrické pole mezi dvěma elektrodami je možné obecně rozdělit do dvou kategorií, a to na homogenní a nehomogenní. Pole se označuje za homogenní pouze v případě, že Schwaigrův koeficient $\eta = 1$. Jakákoliv hodnota $\eta < 1$ znamená, že se jedná o pole nehomogenní. Na základě výskytu částečného výboje bylo zavedeno označení: slabě nehomogenní pole. Nehomogenní pole se řadí do kategorie slabě nehomogenních polí, pokud před průrazným výbojem nenastane částečný výboj. [7]

Pole se nazývá slabě nehomogenní v případě, že se $U_i = U_p$ při vzniku částečného výboje. Při zvyšování nerovnoměrnosti pole dochází k částečným výbojům před průrazným

výbojem. Částečné výboje vznikají již při nižším napětí, než je průrazné napětí. Toto pole je klasifikováno jako silně nehomogenní. Čím více je pole nehomogenní, tím je větší rozdíl napěťových hladin, na kterých vznikne částečný výboj a průrazný výboj. Případy homogenního, slabě nehomogenního a velmi nehomogenního pole jsou znázorněny na Obr. 14. [7]

Homogenní pole	Nehomogenní pole	
	Slabě nehomogenní	Velmi nehomogenní
		
Paralelní desky s profilem okrajem podle Rogowskiho	Dvě identické koule proti sobě pro $d \leq 4r$ nebo soustředné koule pro $r_0 \leq 4r_1$	Hrotová či tupá elektroda vs. deska pro $d \gg r$
Žádný PD nenastane před průrazem, $U_i = U_b$	Žádný PD nenastane před průrazem, $U_i = U_b$	Nastane stabilní PD před průrazem, $U_i \ll U_b$

Obr. 14 Klasifikace a typické uspořádání elektrických polí (převzato z [7])

Přechod od slabě nehomogenního k silně nehomogennímu poli souvisí se Schwaigrovým koeficientem. Hodnota η_{lim} představuje tento přechod za daných podmínek dielektrického pole. V homogenním poli či slabě nehomogenním částečné výboje nenastávají. Znalost přesné hodnoty η_{lim} za daných podmínek je vhodná pro konstrukci zařízení. [7]

4.2 Částečné výboje

Dle International Standard of the IEC (*International Electrotechnical Commission*) je PD lokální elektrický výboj, který se vyskytuje v celé oblasti izolace mezi dvěma vodivými elektrodami a pouze částečně překlene mezeru (izolaci) mezi vodiči, a který může a nemusí přiléhat k vodiči. [9]

PD je důsledkem vysoké koncentrace lokálního elektrického namáhání v izolaci nebo na povrchu izolace. Může být způsoben přerušením nebo nedokonalostmi izolačního systému a obecně se jeví jako impulsy s délkou trvání mnohem menší než 1 sekundu. Přítomnost PD udává zhoršení izolace a předchází budoucímu selhání izolace. Proto se dnes v praxi používá speciální detekce PD pro indikaci nutnosti servisních prací a předcházení rozsáhlým poruchám celých zařízení. Obecně se vyskytuje v systémech pracujících při napětí 3000 V a výše, ale v některých ojedinělých případech může k němu dojít i při nižších napětích. [10]

PD se může objevit v různých místech pevného, kapalného či plynného izolačního média, a to např.: v dutinách izolačního média, na rozhraní mezi izolačními vrstvami nebo v plynových bublinkách v kapalné izolaci. K PD může dojít i v novém elektrickém zařízení po uvedení do provozu a může být způsobeno špatným projektováním zařízení, chybami ve výrobě či nedodržení podmínek instalace příslušného zařízení na místě – k tomu může dojít především u kabelových spojek a koncovek, které jsou skládány do výsledné podoby až na místě použití. To může vést k vysokému procentu poruch izolace a až k předčasnému selhání celého zařízení nejčastěji v prvních třech letech funkční životnosti zařízení. V závislosti na závažnosti poruchy se na funkčnosti zařízení může selhání projevit během několika hodin či řádu několika let. [9, 10]

Mezi částečné výboje je zahrnuta široká skupina vybíjecích jevů [10]:

- Vnitřní výboje – v dutinách, prasklinách nebo vzduchových bublinách v pevných nebo kapalných dielektrikách
- Povrchové výboje – na rozhraní různých izolačních materiálů
- Korónové výboje – v plynných dielektrikách v přítomnosti nehomogenního pole
- Elektrické stromečky – rozvoj výboje specifickým procesem, více informací viz [25]

Vliv částečných výbojů na životnost izolace je již dlouho známý. Každá výbojová událost způsobuje degradaci materiálu vlivem energetického dopadu vysokých energií elektronů nebo urychlených iontů, což způsobuje chemické přeměny mnoha typů. Počet výbojových událostí během vybraného časového intervalu je silně závislý na druhu použitého napětí a bude nejvyšší pro střídavé napětí. Skutečné zhoršení izolačních vlastností je dále závislé na

použitém materiálu. Korónový výboj ve vzduchu nebude mít žádný vliv na očekávanou délku života venkovního vedení. Na rozdíl od toho, částečný výboj uvnitř termoplastického dielektrika (např. PE), může způsobit poškození ve velmi krátkém časovém horizontu, např. během několika dní. [10]

Stanovení přesného životního cyklu či servisních intervalů v závislosti na vlivu částečných výbojů na izolační materiál za účelem předcházení poruch a úspory finančních prostředků je cílem mnoha výzkumů. Určit přesně definovaný vztah je však velmi obtížné. Měření PD přesto získalo velký význam v průběhu posledních čtyř desetiletí a velký počet publikací se zabývá měřicí technikou PD nebo negativními účinky PD na izolaci. [10]

Zjištění přítomnosti PD je založeno na měření těchto jevů [10]:

- Elektrický impuls proudu
- Dielektrické ztráty
- Elektromagnetické záření (světlo)
- Zvuk (hluk)
- Zvýšený tlak plynu
- Chemická reakce

Principy funkce měřicí techniky, používané v oblasti měření PD, mohou být založeny na pozorování jakéhokoliv z výše uvedených jevů. Nejstarší a nejjednodušší způsob pro detekování vnějších výbojů se spoléhal na detekci zvuku, neboli akustického hluku výboje "syčení". Citlivost sluchu je však relativně nízká a obtíže vznikaly při rozlišování mezi výboji a cizími zdroji hluku. Zvláště když byly testy prováděny v továrnách, kde je vliv hluku akustického pozadí značný. Je také dobře známé, že energie uvolněná částečným výbojem zvyšuje ztrátový činitel. [10]

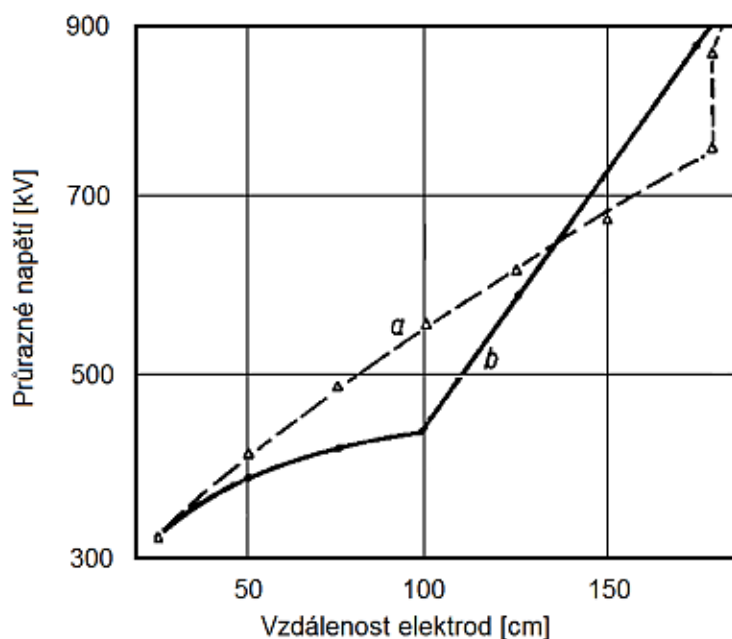
4.3 Vliv reálného uspořádání za zkušební test

V letech kolem roku 1971 proběhl ve Švýcarsku výzkum, který se mimo jiné zabýval ovlivněním hodnoty padesátiprocentního průrazného napětí U_{50} přítomností předvýbojů a různými druhy koróny v závislosti na určitých parametrech a vlastnostech měřicího obvodu či

okolí. Prof. Feser, autor výzkumů a odborných článků [12] a [13], provedl měření kladným a záporným atmosférickým impulsem, spínacím impulsem, a střídavým a stejnosměrným napětím na vertikálním jiskřišti tyč-deska a tyč-tyč při atmosférických podmínkách v otevřeném prostoru, tzn. izolační médium je obyčejný vzduch. Důvod značného rozptylu měřených hodnot je spojován i se způsobem vytvoření koróny ve vzduchové mezeře a s druhem působení koróny. Každý druh koróny je spojován s rozdílným proudem tekoucím přes mezeru. Pokud jsou aplikovány spínací či atmosférické impulsy na jiskřiště tyč-tyč a tyč-deska, změna druhu koróny v prostoru mezi elektrodami významně ovlivní průrazné napětí.

Předvýbojový proces určují tyto parametry [2][13]:

- Velikost mezery jiskřiště
- Druh aplikovaného napětí
- Tvar elektrod a geometrie okolí
- Zdrojová impedance
- Atmosférické podmínky



Obr. 15 Vliv koróny vysokonapětového vedení na průrazné napětí na jiskřišti koule-deska o mezeře 25 cm stejnosměrným napětím; a) s korónou na vodiči, b) bez koróny (převzato z [12])

Je velmi zajímavé pozorovat změnu průrazného napětí v závislosti na vzdálenosti elektrod, jak je vidět na Obr. 15. Průrazné napětí může být ovlivněno nejen výsledným elektrickým polem (včetně účinků prostorového náboje), ale i výbojovými produkty

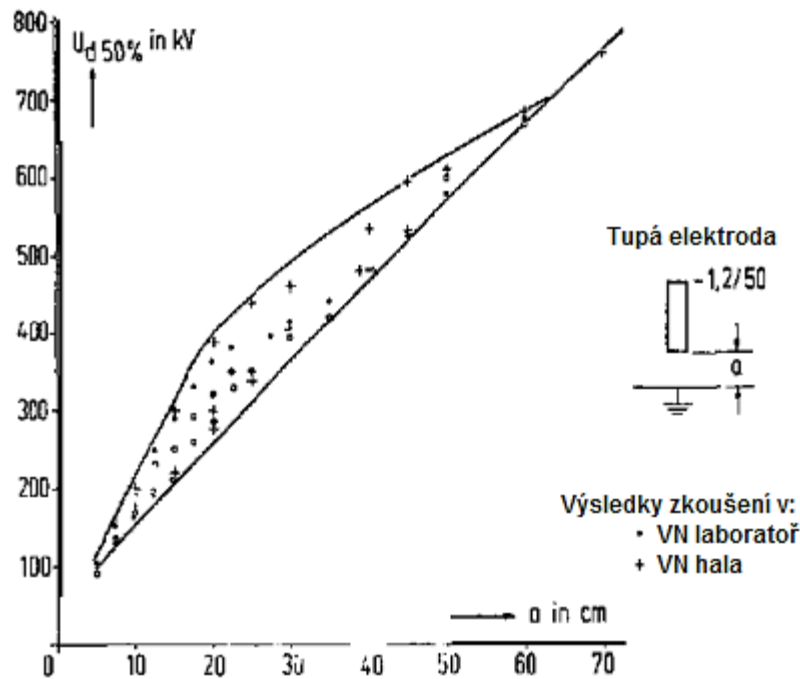
předvýbojů, které vznikají ve vzdálenosti od zkoumané elektrody, např. na vedení vysokého napětí. Ionty, produkované elektrodou pod napětím., vstupují do prostoru mezi elektrody a svou přítomností zvyšují přeskokové napětí. U všech těchto testů provedených na Obr. 15 byla směrodatná odchylka menší než 2 %. [12]

4.3.1 Velikost mezery jiskřiště

Z výzkumu [13] byl zjištěn značný rozptyl U_{50} na specifickém intervalu vzdáleností elektrod, který se vyskytuje pravidelně a má fyzikální, zatím ne zcela vysvětlený, základ. Výsledek výzkumu názorně zobrazuje Obr. 16. Je z něj patrné, že stanovuje interval vzdálenosti elektrod od 5 cm do 55 cm, kde pravděpodobnost průrazu při použití tupé elektrody nelze reprodukovat jakýmkoliv jednoduchým rozdělením, ale kde je nutné použít smíšené rozdělení. V literatuře autor těchto výzkumů zavedl pro tuto oblast název „přechodná oblast“, anglicky „*transition range*“. [13]

Přechodná oblast je rozsah vzdáleností elektrod, pro který nemůže být použito normální rozdělení a kde dochází k velkému rozptylu měřených hodnot. Rozsah přechodné oblasti je závislý na velkém množství proměnných, které charakterizují zapojení samotného měření a nastavení laboratorní úlohy či působení vnějších vlivů prostředí. Jsou vyzorovány dvě podmínky, neboli proměnné, společné pro všechna měření, jejichž dodržení vede ke změření značného rozptylu pravděpodobností průrazu a tím i vzniku přechodné oblasti v dané oblasti. Jedná se o: zajištění velké nehomogenity pole jiskřiště a preferování nastavení kratších vzdáleností elektrod. [12]

V laboratorním měření s danými parametry, uvedenými v [13], končila přechodná oblast na 55 cm a dále bylo možné pro statistické vyhodnocení použít normální rozdělení. [12][13][14]



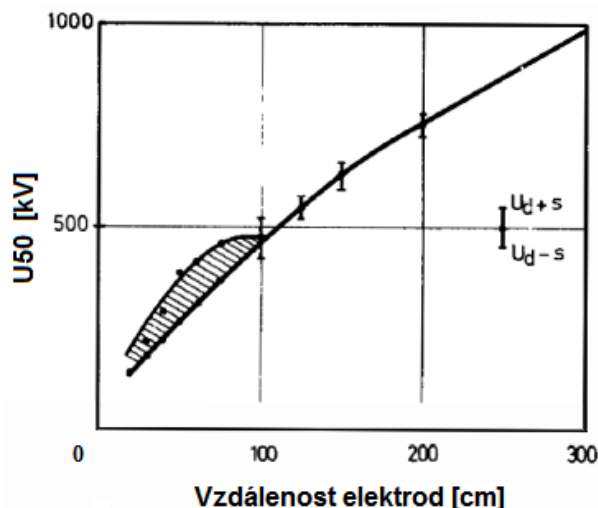
Obr. 16 Závislost 50% průrazného napětí na vzdálenosti elektrod při použití záporného atmosférického impulsu na jiskřišti tyč-deska za normálních atmosférických podmínek (převzato z [13])

Přítomnost koróny vede k nižšímu průraznému napětí. Přechod koróny v předvýboj na delších vzdálenostech elektrod ukazuje na dvě různá průrazná napětí a výsledné pravděpodobnostní rozložení má smíšený charakter. Je prokázáno, že tento rozptyl lze pozorovat u všech aplikovaných tvarů napětí (střídavé a stejnosměrného napětí, atmosférická a spínací přepětí). [12]

Tento značný rozptyl v přechodné oblasti je zdůvodněn tím, že na velmi krátkých vzdálenostech elektrod je vznik průrazu ovlivněn několika dalšími významnými parametry, které ukazují na odlišné mechanismy průrazu. Lze velmi obtížně přesně stanovit hranice přechodné oblasti pro všechna měření, protože vznik průrazného výboje je závislý na velkém množství parametrů, které se řídí jak vysvětlenými, tak i nevysvětlenými fyzikálními zákonitostmi. [12][13]

Zejména u atmosférického a spínacího impulsního napětí se na určitých vzdálenostech projeví velký nevysvětlitelný rozptyl a vypočtená pravděpodobnost průrazu je tím zkreslena. Rozptyl průrazných napětí na jiskřišti s velkými vzdálenostmi elektrod je již vysvětlen působením předvýbojů. [12] Avšak důvody rozptylu na krátkých vzdálenostech elektrod nebyly doposud vysvětleny. [13]

Výzkum [12] se mimo jiné zabývá závislostí přechodné oblasti na druhu vzniklé koróny na elektrodě. Pro ověření tohoto působení byly provedeny testy použitím různých druhů křivek napětí (stejnoseměrné, střídavé, atmosférické, spínací), aby byly zjištěny změny hodnot průrazného napětí a mohly být stanoveny určité hypotézy. [12]



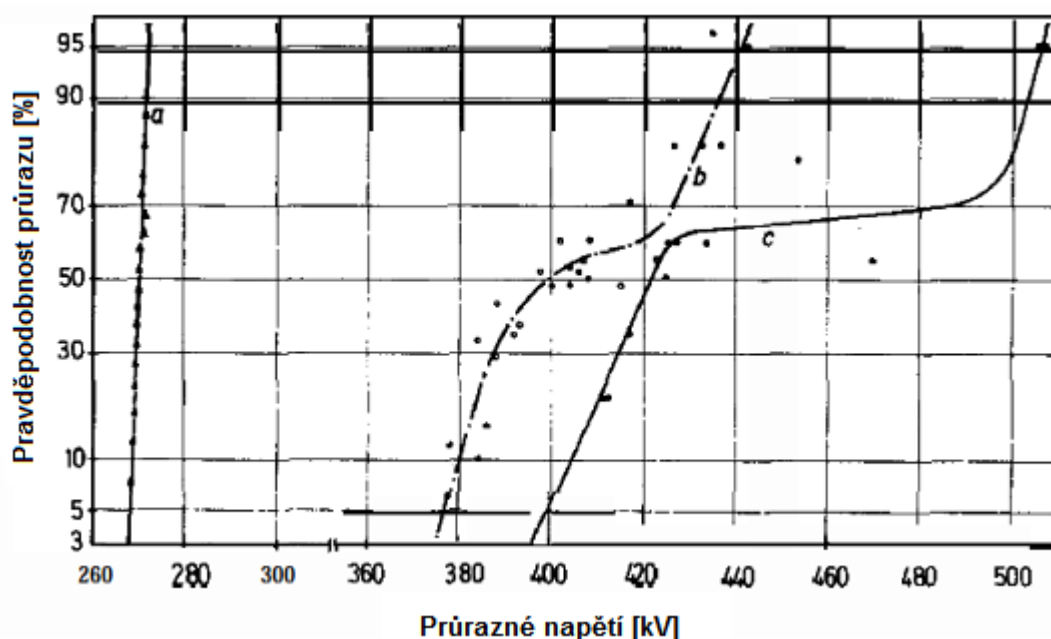
Obr. 17 U_{50} pro jiskřiště tyč-deska s aplikací kladného spínacího přepětí (převzato z [12])

Obr. 17 je výsledkem výzkumu [12], kde byla stanovena přechodná oblast pro nejnepříznivější situaci a přechod z oblasti se značným rozptylem k normálnímu rozdělení. V tomto případě byla měřením přibližně stanovena na 100 cm. Na vzdálenostech větších, než je tato hranice, je možné pozorovat jednoduché normální rozdělení U_{50} . V ojedinělých případech lze normální rozdělení získat i v přechodné oblasti v případě, že je jeden parametr výrazně dominantní. [12]

4.3.2 Druh aplikovaného napětí

Velmi důležitý parametr je tvar napěťové křivky, protože je na něm silně závislý korónový výboj. Obr. 18 je vyhodnocením testu záporného jiskřiště tyč-tyč na vzdálenosti 50 cm, kde je pravděpodobnost přeskočení atmosférického napětí a také spínacího napětí charakterizována smíšenou distribucí. Hodně výsledků uvedených v literatuře, zejména pro impulsní napětí (atmosférické i spínací), ukazuje velký rozptyl hodnot průrazného napětí bez jakéhokoliv vysvětlení. V obou případech fyzikální příčina smíšené distribuce určitým způsobem souvisí s chováním koróny. Pokud je dosaženo počáteční napětí uzemněné elektrody, průraz může předcházet streamerové koróně nebo se může uskutečnit bez předvýbojů na uzemněné elektrodě. Nižší průrazné napětí smíšené distribuce bylo při tomto zkušebním testu způsobeno výbojem v důsledku streamerové koróny na anodě. Tento fakt byl

ověřen fotografováním výboje a následným určením, zda se jedná o průraz způsobený streamerovou či leaderovou korónou. [12]



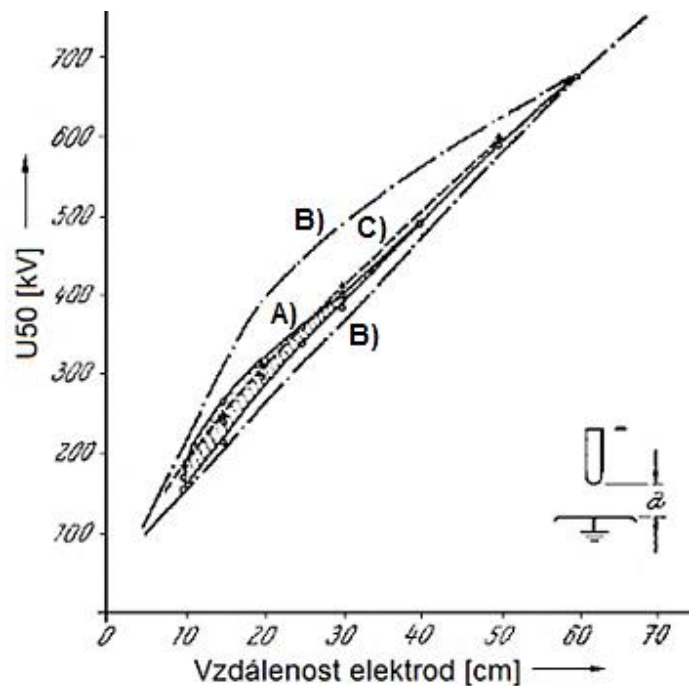
Obr. 18 Pravděpodobnost výboje na jiskřišti tyč-tyč, vzdálenost 50 cm, při použití rozdílných napěťových křivek záporné polarity: a) Stejnoseměrné napětí, b) Atmosférický impuls 1,2/50 μ s, c) Spínací impuls 60/525 μ s (převzato z [12])

Tab. 3 Měřením určená přechodná oblast pro atmosférický impuls 1,2/50 μ s [12]

Jiskřiště	Ostrost elektrody	Předvýboje		Vzdálenost elektrod
		I.	II.	
Záporný impuls tyč-deska	Tupá, průměr 2 cm	Na katodě		5 < a < 60
		Doutnavá koróna	Streamerová koróna	5 < a < 35
Záporný impuls tyč-tyč	Tupá, průměr 2 cm	Na anodě		30 < a < 90
		Žádné	Streamerová koróna	
	Ostrá, hrot	Na anodě		15 < a < 40
		Žádné	Streamerová koróna	

Tab. 3 uvádí vlastnosti dvou druhů jiskřiště – tyč-deska a tyč-tyč, na nichž je pozorován vznik předvýboje. Z toho jsou pak určeny vzdálenosti elektrod, které definují začátek a konec přechodné oblasti. Přechodná oblast je ojedinělá vlastnost určitých laboratorních měření, která v mnohých uspořádáních jiskřiště nenastane a rozdělení se řídí obvyklou normální distribucí. [12]

4.3.3 Tvar elektrod a geometrie okolí

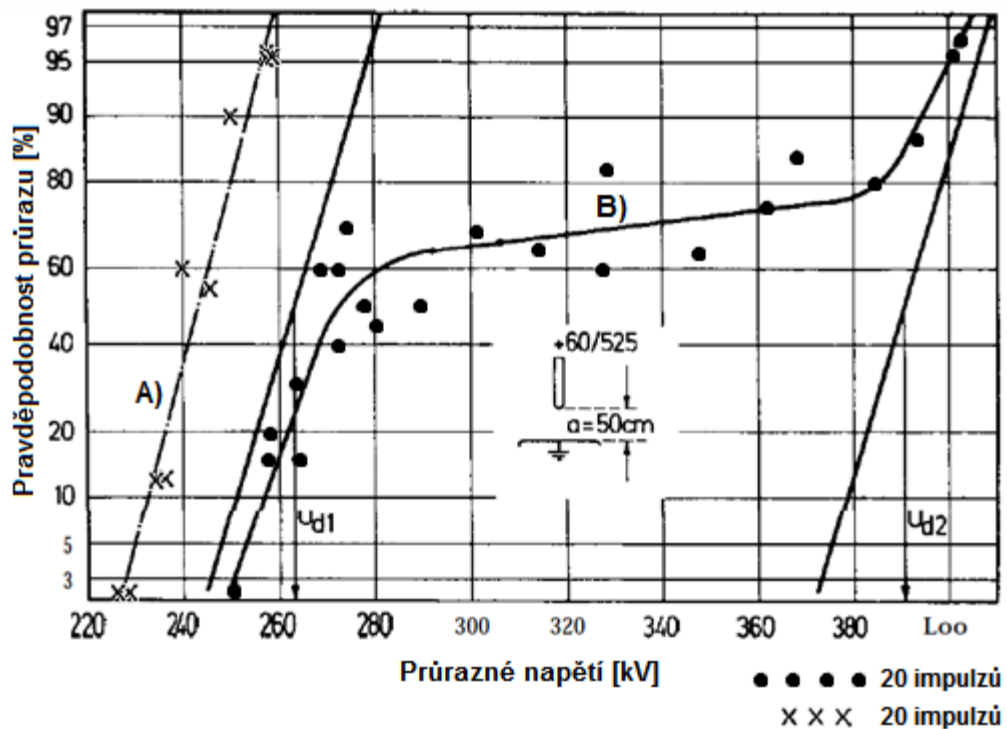


Obr. 19 Závislost U_{50} na vzdálenosti elektrod u záporného jiskřiště tyč-deska pro různé zakončení tyčové elektrody: A)...poloměr 3 cm, B)...tupá, C)...hrot 30° (převzato z [13])

Na Obr. 19 je graficky znázorněna závislost U_{50} na vzdálenosti vzduchové mezery pro různé druhy elektrod na jiskřišti tyč-deska. Je patrné, že nejmenšího rozptylu hodnot vykazuje jiskřiště C) – elektroda se špičatým hrotem o vrcholovém úhlu 30° vs. desková elektroda. Je to tím, že toto uspořádání vykazuje největší nehomogenitu prostředí a i v předpokládané přechodné oblasti má závislost napětí na vzdálenosti přibližně přímkový charakter. U jiskřiště B) – tupá elektroda vs. desková je ze tří měřených zakončení tyčové elektrody nehomogenita pole nejmenší a dochází také k největšímu rozptylu měřených hodnot. Z grafické závislosti lze pozorovat, že vzdálenosti elektrod od 5 do 55 cm trpí značným rozptylem a reprodukovatelnost výsledků v tomto rozsahu vzdáleností není dobrá. Rovněž si můžeme povšimnout, že uspořádání jiskřiště tupá-deska je označeno za nejnepříznivější uspořádání a jeho křivky jsou hraniční pro rozptyl a definují přechodnou oblast na Obr. 16 a Obr. 19. [13]

Další Obr. 20 je grafickou charakteristikou pravděpodobnosti průrazu závislé na průrazném napětí pro kladný spínací impuls 60/525 μ s. Tato charakteristika byla změřena pro ostrý hrot elektrody a polokulovou elektrodu s poloměrem 2 cm na vzdálenosti 50 cm. Z této závislosti je patrné jednoduché rozdělení pravděpodobnosti pro A) a smíšené rozdělení pro B), které se řídí dvěma distribučními přímkami. [12]

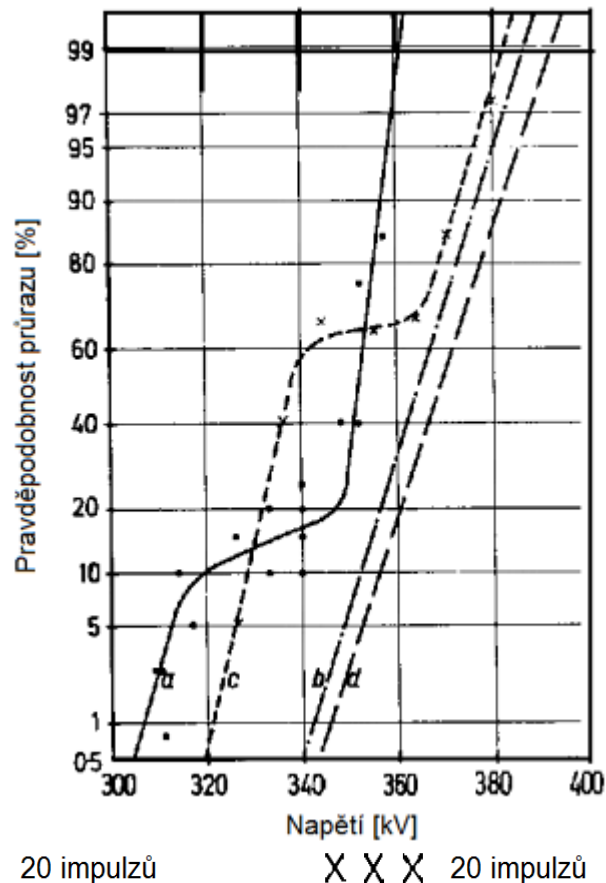
Na Obr. 20, pro leaderovou korónu, průrazné napětí souhlasí s nižším průrazným napětím $U_{50,1} = 263\text{kV}$, zatímco pro streamerovou korónu $U_{50,2} = 391\text{kV}$. Je nepochybné, že změna chování koróny má vliv za rozptýl hodnot průrazného napětí. [12]



Obr. 20 Závislost pravděpodobnosti průrazu na průrazném napětí při různém zakončení elektrod, vzdálenost elektrod 50 cm, kladný impulz 60/525 μs : A) ostrá elektroda; B) polokulová s poloměrem 2 cm (převzato z [12])

Závislost pravděpodobnosti průrazu na přiloženém napětí použitím atmosférického impulsu při použití různých druhů anody i katody je znázorněno na Obr. 21. Je patrné, že při použití kombinace elektrod *b*) a *d*) s velmi nehomogenním polem se pravděpodobnost řídí jednoduchým rozdělením. Avšak v *a*) je pole homogenní a *c*) se homogennímu blíží. Proto se zde rozložení pravděpodobnosti řídí dvěma distribučními přímkami. [12]

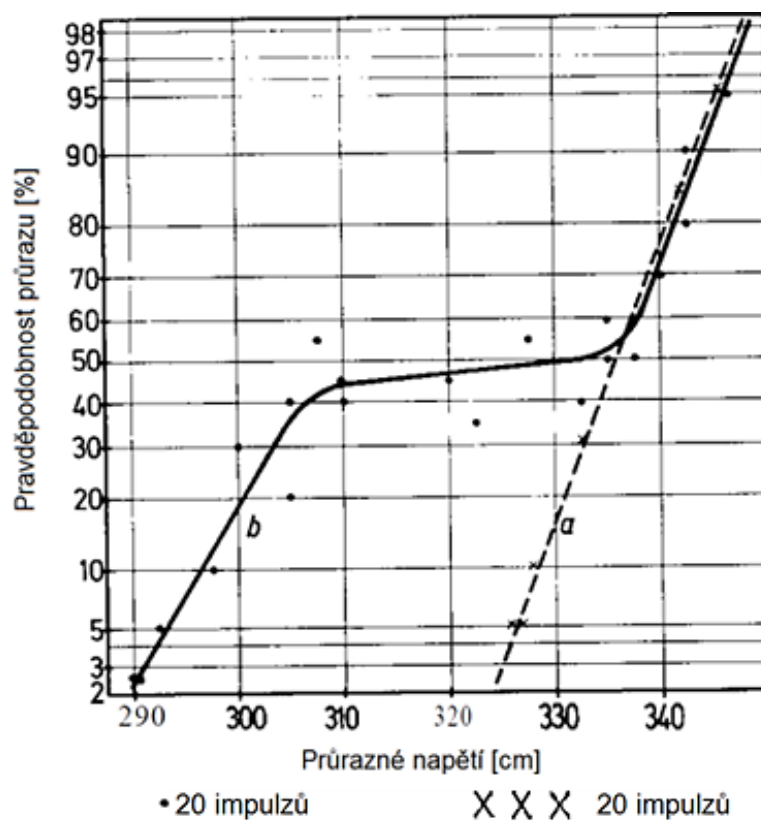
Pokud je u Obr. 21a jedna polokulová anoda nahrazena ostrou elektrodou, je výsledkem jednoduché rozdělení pravděpodobnosti Obr. 21b. Intenzita pole může být ovlivněna také geometrií okolí a vysokonapěťovým připojením obvodu. Toto pozorování bylo potvrzeno výpočty a měřeními na kulovém jiskřišti, které provedl pan Steinbigler v [20]. [12]



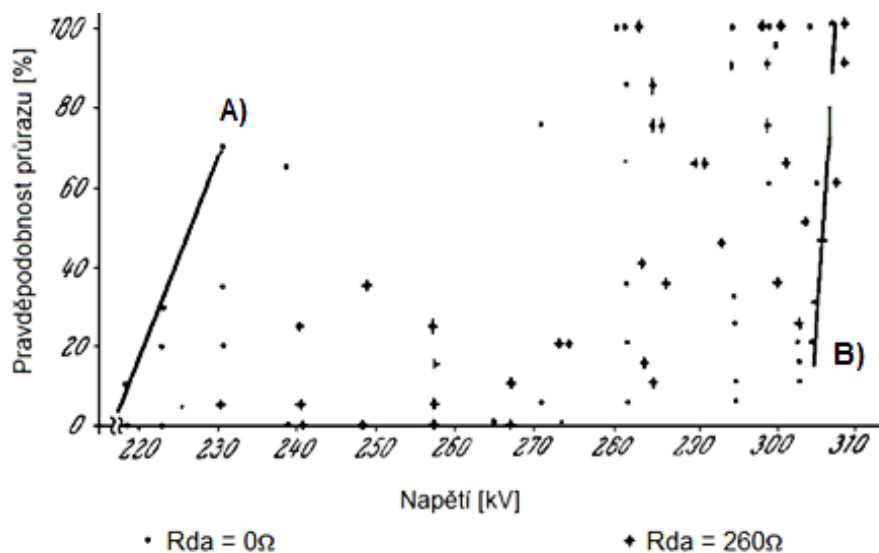
Obr. 21 Vliv ostrosti elektrody na pravděpodobnost průrazu atmosférického impulsu na jiskřišti tyč-tyč ve vzdálenosti 40 cm: a) obě elektrody polokulové s poloměrem 2 cm, b) polokulová s poloměrem 2 cm/špičatá (30°), c) špičatá (30°)/polokulová, poloměr 2 cm, d) špičatá (30°)/špičatá (30°) (převzato z [12])

4.3.4 Zdrojová impedance

Je třeba poznamenat, že zdrojová impedance rázového generátoru má rovněž vliv na průrazné napětí při měření v přechodné oblasti. [21] Pro atmosférický impuls 1,2/50 μ s např. při použití záporného jiskřiště tyč-tyč, kde jsou elektrody od sebe vzdáleny 40 cm, lze pozorovat vliv impedance zdroje na průrazné napětí. Pro vyšší impedance zdroje se korónový výboj uplatní vždy na uzemněné elektrodě (Obr. 22). [12]

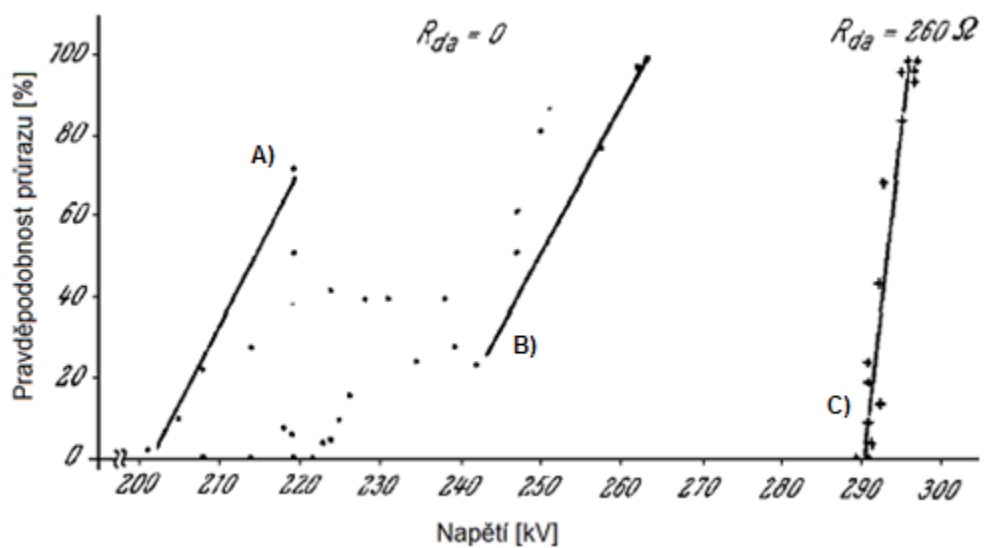


Obr. 22 Vliv zdrojové impedance na průrazné napětí jiskřiště tyč-tyč o vzdálenosti 40 cm se záporným impulsem 1,2/50 μ s, a) $C_b = 500$ pF, b) $C_b = 1500$ pF (převzato z [12])



Obr. 23 Pravděpodobnost průrazu při použití záporného impulsu 1,2/50 μ s na jiskřišti tyč-deska o vzdálenosti 15 cm ve VN hale, $C_b = 1,5$ nF, 40 impulzů (převzato z [13])

Obr. 23 zobrazuje příklad provedeného měření ve VN hale o rozměrech 23x34x19 m na dvanáctistupňovém 3MV rázovém generátoru, jehož výsledkem je smíšené rozdělení pravděpodobnosti. Toto měření bylo provedeno impulsem 1,2/50 μ s na jiskřišti tyč-deska a vzdálenosti 15 cm. V rozmezí 280 kV až 305 kV byl zaznamenán zvýšený nepravidelný rozptyl. Pravděpodobnost průrazu byla stanovena pro každý měřicí bod 40-ti přiloženými impulsy napětí. Nižší 50% průrazné impulsní napětí je stanoveno u distribuční přímky A) $U_{50,1} = 227kV$ a u distribuční přímky B) $U_{50,2} = 307kV$. Pozoruhodná věc na tomto obrázku je skutečnost, že pro jedno průrazné napětí mohou být z důvodu značného rozptylu naměřeny velmi rozdílné pravděpodobnosti průrazu. Například na napětí 282 kV může být naměřena jakákoliv pravděpodobnost v rozmezí 0–100%. Tento nezvyklý a nevysvětlitelný výsledek měření byl ověřen provedením identického měření na stejném jiskřišti s použitím jiného rázového generátoru. Standardní odchylku nelze v těchto případech určit. [13]

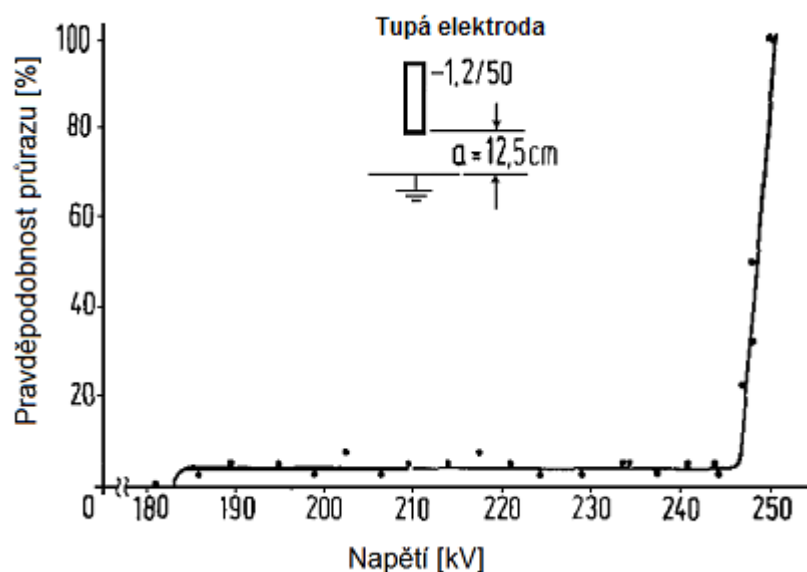


Obr. 24 Pravděpodobnost průrazu při použití záporného impulsu 1,2/50 μ s na jiskřišti tyč-deska o vzdálenosti 15 cm v závislosti na R_{da} ve VN laboratoři, $C_b=1,44$ nF, 40 impulsů (převzato z [13])

Obr. 23, Obr. 24 a Obr. 26 ukazují charakteristické příklady změřené pravděpodobnosti průrazu w , která je funkcí průrazného napětí. Tato měření byla provedena na tupé elektrodě, na které dochází k onomu značnému rozptylu. Test na Obr. 24 byl měřen ve VN laboratoři o rozměrech 10x10x3,5 m pětistupňovým 1MV rázovým generátorem a ukazuje, že připojením vnějšího tlumícího rezistoru $R_{da} = 260 \Omega$ lze ovlivnit smíšené rozdělení pravděpodobnosti průrazu. Tento rezistor byl umístěn mezi kapacitní zátěž a jiskřiště, ačkoli odpor nemá žádný vliv na napětí, aplikované do jiskřiště a udržuje formování a stabilizaci doutnavé koróny. Tato

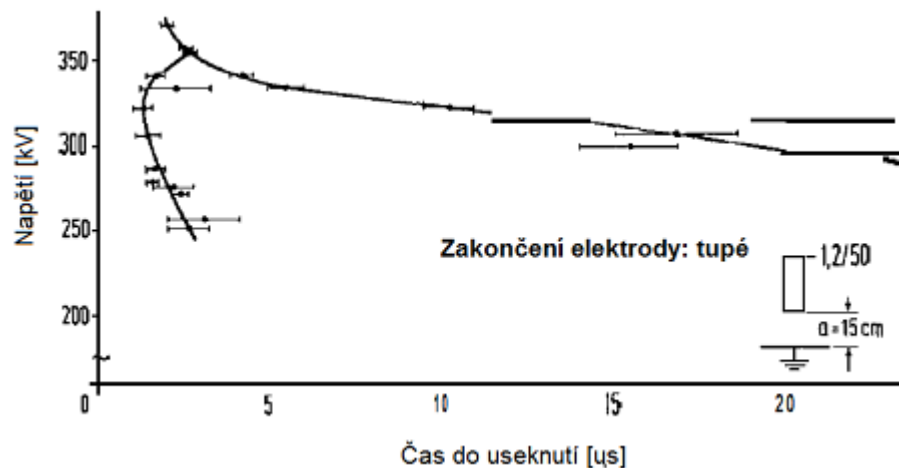
měření ukazují, ze statistického hlediska, že za určitých podmínek zkoušky je významný vliv první (napětově nižší) přímký rozdělení pravděpodobnosti zcela potlačen krátkou vzdáleností $n = 15 \text{ cm}$ a vnějším tlumícím rezistorem. Není-li zde odpor, bude součástí potlačení druhé (napětově vyšší) přímký rozdělení pravděpodobnosti, který je zodpovědný za zvýšení průrazného napětí (Obr. 24). [13]

Je nanejvýš zajímavé srovnání Obr. 23 (testu provedeného ve VN hale dvanáctistupňovým rázovým generátorem) a Obr. 24 (provedeného ve VN laboratoři pětistupňovým rázovým generátorem). Při porovnání smíšených rozdělení pravděpodobnosti, konkrétně napětově nižší přímký zjistíme, že existuje přibližná shoda mezi Obr. 23A – $U_{50,1} = 227 \text{ kV}$ a Obr. 24A – $U_{50,1} = 214 \text{ kV}$. Shoda u napětově vyšší přímký Obr. 23B a Obr. 24B však není. Pokud se k pětistupňovému rázovému generátoru ve VN laboratoři připojí $R_{da} = 260 \Omega$, jak je vidět na Obr. 24C, dojde k přibližnému splnutí distribuční přímký na Obr. 23B – $U_{50,2} = 307 \text{ kV}$ a přímký na Obr. 24C – $U_{50,2} = 294 \text{ kV}$. [13]



Obr. 25 Pravděpodobnost průrazu jiskříště tyč-deska (tupá elektroda) použitím záporného impulsu $1,2/50 \mu\text{s}$ na vzdálenosti $12,5 \text{ cm}$, $C_b = 1,44 \text{ nF}$, 40 impulsů (převzato z [13])

Měření na $12,5 \text{ cm}$ mezeře s použitím impulsu $1,2/50 \mu\text{s}$ a 1 MV impulsním generátorem je obzvláště poučné, viz Obr. 25. Pouze jeden či dva ze 40 aplikovaných napětí na jedné napětově hladině vedlo k průrazu při napětí 186 kV až 246 kV . Stanovení hodnoty výdržného napětí by v tomto konkrétním případě vedlo ke zcela chybnému výsledku. [13]



Obr. 26 Závislost přiloženého napětí na době useknutí na jiskřišti tyč-deska o vzdálenosti 15 cm (převzato z [13])

Časy průrazu U_{50} pro negativní 15 cm jiskřiště tyč-deska, by měla být v okolí 3,4 μs . [13][23] Jak je znázorněno na Obr. 26, je to také případ až do $U_{50,1} = 295\text{kV}$, průrazné časy jsou mezi 1 μs a 4 μs . To je rozsah značně velkého rozptylu v závislosti na pravděpodobnosti průrazu. Blíže mezním čarám se průrazy vyskytují v týlu impulsního napětí po době 15 μs až 20 μs . Je zajímavé podotknout, že žádné průrazy nebyly měřeny při 300 kV od 2 μs až 14 μs přechodného času. S rostoucí hodnotou napětí jsou obě napětíově-časové křivky vykresleny a pokračují vzrůstem jako jedna křivka od 355 kV a 2,7 μs . Měření průrazného času ukazuje, že průrazný proces způsobují dva různé mechanismy. [13]

4.3.5 Atmosférické podmínky

Velikost napětí průrazného výboje závisí na atmosférických podmínkách. Pro danou vzdálenost elektrod se velikost průrazného napětí zvyšuje se zvyšující se hustotou a vlhkostí vzduchu. Pokud však vlhkost vzduchu přesáhne 80 %, je hodnota průrazného napětí nestálá, zvláště pokud jde o výboj podél izolačního povrchu. Proto se atmosférické korekce uplatňují pouze pro přeskok, nikoliv pro přeskok po povrchu. Napětí průrazného výboje se řídí dle tohoto vztahu [1]:

$$K_t = k_1 \times k_2 \quad (4.3.5-1)$$

kde: k_1 korekční činitel hustoty vzduchu
 k_2 korekční činitel vlhkosti vzduchu

Podrobný výpočet korekčního činitele na hustotu vzduchu k_1 a na vlhkost vzduchu k_2 lze najít popsány v [1].

Použitím korekčních činitelů na změřené napětí U , při teplotě t , tlaku p a vlhkosti h lze učinit převod na napětí U_0 , které je vztaženo k normalizovaným atmosférickým podmínkám t_0 , p_0 , h_0 dle následujícího vztahu [1]:

$$U_0 = \frac{U}{K_t} \quad (4.3.5-2)$$

kde: U_0 napětí při normalizovaných atmosférických podmínkách t_0 , p_0 , h_0
 U změřené napětí při atmosférických podmínkách t , p , h
 K_t atmosférický korekční činitel

U všech tvarů elektrod dochází při usazení vlhkého prachu na jejich povrchu k vytvoření tzv. hrotů na elektrodách, se kterými je nutné při přeskoku počítat a které ovlivňují přeskokové napětí. U zakončení elektrod s nižším poloměrem (2-3mm) a doskokovým napětím 40 cm a více nemá prach na přeskokové napětí vliv. Poletující prach ve vzduchu přeskokové napětí nijak neovlivňuje. Přeskokové napětí v homogenním poli při malém doskoku se mění s tlakem dle Paschenova zákona². V silně nehomogenních polích klesá přeskokové napětí s tlakem, přestoupí-li tlak určitou kritickou hodnotu a teprve při dalším zvyšování opět roste. [2]

Referenční normalizovaná atmosféra [1]:

- Teplota $t_0 = 20^\circ\text{C}$
- Absolutní tlak $p_0 = 1013 \text{ hPa}$ (1013 mbar)
- Absolutní vlhkost $h_0 = 11 \text{ g/m}^3$

²Paschenův zákon – pro daný plyn je velikost průrazného napětí závislá pouze na součinu tlaku a vzdálenosti elektrod jiskřiště. Závislost zohledňuje Townsendovy koeficienty a lineární závislosti se přibližuje až při vyšších tlacích. [15]

5 Zkušební testování

5.1 Stanovení základních požadavků

Na začátku bylo nutné vybrat z výsledků již provedených měření ty, které se výrazně lišily od teoretických předpokladů, při nichž docházelo k opakovaným anomáliím či opakováním měření nebylo možné potvrdit správnost předchozího měření naměřením stejných hodnot. Vybrané naměřené hodnoty byly dále mezi sebou porovnávány s cílem nalézt společné parametry laboratorního zapojení, na které je třeba se zaměřit a které dodržet nebo naopak měnit za účelem zjištění jejich vlivu na výsledky zkušebního testu.

Z hlediska ovlivnění reprodukovatelnosti zkušebního testu byly zkoumány tyto parametry:

- Tlak plynu v nádobě
- Teplota
- Typ použitého jiskřiště
- Vzdálenost vzduchové mezery jiskřiště
- Zapojení obvodu a rázového generátoru
- Postup při aplikaci impulsu

Z velkého vzorku výsledků testů se vybralo laboratorní měření s uskupením elektrod s označením R4B, které se z provedených zkoušek vyznačuje nejvíce nehomogenním polem a u této konfigurace byl vyznačen nejčastější výskyt anomálií a nejnižší schopností reprodukovatelnosti. Označení R4B označuje takové uskupení elektrod, u kterého má jedna elektroda polokulové zakončení o poloměru 4 mm a druhá je kulová s označením „BIG“ o průměru 150 mm.

Všechna měření byla prováděna v univerzitní vysokonapěťové laboratoři (*Příloha Q*) v prostorách ZČU v Plzni v hermeticky uzavřené nádobě (*Příloha R*), kde byl udržován konstantní tlak pomocí plynové bomby o složení 95% N₂ + 5% O₂. Na laboratorní nádobě bylo možné nastavení vzdálenosti v rozmezí 40–115 mm a měření bylo prováděno s konstantním krokem mezi napěťovými hladinami 5 kV.

Pokud u daného měření není uvedeno jinak, celkový počet přiložených napětí na jiskřiště dané napětěové hladině je 25.

5.2 Výsledky testů

V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledky vybraných zkušebních testů. Každá tabulka obsahuje informaci o atmosférických podmínkách, za kterých bylo dané měření provedeno a druh jiskřiště, který byl pro měření použit. Řádky tabulky jsou jednotlivé aplikované napětěové hladiny a sloupce označují pořadí aplikace impulsu na jiskřiště na dané napětěové hladině. V prvním (levém) sloupci tabulky je vždy uvedena napětěová hladina a v posledním (pravém) sloupci je pod označením „BD“ (Breakdown) uveden počet průrazných výbojů na dané aplikované hladině.

Tab. 4 Laboratorní zkouška LI 99

Tlak plynu		1,0 bar		Druh jiskřiště		R4B		Interní označení		LI TEST 99																
Teplota		24,5°C		Vzdálenost		40 mm																				
U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	BD
40																										0
45																										0
50																										0
55																										0
60																										0
65					x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	19

Test LI99 (Tab. 4) byl opakován na základě testu LI56 (Příloha A), který ukazoval na smíšené rozdělení pravděpodobnosti průrazu. Opakování tohoto testu bylo provedeno na základě zkoumání možnosti zkrácení měření z důvodu staré náplně plynové tlakové bomby a její přílišné vyčerpání. Po doplnění nového plynu došlo k novému měření s označením LI60 (Příloha C), kde se pravděpodobnost průrazu řídí jednoduchým rozdělením pravděpodobnosti. Na napětí 55 kV došlo ke značnému nárůstu počtu průrazů (o 12 oproti předchozí napětěové hladině) a pravděpodobnostní křivka tak vycházela velmi strmá s velkým skokem a vše nasvědčovalo tomu, že toto měření nebude průkazné. Proto se provedlo další přeměření označené LI79, u kterého opět vyšlo smíšené rozdělení pravděpodobnosti, jako u LI59. Nové měření LI99 vyšlo podobně, jako měření LI60. Na hladině napětí 65 kV došlo k nárůstu počtu průrazů o 19 a měření bylo ukončeno. Statistické vyhodnocení je uvedené v: Příloha I.

Tab. 5 Laboratorní zkouška LI 100

Tlak plynu		1,0 bar		Druh jiskřičky		R4B		Interní označení		LITEST 100																
Teplota		24,3°C		Vzdálenost		40 mm																				
U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	BD
55	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	STOP												
50																						x	x	x		3
55																										0
60		x		x	x	x		x			x		x												x	7
65		x	x	x	x						x									x		x	x	x	x	10
70	x	x		x	x	x	x	x		x	x	x	x		x	x	x									14
75				x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	21
50																										0

Měření LI100 je totožné s testem LI99 s jediným rozdílem – liší se v časovém odstupu 24 hodin mezi měřeními. Jak je vidět z výsledků testu, nepodobá se žádnému z předchozích. Počáteční hladina napětí k měření byla zvolena dle předchozích zkušeností 55 kV. Tato hladina měla být dostatečně nízká na to, aby bylo možné na ní začít měření bez rizika průrazu a postupně proměřit celou charakteristiku. Avšak na této napěťové hladině docházelo z neznámých důvodů k průrazným výbojům již od prvního přiložení napěťového impulsu. Proto se přistoupilo ke snížení o jednu napěťovou hladinu na 50 kV. Dále měření probíhalo v pořádku a bylo ukončeno na napěťové hladině 75 kV s počtem 23 průrazů. Statistické vyhodnocení je uvedené v: *Příloha J*.

Tab. 6 Laboratorní zkouška LI 101

Tlak plynu		1,0 bar		Druh jiskřičky		R4B		Interní označení		LITEST 101																
Teplota		24,3°C		Vzdálenost		40 mm		2-stupňové zapojení RG																		
U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	BD
50												x		x												2
55		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x												x			11
60																										0
65											x	x	x	x	x	x	x	x	x	x						10
70			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	23

Pro tento test bylo provedeno nové zapojení rázového generátoru ze čtyřstupňového do dvoustupňového zapojení. Tato změna ovlivní parametry rázového generátoru dle *Tab. 2* ze zapojení pod označením B do C. Tímto byl nastaven pracovní bod generátoru do jiné pracovní pozice a tím se mělo vyvrátit tvrzení o vlivu parazitních složek konkrétního zapojení rázového generátoru na měřicí aparaturu. Pro nastavení správného nabíjecího napětí bylo nutné pro každou napěťovou hladinu provést samostatnou kalibraci dle vrcholového

voltmetru a upravit hodnotu nabíjecího napětí pro zajištění přesnosti aplikovaného napětí na jiskřiště. Z naměřených hodnot je zřejmé, že počet užitých stupňů rázového generátoru nemá žádný zásadní vliv na měřicí aparaturu a reprodukovatelnost měření tím ovlivněna není. Statistické vyhodnocení je uvedené v: *Příloha K*.

Tab. 7 Laboratorní zkouška LI 102

Tlak plynu		1,0 bar		Druh jiskřiště		R4B		Interní označení		LITEST 102																
Teplota		25,4°C		Vzdálenost		60 mm																				
U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	BD
70																										0
75																										0
80																	x									1
85						x			x									x						x	x	5
90	x	x	x	x	x							x	x	X	x	x	x	x	x	x		x			x	16
95	x	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	X	x	x	x		x		x			x	x	19

Výchozím testem byl LI81, u něhož byla naměřena skoková změna pravděpodobnosti. V rozmezí sousedních napěťových hladin došlo k nárůstu z 2 průrazných výbojů na 21. Výsledky testu LI102 ukázaly na téměř lineární nárůst počtu průrazných výbojů, který nasvědčuje použití jednoduchého rozdělení pravděpodobnosti při vyhodnocování výsledků. Z důvodu toho, že anomálie byly pozorovány spíše na kratších vzdálenostech, měření této a větší vzdálenosti nebylo nutné dále věnovat pozornost. Statistické vyhodnocení je uvedené v: *Příloha L*.

Tab. 8 Laboratorní zkouška LI 103

Tlak plynu		1,5 bar		Druh jiskřiště		R4B		Interní označení		LITEST 103																
Teplota		25,4°C		Vzdálenost		40 mm																				
U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	BD
50		x	x	x	STOP																					
55	x	x	x	STOP																						
60	x	x	x	STOP																						
65	x	x	STOP																							
70			x	x	x	x	x						x					x	x	x	x	x	x			13
75																										0
80													x	x				x								3
85					x		x	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x	x	x	x	x	x	17
90	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	25

rozdělení. Počet průrazných výbojů vzrostl skokově na hladině 70 kV o 22 průrazů a dále se držel na vysokých hodnotách. Statistické vyhodnocení je uvedené v: Příloha N.

Tab. 10 Laboratorní zkouška LI 105

Tlak plynu		1,5 bar		Druh jiskřiče		R4B		Interní označení		LI TEST 105																
Teplota		25,0C		Vzdálenost		40 mm																				
U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	BD
55																										0
60											x															1
65																										0
70		x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	X	x	x	x				x	x	x	x		19
75		x								x	x	x	x	X	x	x	x	x	x		x				x	13
80					x																					1
85	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	25
90			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	23
95							x	x	x	x	x	x		X	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	18

LI105 je opakované měření velmi sporných testů LI103 a LI104. Měření začíná opět na velmi nízké napěťové hladině 55 kV. Již na 70 kV dochází k 19 průrazům a na 85 kV k 25 průrazům. Tyto výsledky se do jisté míry podobají výsledkům testu LI103, kde na 70 kV došlo k 13 průrazům a na 90 kV k 25 průrazům. Tyto dva testy napovídají tomu, že se pravděpodobnost průrazu bude řídit smíšeným rozdělením. Statistické vyhodnocení zde není uvedeno, protože dostupný software neposkytl na základě vstupních dat smysluplné statistické vyhodnocení.

Tab. 11 Laboratorní zkouška LI 94

Tlak plynu		2,5 bar		Druh jiskřiče		R4B		Interní označení		LI TEST 94																
Teplota		25,1°C		Vzdálenost		90 mm																				
U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	BD
155																										0
160																										0
165																										0
170								x																		1
175																										0
180																										0
185																										0
190			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x		20

Tab. 12 Laboratorní zkouška LI 96

tlak plynu	2,5 bar		Druh jiskřiče	R4B		Interní označení		LITEST 96																			
Teplota	26,0°C		Vzdálenost	90 mm																							
U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	BD	
165																										0	
170									x																		1
175																				x		x					2
180							x		x	x	x	x	x				x			x	x	x	x	x	x	x	13
185	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	24

Oproti předchozím testům jsou LI94 a LI96 z určitého hlediska naprostým opakem předchozích testů. Předchozí zkušební testy probíhaly převážně na jiskřičce použitím krátkých vzdáleností vzduchové mezery mezi elektrodami (40-60mm) a při nízkých tlacích v nádobě (1-1,5bar). LI94 a LI96 jsou měřeny při vzdálenosti vzduchové mezery 90 mm a užitím tlaku nádoby 2,5 bar. U LI94 výsledky testu ukazují na velmi strmý nárůst pravděpodobnosti průrazu na napětí 190 kV z 0 na 20 průrazů. Určení pravděpodobnosti průrazu u tohoto měření bude velmi nepřesné. U LI96 je růst počtu průrazů velmi pozvolný a končí na 185 kV s 24 průrazy. U těchto měření se U_{100} bude lišit jen velmi málo, tj. o jednu napěťovou hladinu 5 kV, což se dá považovat za přijatelnou odchylku. Ale U_{50} bude u obou provedených měření značně odlišné a je zcela jisté, že u testu LI94 bude vyhodnoceno velmi nepřesně. Statistická vyhodnocení obou měření jsou uvedena v: *Příloha O* a *Příloha P*.

6 Závěr a zhodnocení

Cílem této práce bylo ověřit a blíže určit možnosti reprodukovatelnosti zkušebních testů při měření atmosférickým impulzem 1,2/50 μ s. Při měření průrazného napětí vzduchové izolace ve VN laboratoři byly zjištěny určité anomálie ve výsledcích některých zkušebních testů a neshoda mezi teoretickým modelováním a praktickým testem. Měřením ve VN laboratoři, fyzikální podstatou, vědeckým vysvětlením vzniku průrazu na základě měření a také reprodukovatelností výsledků testů se jako jeden z mála zabýval v 70. letech 20. století pan Prof. Dr. – Ing. Dr. h. c. Kurt Feser v [12] a [13]. Již v roce 1978 upozornil na skutečnost, že je tato vědecká oblast dosud velmi málo prozkoumána. Na základě velkého počtu provedených laboratorních měření vyřkl závěry o formování a průběhu předvýbojů, výbojů, a druhých koróny. Především však určil tzv. přechodnou oblast (*anglicky „transition range“*), která je zatížena velkým rozptylem hodnoty průrazného napětí a důsledkem toho dochází k velmi malé reprodukovatelnosti výsledků měření. Prof. Feser určil přechodnou oblast pro atmosférický a spínací impuls na vertikálním jiskřišti a vzdálenosti elektrod mezi 5 a 100 cm. Jedná se o interval vzdáleností, kde je vznik výboje velmi nestálý a zkušební testy nelze s dostatečnou přesností opakovat s podobnými výsledky, např. za účelem ověření správnosti zkušebního testu. V této oblasti byl za určitých podmínek zjištěn rozptyl pravděpodobnosti průrazného výboje až 100 %.

Na začátku, před započítím zkušebních testů, bylo nutné vybrat z výsledků již provedených měření ty, které byly odlišné od teoretických předpokladů, při nichž docházelo ke zkreslení výsledků anomáliemi, či selhaly pokusy o opakované měření za účelem potvrzení správnosti měření. Výsledky vybraných testů byly dále mezi sebou porovnávány s cílem nalézt společné parametry laboratorního zapojení. Na ně je třeba se zaměřit – je nutné je dodržet nebo naopak změnit za účelem zjištění jejich vlivu na výsledky zkušebního testu. U měření byly dodržovány konstantní atmosférické podmínky. Teplota byla v celé VN laboratoři na konstantní hodnotě a tlak nádoby byl kontrolován barometrem.

Dle teoretických předpokladů má zkušební test probíhat takto: Se zvyšující se hodnotou napěťové hladiny aplikovaných impulsů na jiskřiště by mělo docházet ke zvyšování počtu průrazných výbojů dle jisté distribuční funkce. Počet průrazů se měl úměrně zvyšovat se zvyšující se aplikovanou napěťovou hladinou a od distribuční funkce se měl lišit maximálně o danou směrodatnou odchylku s . Podle druhu koróny na elektrodách dochází k tzv. smíšené

distribuční funkci, kde se průrazné napětí řídí dle dvou distribučních funkcí s různým sklonem a pro které mohou být určeny dvě různé hodnoty 50% průrazného napětí $U_{50,1}$ a $U_{50,2}$. Mimoto zde průrazné napětí ovlivňuje množství parazitních vlivů, které způsobují zvýšení odchylky od dané distribuční funkce o hodnotu vyšší než je povolená směrodatná odchylka. Druhy korony a jejich uplatnění na průrazné napětí silně závisí na vzdálenosti elektrod a nehomogenitě pole. Čím je nehomogenita pole menší, pole více homogenní a rozložení elektromagnetického pole rovnoměrnější, tím je i vznik průrazného výboje méně předvídatelný a více závislý na ostatních parametrech.

Tato diplomová práce se zaměřuje na případ zkušebního testu s uspořádáním jiskřiště označeném R4B – elektroda s průměrem 4 mm, na kterou je přivedené atmosférické impulzní napětí o kladné polaritě, vs. uzemněná elektroda o tvaru koule s označením "BIG" o průměru 150 mm. Ve většině případů byla nastavena vzdálenost elektrod 4 cm a použitý tlak 1 bar či 1,5 bar. Při tomto uspořádání jiskřiště byly výsledky zkušebních testů výrazněji ovlivněny dvěma druhy anomálií. V prvním případě se pravděpodobnostní rozdělení průrazného napětí neřídí jednoduchou distribuční funkcí, ale výsledky testů ukazují na smíšené rozdělení pravděpodobnosti. Na obou distribučních funkcích mohou být nalezeny hodnoty $U_{50,1}$ a $U_{50,2}$. V druhém případě dochází k velmi strmému nárůstu počtu průrazných výbojů mezi dvěma napětíovými hladinami. V nejhorších případech byl mezi napětíovými hladinami o rozdílu napětí 5 kV naměřen skok v počtu průrazných výbojů o 25 z celkového počtu 25 aplikací napětí na jiskřiště. Stanovení hodnoty U_{50} s dostatečnou přesností a dostačující věrohodností je v těchto případech velmi obtížné.

Dle výzkumů v [13] bylo zjištěno, že na celý zkušební test má v některých případech značný vliv vnitřní impedance zdroje. V tomto výzkumu bylo pro jeden zkušební test upraveno měřicí zapojení tím, že mezi zatěžovací kapacitu a jiskřiště byl připojen rezistor. Tato úprava změnila hodnotu celkové impedance a tím i ovlivnila rozdělení pravděpodobnosti průrazného napětí. V případě této diplomové práce tomu bylo věnováno jedno měření, které přes velké anomálie a nestálé chování průrazného výboje nemohlo potvrdit ani vyvrátit tato tvrzení.

Byl také sledován způsob aplikace impulzu. Protože je v univerzitní VN laboratoři proces aplikace impulzu z rázového generátoru na jiskřiště prováděn manuálně, byl zkoumán vliv obsluhy rázového generátoru na vzniklé anomálie. Všechny provedené testy prováděla jedna

osoba a při aplikaci impulzu na jiskřiště byla věnována zvýšená pozornost dodržení stejného zkušební postupu – rychlosti nabíjení rázového generátoru a přesnosti aplikace napětí na jiskřiště.

Další testy měly za úkol zjistit míru vlivu zapojení rázového generátoru, a to zejména pracovním bodem RG, na reprodukovatelnost. Rázový generátor HAEFELY byl ve výchozím stavu zapojen do zapojení B dle Tab. 2. Pro zkušební test LI101, jehož výsledky jsou uvedeny v Tab. 6, bylo použito dle Tab. 2 zapojení rázového generátoru C. Provedené měření však nijak nezjistilo zásadní vliv na vyskytující se anomálie.

Aby se dosáhlo zpřesnění zkušební testu, celkový počet aplikovaných impulzů na jedné napěťové hladině byl prodloužen z 25 na 40, viz test LI104 v Tab. 9. Tím mělo být docíleno přesnějšího rozdělení pravděpodobnosti průrazného napětí a eliminovat tak ojedinělé anomálie na některých napěťových hladinách. Výsledky tohoto testu nijak nenaznačují, že by prodloužení řady aplikovaných impulzů v tomto případě ovlivnilo nebo způsobilo tyto anomálie.

Při čerpání z již provedených výzkumů a na základě provedených měření lze vyslovit několik závěrů. Rozptyl průrazných napětí, vznikající při aplikaci atmosférického napětí na vzdálenosti elektrod, na kterou se tato práce zaměřuje (konkrétně 4 cm), vykazuje velmi podobné chování a výsledky korespondují s výzkumy [12] a [13] a rozšiřují je. Na těchto vzdálenostech je pravděpodobnostní rozdělení ovlivněno nejen chováním koróny, ale dochází zde i k řadě opakujícím se druhům anomálií, jejichž původ je nejasný. V případě pole, které se blíží homogennímu a vzdálenosti elektrod od 4 cm do 100 cm vykazuje průrazné napětí velký rozptyl a určení indikativních ukazatelů s dostatečnou věrohodností, jako např. U_{50} , je v některých případech velmi obtížné. Opakovat zkušební testy za účelem ověření či potvrzení výsledků je u některých kombinací vzdáleností elektrod a tlaku plynu nemožné.

Pro stanovení obecných závěrů o reprodukovatelnosti zkušebních testů je nutné ve výzkumu pokračovat a rozšířit soubor násobně opakovaných testů s cílem stanovit limitní podmínky reprodukovatelnosti a výsledky testů pak i správně interpretovat, což je časově náročné. Přesto je možné na základě provedeného experimentu formulovat dílčí výsledky.

Ověřené parametry, které nejsou původci, či výrazně neovlivňují zjištěné anomálie:

- **impedance RG** – po vzoru [13] byl mezi RG a zatěžovací kapacitu připojen rezistor, který měl ovlivnit smíšené pravděpodobnostní rozdělení
- **způsob zapojení víceúrovňového RG** – dle *Tab. 2* byl RG zapojen podle typu zapojení *B* a *C* za účelem změny pracovního bodu
- **zvýšení celkového počtu přiložených napětí na každé napět'ové hladině** – celkový počet byl zvýšen z 25 na 40 za účelem eliminování náhodných anomálií
- **snížení počáteční napět'ové hladiny** – první aplikace napětí na jiskřiště byla provedena na napět'ové hladině dostatečně snížené, aby se vyhnulo náhodným přeskokům a došlo k dostatečně plynulému přiblížení k napět'ovým hladinám s očekávanými průrazy
- **přesnost přiložení napětí** – pro eliminování různého manuálního přiložení impulsu všechny ověřovací testy prováděla jedna osoba s důrazem na stejnou rychlost přiblížení k napět'ové hladině
- **vyčerpání plynové bomby** – u některých testů byl zkoumán vliv vyčerpané tlakové nádoby v porovnání s novou plynovou bombou

Pro hlubší objasnění je nutné postupovat cestou opakování konkrétního druhu měření s cílem získat co nejpodrobnější a největší množství výsledků konkrétní zkoušky. Smysl by určitě mělo opakované měření s velmi nízkými počátečními hladinami aplikovaného napětí a ukončení měření až na hladině napětí, kde by na několika předchozích hladinách docházelo k průrazným výbojům v 95 % a více procentech z celkového počtu aplikovaných impulsů na dané napět'ové hladině.

Přínos bych také viděl v provádění záznamu jednotlivých časů průrazů a možností vytvořit grafickou závislost přiloženého napětí na době useknutí, jak tomu bylo provedeno ve výzkumu [13] a je zobrazeno na *Obr. 26*. Vytvoření tohoto grafu a získání relevantních informací je podmíněno velkým počtem dostupných naměřených výsledků pro konkrétní zapojení. Díky časové náročnosti měření nebylo možné se tomuto měření v rámci této práce věnovat podrobněji.

Celkově práce přispěla k eliminování některých teoreticky předpokládaných příčin vznikajících anomálií a definovala kritická uspořádání elektrodového systému, ve kterých je jednoznačná interpretace napěťového testu obtížná. Přínosem je jednoznačné potvrzení správnosti použitého testovacího postupu a potvrzení fyzikální příčiny pozorovaných anomálií, která má základ v procesu výstavby výboje v plynném izolantu. Další výzkum by se měl zaměřit na rozšíření databáze experimentálních dat s cílem formulovat alespoň některé fyzikální příčiny odchylek mezi modelovým a reálným chováním dielektrika. V poslední době je právě této oblasti výzkumu věnována značná pozornost. Důvodem je nahradit SF₆ jinými druhy izolačních médií, která představují menší ekologickou zátěž. V neposlední řadě je zájem vedený také snahou optimalizovat návrh VN komponentů.

Seznam literatury a informačních zdrojů

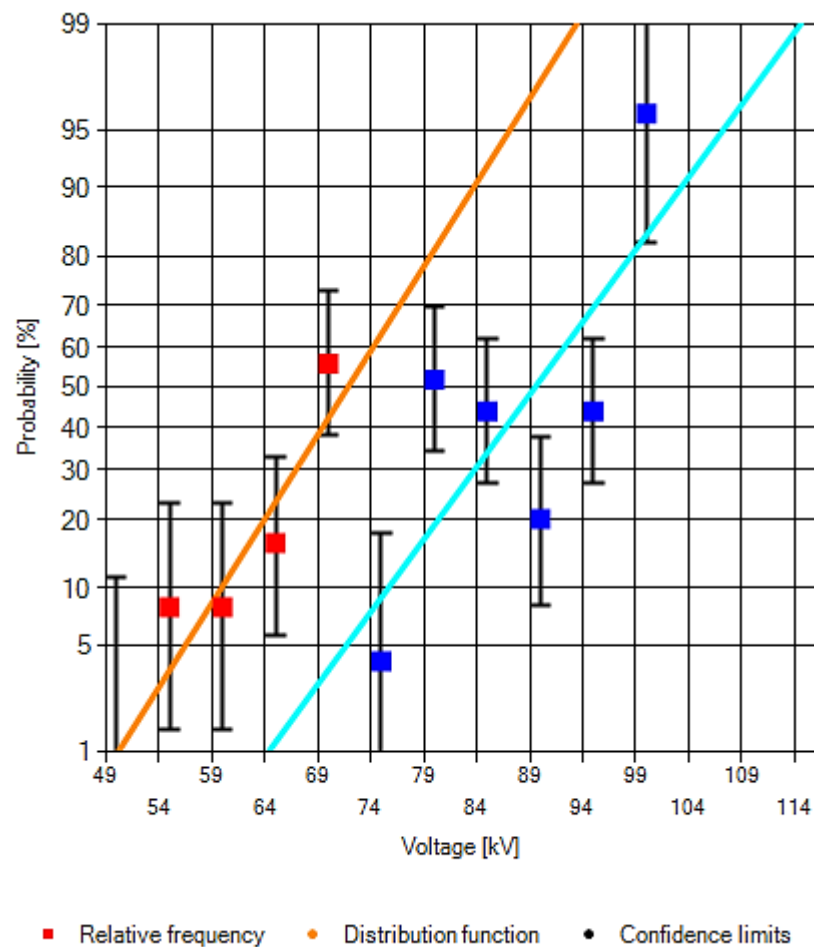
- [1] ČSN EN 60060-1. Technika zkoušek vysokým napětím: Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, srpen 2011.
- [2] VEVERKA, Antonín. Technika vysokých napětí. 2. přeprac. vyd. Praha: SNTL, 1978. 295 s.
- [3] POKORNÝ, Vít. Problematika atmosférického přepětí. Plzeň, 2014. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/StagPortletsJSR168/KvalifPraceDownloadServlet?typ=1&adipidno=58563>. Bakalářská. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Eva MÜLLEROVÁ, Ph.D.
- [4] SKŘEHOT, Petr. 2004. Stručné základy teorie bouřek [online]. Praha: Meteorologická Operativní Rada (M.O.R.), sekce odborných studií a popularizace meteorologie (SOSPM) [cit. 2015-05-07]. Dostupné z: www.astronomie.cz/download/strucnezaklady-teorie-bourek.pdf
- [5] R.H. Golde. Lightning, Vols I and II. Academic Press, London/New York/San Francisco, 1977.
- [6] KUFFEL, E, W ZAENGL a J KUFFEL. High voltage engineering: fundamentals [online]. 2nd ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000, xiii, 239 p. [cit. 2015-02-19]. ISBN 07-506-3634-3. Dostupné z: <http://www.mv.helsinki.fi/tpaulin/Text/hveng.pdf>
- [7] G. CHRISTOPHOROU, Loucas, James K. OLTHOFF, Ravindra ARORA a Sunil PREM. Gaseous Dielectrics VIII: Experimental Estimation of Schwaiger Factor Limit (η_{LIM}) in Atmospheric Air [online]. Springer US, 1998, s. 326-326 [cit. 2015-02-18]. ISBN 978-1-4615-4899-7.
- [8] PEDERSEN, A. On the electrical breakdown of gaseous dielectrics-an engineering approach. In: IEEE Transactions on Electrical Insulation [online]. 1989, s. 721-739 [cit. 2015-02-18]. ISSN 00189367. DOI: 10.1109/14.42156. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=42156>
- [9] IEC Standard 60270 (Third edition, 2000). Partial Discharge Measurements. International Electrotechnical Commission (IEC), Geneva, Switzerland.
- [10] HVPD: On-line Partial Discharge products and test services for worldwide and UK electricity supply industries. On-line PD detection and testing of in-service, medium voltage and high voltage plant. [online]. 2015 [cit. 2015-02-21]. Dostupné z: www.hvdp.co.uk/
- [11] Marx generator. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 3 February 2015 17:30 UTC [cit. 2015-03-03]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Marx_generator
- [12] FESER, K. Dr.-Ing. EMILE HAEFELY & CO LTD. Influence of corona discharges on the breakdown voltage of airgaps [online]. 1971 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://www.haefely.com/pdf/scientific/e1-11.pdf>
- [13] FESER, Kurt. EMILE HAEFELY & CO LTD. Influence of the Pre-Discharges on Breakdown Behaviour of the Negative Rod-Plane Spark-Gap at Standard 1.2/50 Impulse Voltages [online]. 1971 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: <http://www.haefely.com/pdf/scientific/e1-09.pdf>
- [14] MISHRA, C. S.: Die Stoßspannungsentladung bei Beregnung. Diss. Techn. Univ. Munich (1962).
- [15] Paschen's law. (2015, March 16). In Wikipedia, The Free Encyclopedia. Retrieved 10:02, April 1, 2015, from http://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Paschen%27s_law&oldid=651565151

- [16] CARRARA, G., and HAUSCHILD, W. Statistical evaluation of dielectric test results. *Electra* No. 133 (1990), pp. 109-131
- [17] YAKOV, S. Statistical analysis of dielectric test results. *CIGRE Brochure* No. 66 (1991)
- [18] HAUSCHILD, W., and MOSCH, W. *Statistical Techniques for HV Engineering*, IEE Power Series No. 13, Peter Peregrinus Ltd., London, 1992
- [19] VARDEMAN, S. B. *Statistics for Engineering Problem Solving*. IEEE Press/PWS Publishing Company, Boston, 1994
- [20] STEINBIGLER, H. : 'Digitale Berechnung elektrischer Felder', *Elektrotech.Z.*, 1969, [A], 90, pp. 663-667
- [21] FESER, K.: 'Über das Durchschlagverhalten der negativen Stab-Funkenstrecke mit Stossspannungen 1.2/50', *Elektrotech. Z.*, 1970, [A], 91, pp. 321-325
- [23] FESER, K . : *Inhomogene Luftfunkenstrecken bei verschiedener Spannungsbeanspruchung*. Diss. Techn. Univ. Munich (1970)
- [24] *Koordinace izolace elektrických zařízení nízkého napětí*. 2015. *Elektrika.cz* - portál o silnoproudé elektrotechnice, elektroinstalace, vyhlášky, schémata zapojení. [online]. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: <http://elektrika.cz/data/clanky/kiapb021204/view>
- [25] TRNKA, Pavel, Josef PIHERA a Martin ŠIRŮČEK. 2010. *Elektrické stromečky – fenomén v elektroizolačních materiálech* [online]. [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40272.pdf>

Přílohy

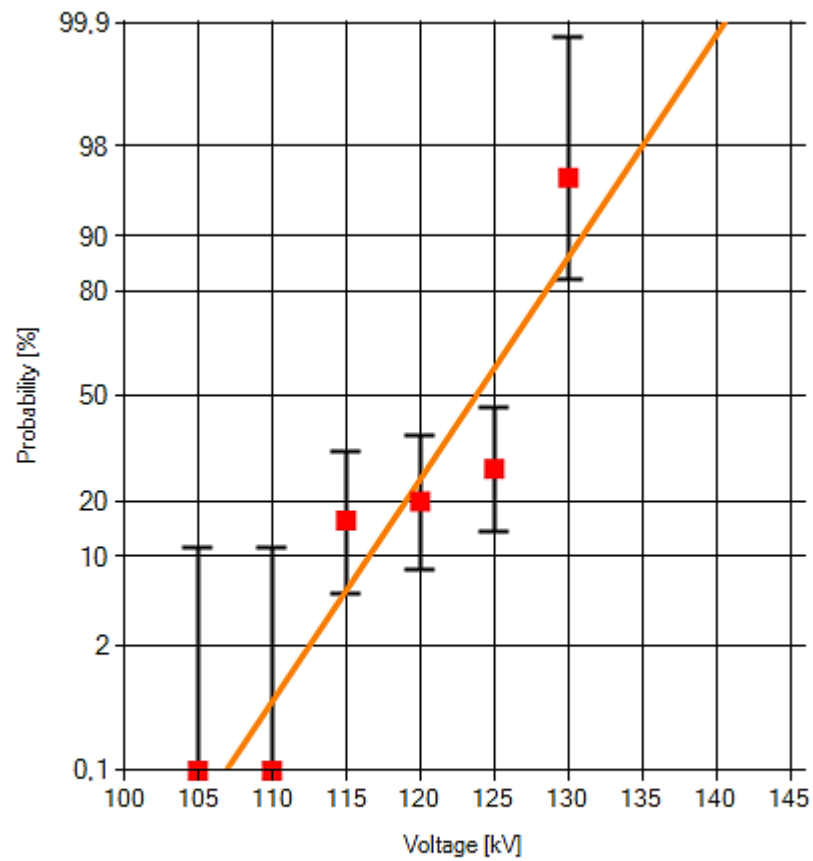
Příloha A – Laboratorní zkouška a statistické vyhodnocení testu LI56

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	BD	
40																										0	
45																											0
50																											0
55				x						x																	2
60										x																x	2
65	x					x				x	x																4
70		x	x		x		x	x	x		x	x	x	x	x	x		x		x							14
75	x																										1
80		x	x	x				x	x	x	x	x	x	x				x					x	x			13
85					x				x					x	x	x	x	x	x					x	x	x	11
90			x	x			x	x		x																	5
95	x				x	x	x	x				x	x	x	x		x								x		11
100	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	24



Příloha B – Laboratorní zkouška a statistické vyhodnocení testu LI59

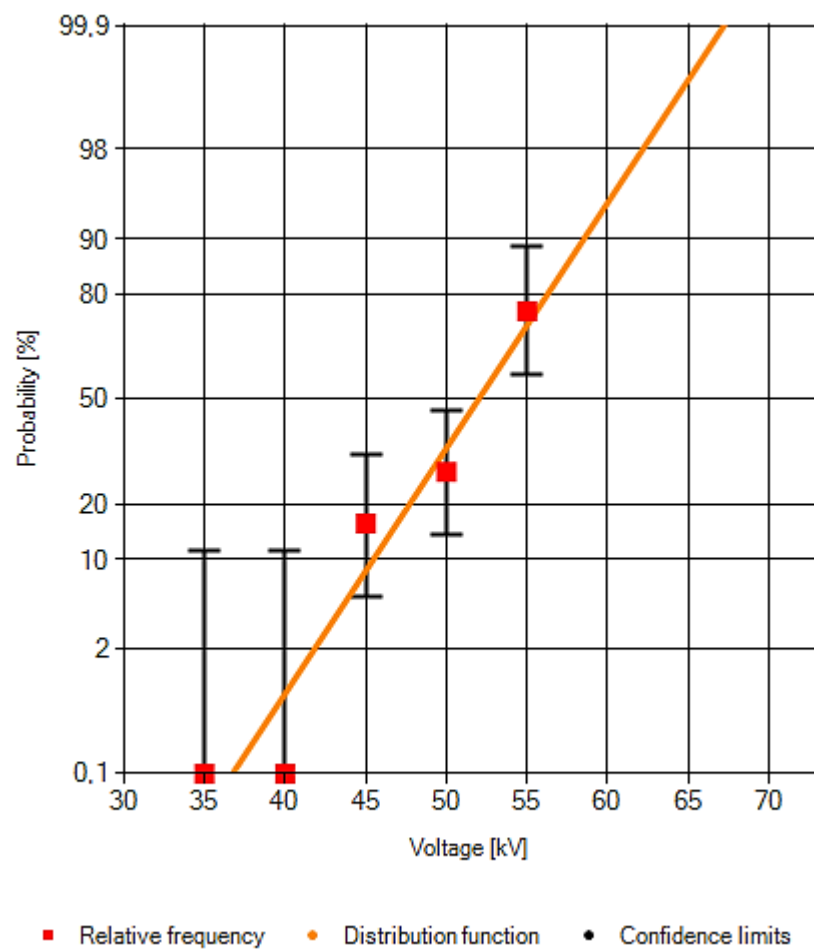
U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	BD
110																x										
105																										0
110																										0
115																			x	x	x	x				4
120	x																		x	x			x	x		5
125		x																	x	x	x	x	x	x		7
130		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	24



■ Relative frequency ● Distribution function • Confidence limits

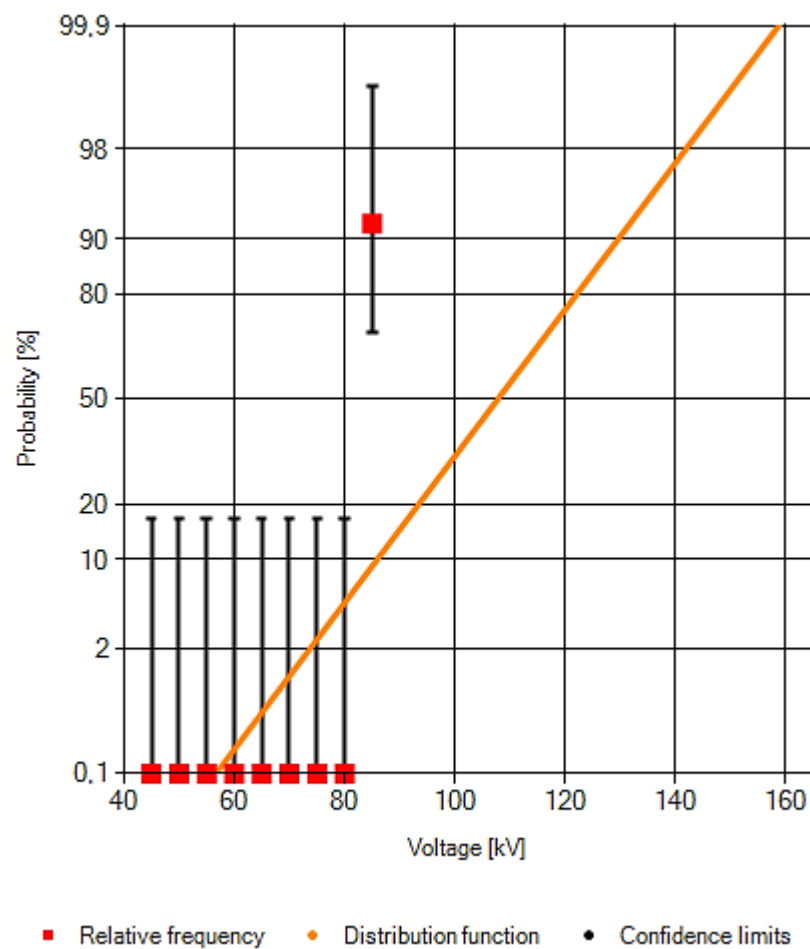
Příloha C – Laboratorní zkouška a statistické vyhodnocení testu LI60

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	BD
50		x	STOP																							
45			x	STOP																						
40								x	STOP																	
35																										0
40																										0
45							x								x	x									x	4
50		x	x	x			x				x											x	x			7
55	x	x	x	x	x	x				x	x		x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	19



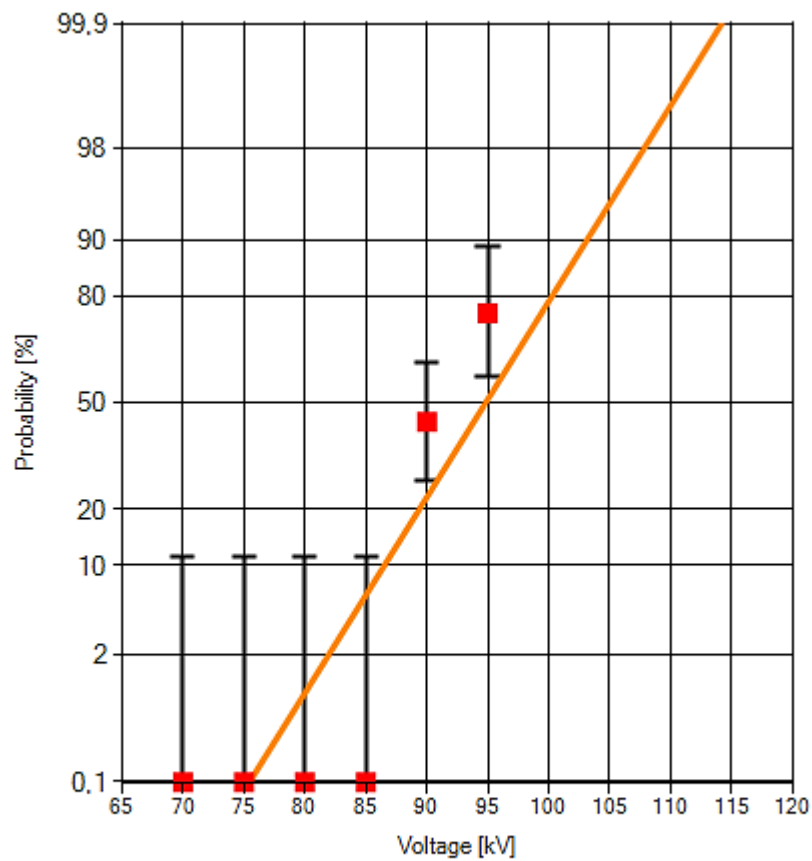
Příloha D – Laboratorní zkouška a statistické vyhodnocení testu LI61

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	BD number	BD time	
45																										0		
55																											0	
60																											0	
65																											0	
70																											0	
75																											0	
80																											0	
85			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	23	1,6 μ s	



Příloha E – Laboratorní zkouška a statistické vyhodnocení testu LI74

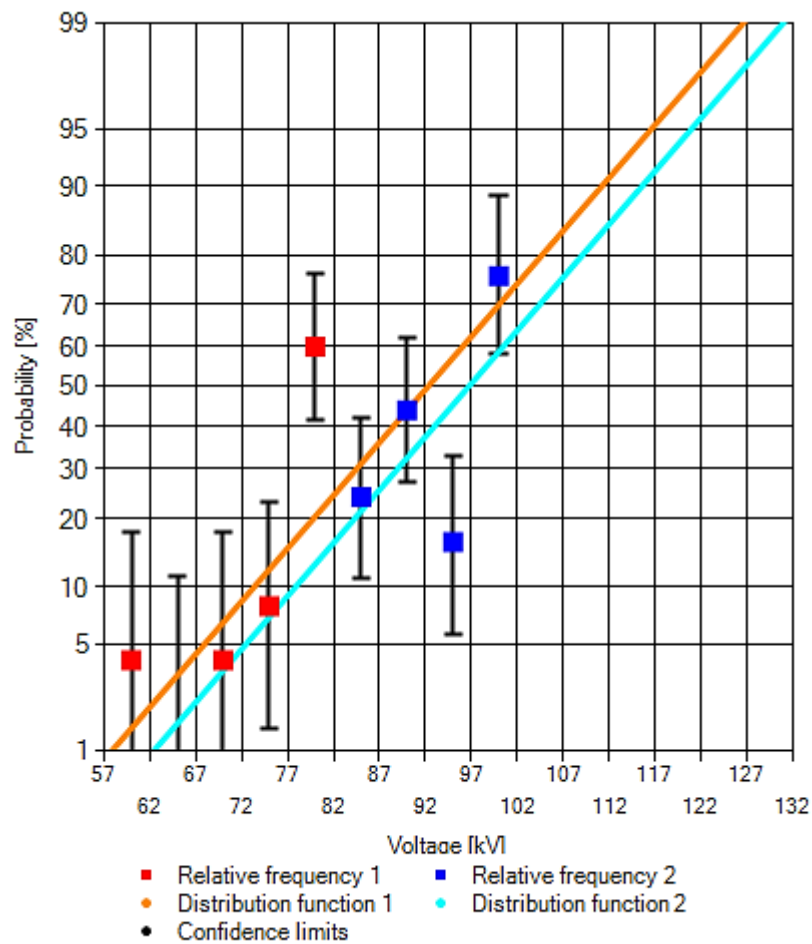
U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	BD number	BD time	
70																											0	
75																											0	
80																											0	
85																											0	
90								x	x	x	x	x				x	x				x	x	x				11	10,8
95			x	x	x	x					x	x	x	x	x		x	x	x		x	x	x	x	x	x	19	10,7/ 2,4



■ Relative frequency ● Distribution function • Confidence limits

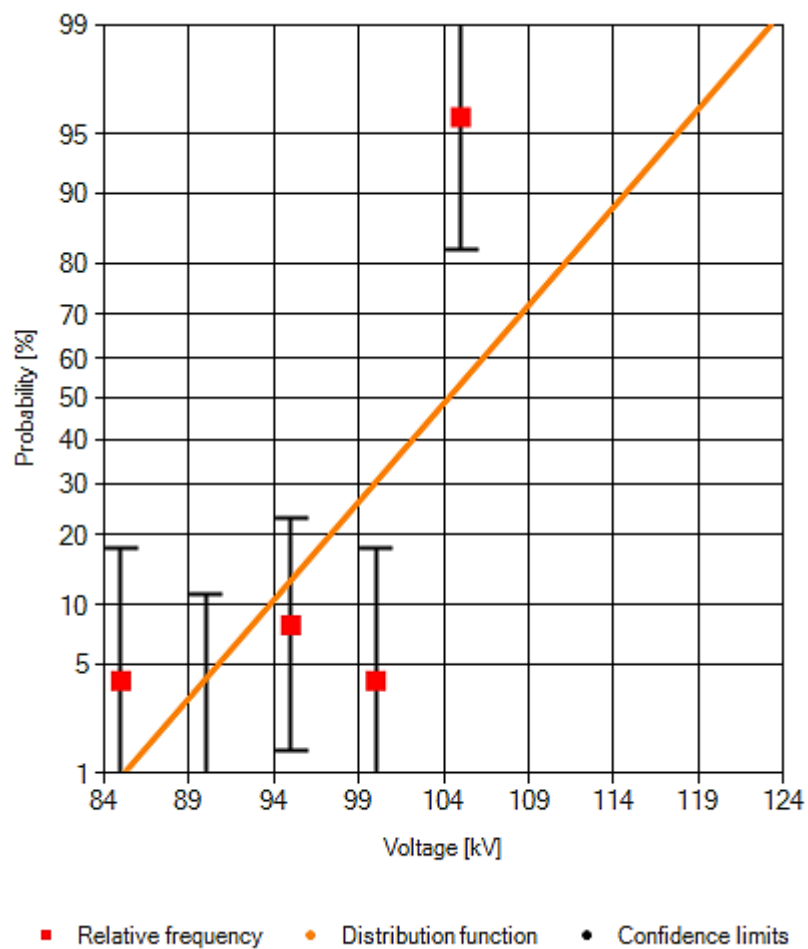
Příloha F – Laboratorní zkouška a statistické vyhodnocení testu LI79

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	BD number	BD time	
40																										0		
45																											0	
50																											0	
55																											0	
60														x													1	8
65																											0	
70	x																										1	4,6
75						x																				x	2	2,4/2
80								x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					15	2/2/2/1,8/1,4/32/2,2
85							x					x	x	x		x									x		6	27/1,2/2/2/2
90	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x															11	
95										x	x	x														x	4	
100	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x									x	x	x	19	



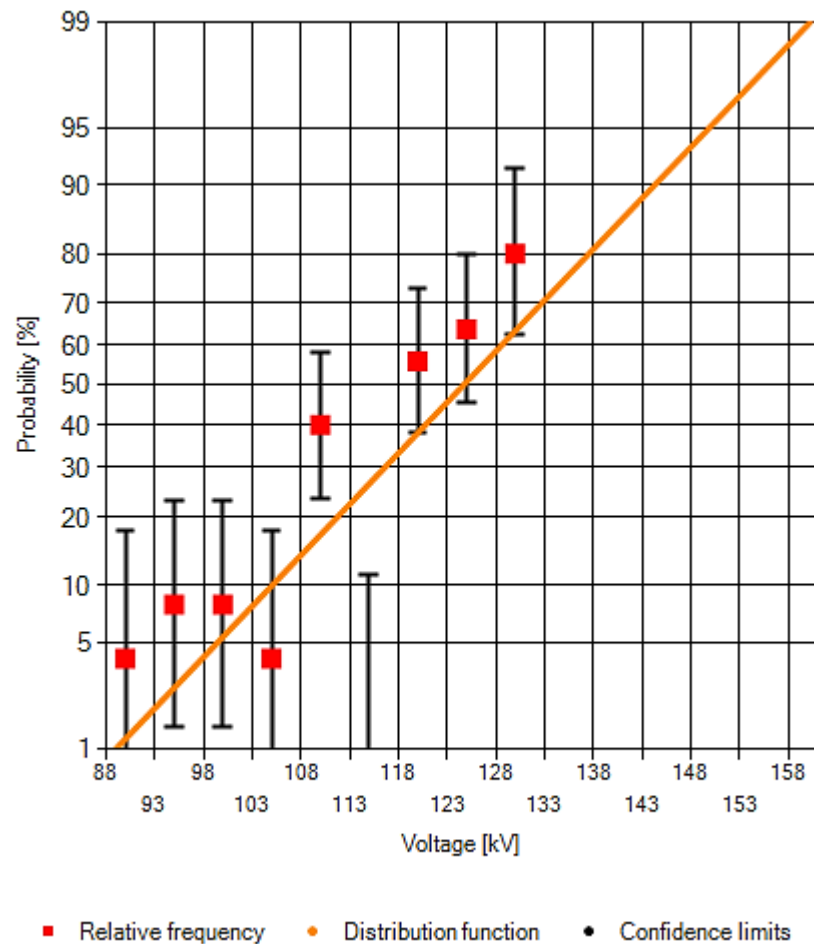
Příloha G – Laboratorní zkouška a statistické vyhodnocení testu LI81

U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	BD number	BD time
75																										0	
80																										0	
85				x																						1	
90																										0	
95															x		x									2	4,6
100	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					21	2/2/2/2,6/2,6
105		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	24	2,4/12,8/1,8/7,2

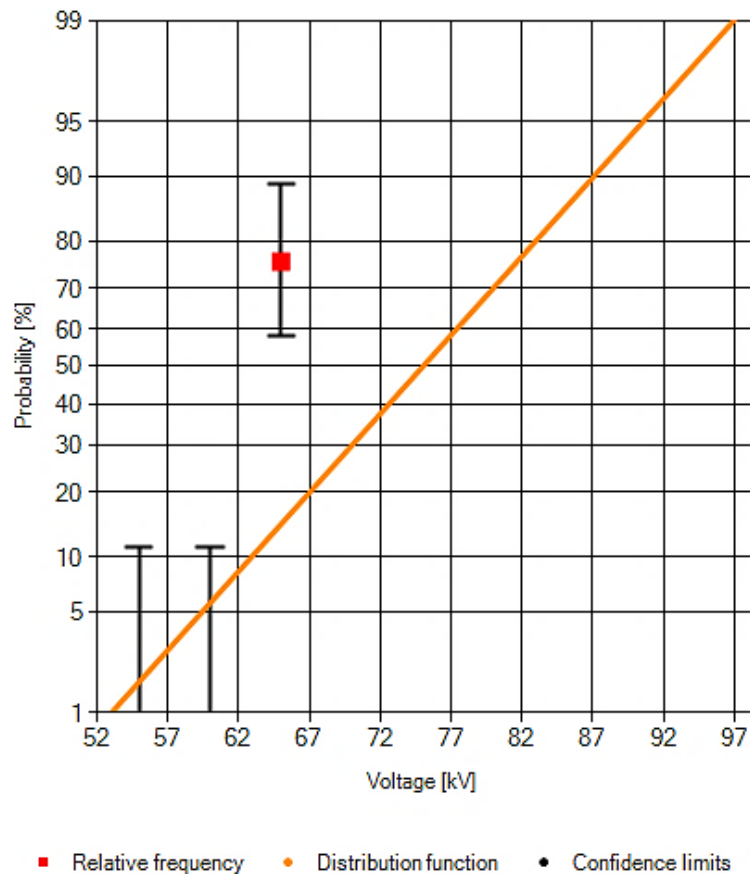


Příloha H – Laboratorní zkouška a statistické vyhodnocení testu LI87

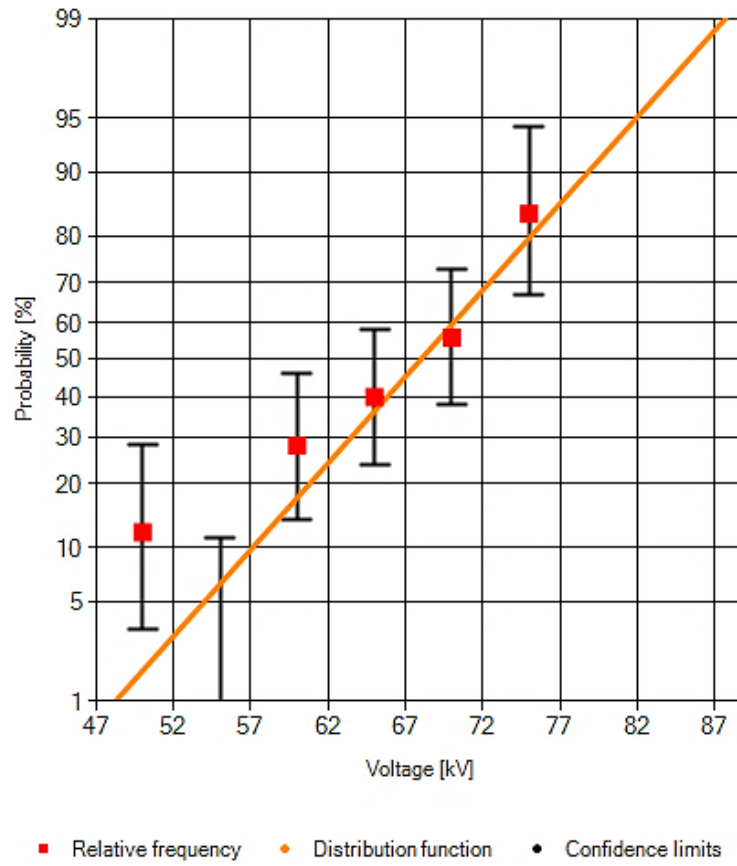
U [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	BD number	BD time
85																										0	
90																				x						1	
95														x										x		2	41/17,2
100	x																								x	2	32,8/59,6
105																										1	37
110										x	x	x	x	x	x											10	46,4/1,4/1,4 ...
115																										0	
120		x	x	x	x	x	x														x	x	x	x		14	1,4/ 1,4/.../41
125	x	x	x	x	x	x	x				x	x		x	x	x	x									16	
130	x	x		x						x	x	x	x	x	x	x	x	x						x	x	20	



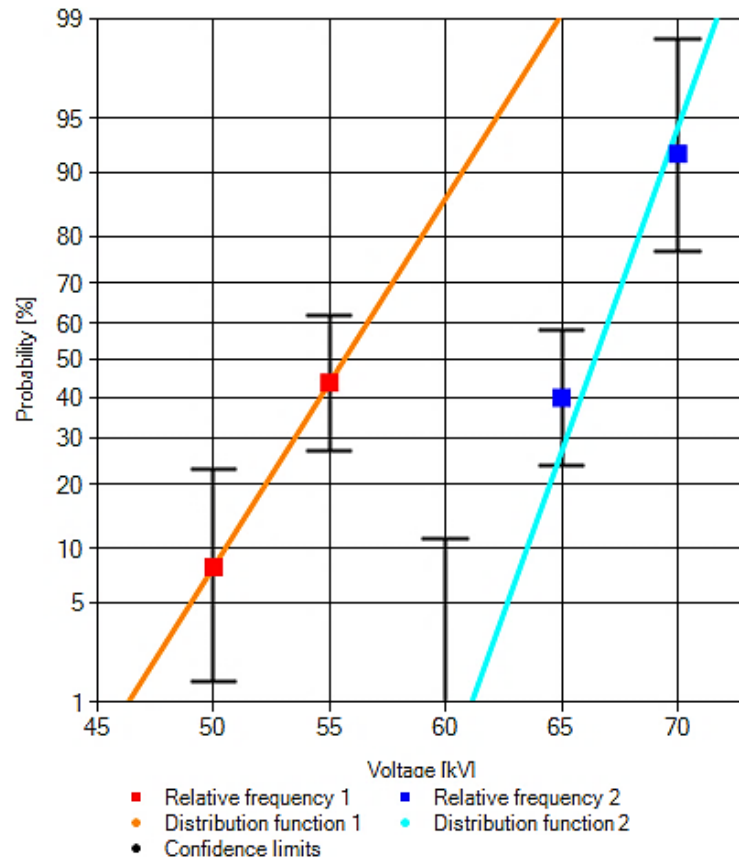
Příloha I – Statistické vyhodnocení testu LI99



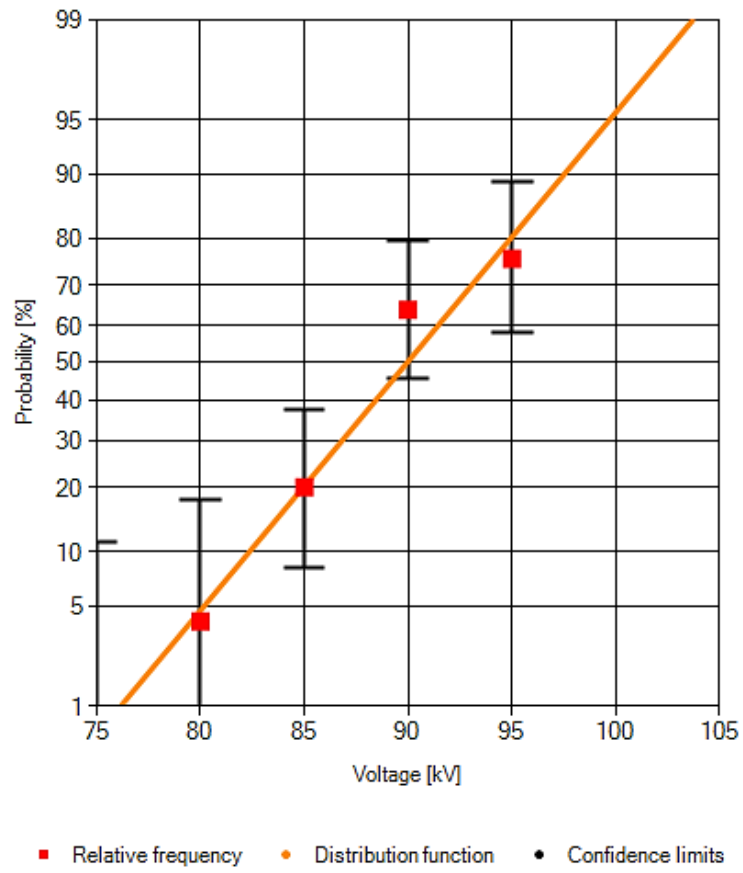
Příloha J – Statistické vyhodnocení testu LI100



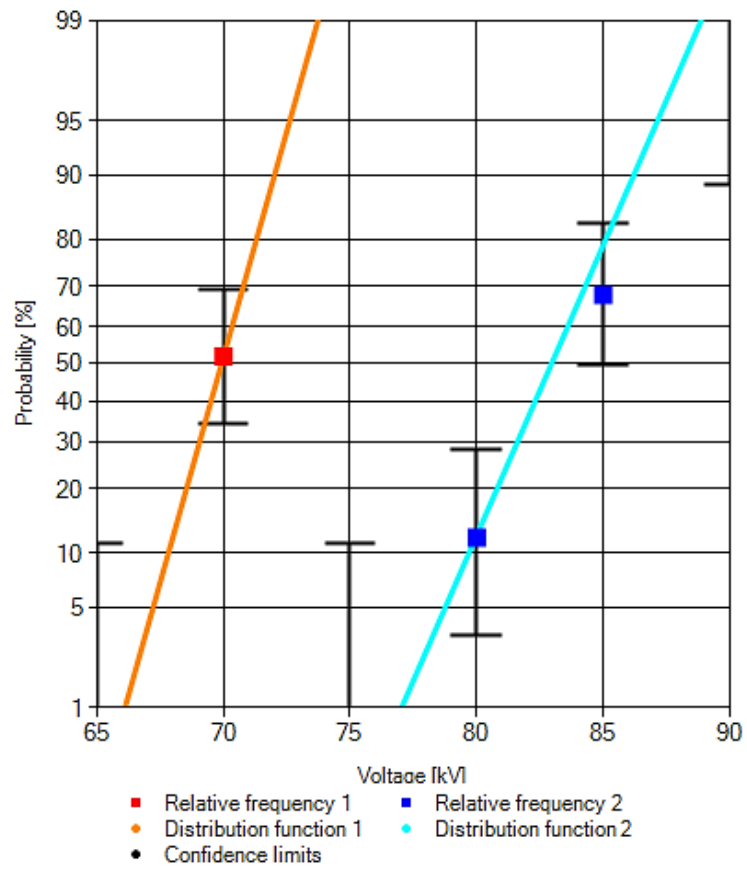
Příloha K – Statistické vyhodnocení testu LI101



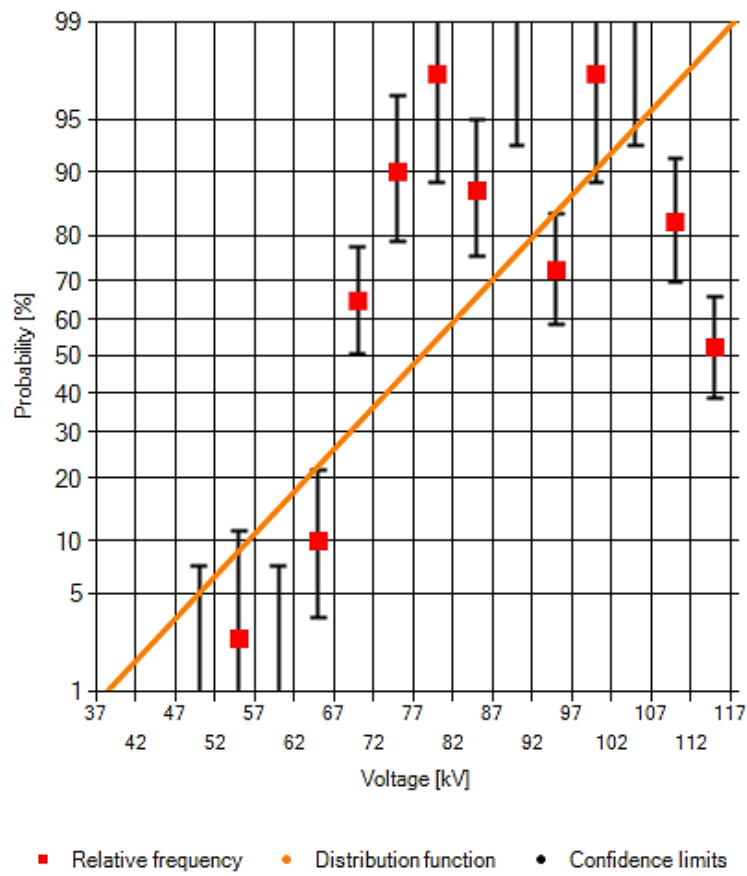
Příloha L – Statistické vyhodnocení testu LI102



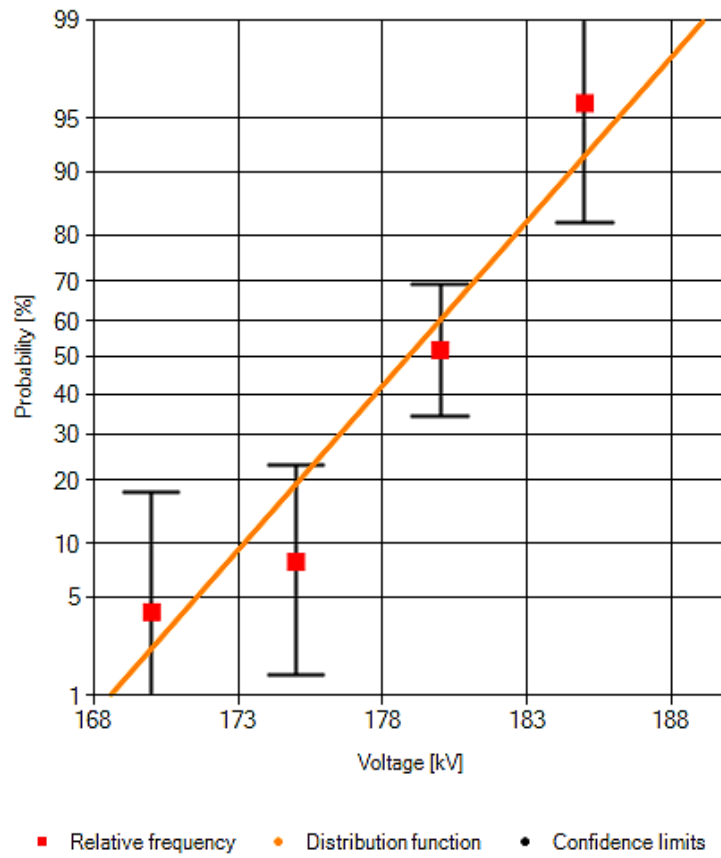
Příloha M – Statistické vyhodnocení testu LI103



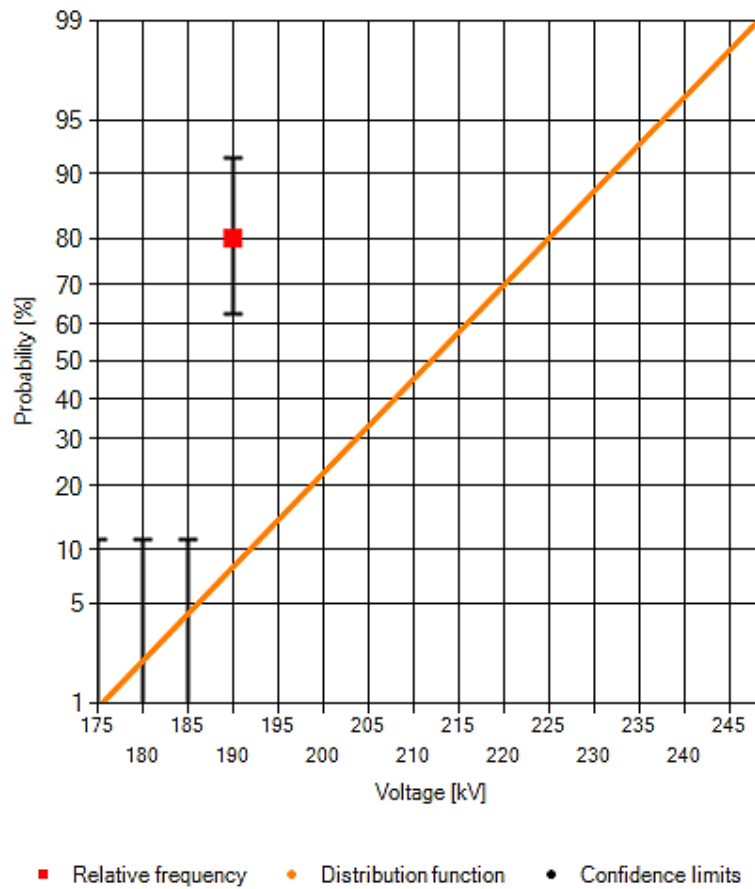
Příloha N – Statistické vyhodnocení testu LI104



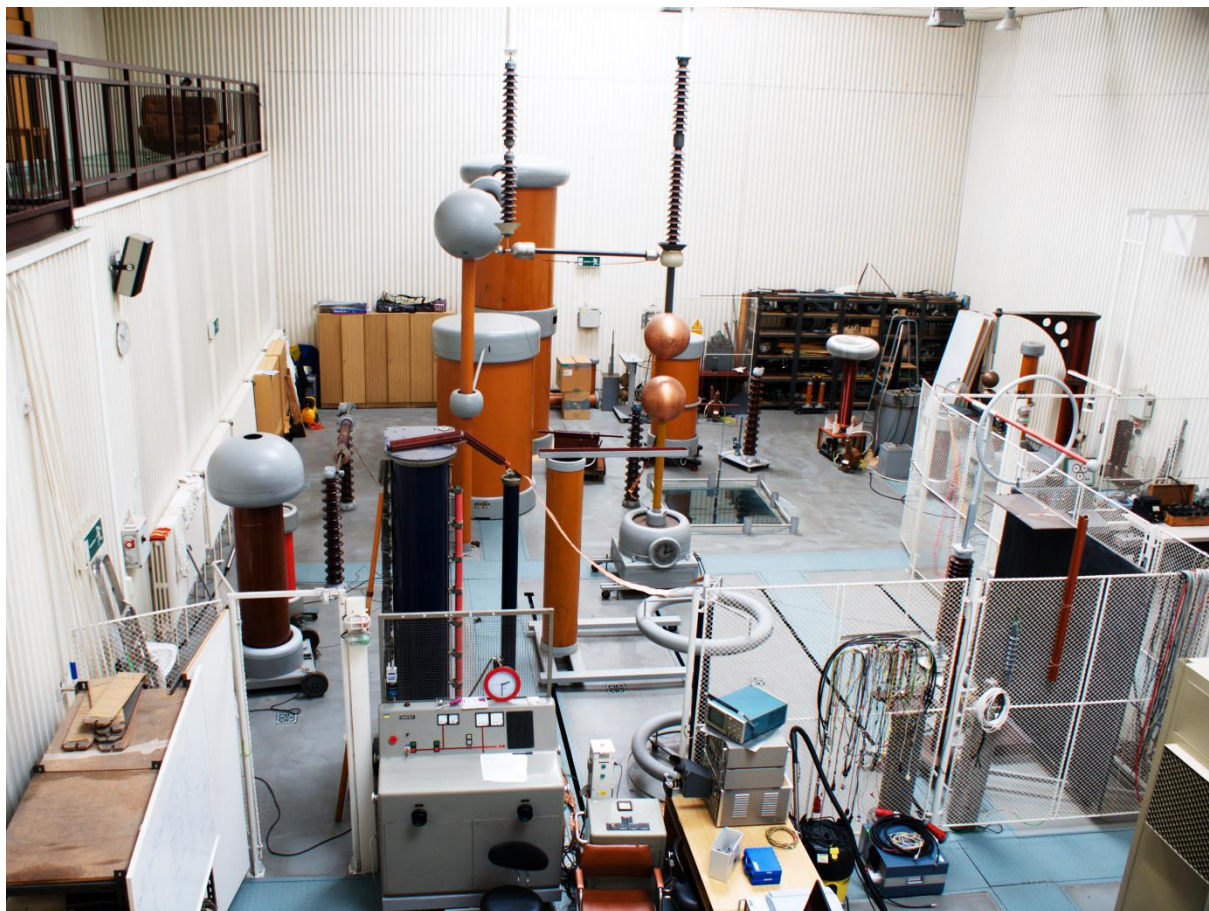
Příloha O Statistické vyhodnocení testu LI94



Příloha P Statistické vyhodnocení testu LI96



Příloha Q Univerzitní vysokonapěťová laboratoř



Příloha R Měřicí nádoba

