

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Průrazné napětí izolace při impulzním namáhání

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petra HEJTMÁNKOVÁ**

Osobní číslo: **E16N0085P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Technická ekologie**

Název tématu: **Průrazné napětí izolace při impulzním namáhání**

Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Uveďte přehled normalizovaných tvarů impulzních napětí pro napěťové zkoušky vysokonapěťových zařízení. S použitím normalizovaných dokumentů a internetových zdrojů diskutujte aspekty zkoušek a volbu parametrů impulzu podle typu zkoušky a zkoušeného zařízení.
2. Zabývejte se možnými změnami průrazného chování izolace pro různé parametry impulzních napětí.
3. Realizujte sérii testů pro ověření vlivu tvaru impulzu na izolační pevnost konkrétního uspořádání a proveďte statistické vyhodnocení.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

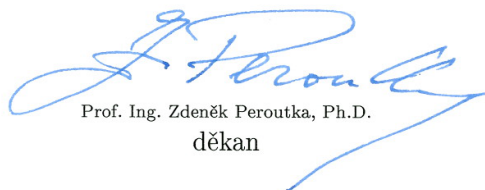
Seznam odborné literatury:

1. ČSN EN 60060-1 Technika zkoušek vysokým napětím - Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky
2. ČSN EN 60060-3 Technika zkoušek vysokým napětím - Část 3: Definice a požadavky na zkoušky na místě


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

Datum zadání diplomové práce: **5. října 2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **30. května 2019**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



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

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku testování pevnosti izolace při jejím namáhání impulzním atmosférickým napětím o různých parametrech. V úvodní části jsou vysvětleny základní pojmy, popsány napěťové zkoušky a shrnuty aktuální poznatky týkající se řešené oblasti zkoumání.

Hlavním cílem práce bylo realizovat sérii napěťových zkoušek, na jejich základě posoudit průrazné chování plynné izolace v závislosti na tvaru impulzu při konkrétním uspořádání zkušebního obvodu a výsledky porovnat s dosavadními zkušenostmi.

Klíčová slova

Izolace, rázový generátor, impulzní napětí, atmosférický oscilační impulz, průrazné namáhání, napěťové zkoušky, 50% průrazné napětí.

Abstract

The master thesis is focused on the issue of insulation strength testing during its stress by lightning impulse with various parameters. At the beginning of this work, there are explained the basic concepts, described the voltage tests and summarized the current knowledge concerning this research area.

The main aim of this work was to realize a series of voltage tests, and to consider breakdown behavior of gaseous insulation depending on the shape of the impulse in the particular arrangement of the test circuit on these tests, and to compare the results with previous experience.

Key words

Insulation, impulse generator, oscillating lightning impulse, breakdown stress, voltage tests, 50% breakdown voltage.

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala 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 29.05.2019

Petra Hejtmánková

Poděkování

Touto cestou bych ráda poděkovala vedoucí mé diplomové práce, paní doc. Ing. Evě Müllerové, Ph.D., za cenné profesionální rady a připomínky, za velkou ochotu, se kterou se mi věnovala, a za metodické vedení práce, které vedlo k jejímu dokončení. Také bych ráda poděkovala celé mojí rodině za podporu při studiu.

Obsah

POUŽITÉ SYMBOLY A ZKRATKY	9
ÚVOD.....	12
1 UVEDENÍ DO PROBLEMATIKY IMPULZNÍHO NAMÁHÁNÍ VN ZAŘÍZENÍ.....	14
1.1 IZOLACE A JEJÍ ELEKTRICKÁ PEVNOST	15
1.2 ZDROJ ZKUŠEBNÍHO NAPĚTÍ	17
1.2.1 Jednostupňový impulzní generátor	18
1.2.2 Vícestupňový impulzní generátor	19
1.2.3 Vzájemná vazba mezi zdrojem impulzního napětí a testovaným objektem.....	21
1.3 IMPULZNÍ NAPĚTÍ A JEHO PARAMETRY	23
1.3.1 Atmosférické impulzní napětí (LI)	24
1.3.2 Spínací impulzní napětí (SI)	30
1.3.3 Parametry ovlivňující tvar testovacího impulsu	33
1.3.4 Impulzní napětí s velmi strmým čelem (VFF).....	35
2 TEORIE ZKOUŠEK IMPULZNÍM NAPĚTÍM	38
2.1 DRUHY ZKUŠEBNÍCH POSTUPŮ.....	38
2.1.1 Zkoušky průrazným výbojem.....	38
2.1.2 Zkoušky výdržným napětím.....	42
2.2 VYHODNOCOVÁNÍ ZKOUŠEK – STATISTIKA A DISTRIBUČNÍ FUNKCE	44
3 SHRUTÍ DOSAVADNÍCH POZNATKŮ	46
4 PRAKTICKÉ TESTOVÁNÍ NAPĚŤOVÉ PEVNOSTI PLYNNÉHO IZOLANTU	49
4.1 SCHÉMA ZAPOJENÍ KONKRÉTNÍHO USPOŘÁDÁNÍ MĚŘICÍHO OBVODU.....	49
4.2 POPIS ZAŘÍZENÍ A POSTUP MĚŘENÍ	49
4.3 STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	53
4.4 VYHODNOCENÍ PRŮRAZNÉHO CHOVÁNÍ ZKOUŠENÉ IZOLACE.....	60
ZÁVĚR.....	66
SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ.....	67
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A DALŠÍCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	69
SEZNAM PŘÍLOH.....	71

Použité symboly a zkratky

a (V)	... označení hodnoty napětí, při které došlo k jeho zhroucení (Obrázek 1.9)
C (F)	... kapacita
C_b (F)	... základní zatěžovací kapacita generátoru při zkoušce kapacitního TO
C_i (F)	... impulzní kapacita generátoru
C_{i_n} (F)	... impulzní kapacita n-stupňového generátoru
C_l (F)	... zatěžovací kapacita generátoru
C_{lb} (F)	... základní zatěžovací kapacita generátoru při zkoušce obecného TO
C_{lt} (F)	... zatěžovací kapacita obecného testovaného objektu
C_{to} (F)	... zatěžovací kapacita testovaného objektu kapacitního charakteru
f (-)	... hustota pravděpodobnosti
f_0 (Hz)	... přirozená frekvence
h (-)	... četnosti přeskoků
k (-)	... počet průrazných výbojů
L (H)	... indukčnost
L_s (H)	... indukčnost cívky připojené do obvodu mezi zdroj a zátěž
m (-)	... počet napěťových hladin (testovacích skupin)
n (-)	... stupně rázového generátoru (kapitola 1.2.2)
n (-)	... počet napěťových impulzů (kapitola 2.1.1)
O (s)	... skutečný počátek
O_l (s)	... zdánlivý počátek
p (-)	... pravděpodobnost průrazu
R (Ω)	... odpor
R_c (Ω)	... nabíjecí odpor generátoru
R_f (Ω)	... čelní odpor generátoru
R_t (Ω)	... týlní odpor generátoru
R_{t_n} (Ω)	... týlní odpor n-stupňového generátoru

s (-)	... poměrná odchylka napětí
t (s)	... čas
T (s)	... časový interval
T_{AB} (s)	... časový interval mezi body A a B
t_0 (s)	... čas počátku impulsu
T_1 (s)	... doba čela vlny
T_2 (s)	... doba půltýlu vlny
T_c (s)	... doba do useknutí (doba trvání useknuté vlny)
T_d (s)	... doba vrcholu vlny (nad 90 % hodnoty maximálního impulzního napětí)
t_i (s)	... čas průrazu
T_p (s)	... doba poklesu napětí
t_p (s)	... čas vrcholu impulsu
T_v (s)	... doba do vrcholu
U (V)	... napětí
U_0 (V)	... nabíjecí napětí (maximální hodnota stejnosměrného napětí)
$U_{0\Sigma}$ (V)	... kumulativní nabíjecí napětí
U_{10} (V)	... hodnota napětí s 10% pravděpodobností průrazného výboje
U_{50} (V)	... hodnota napětí s 50% ($U_{50\%}$) pravděpodobností průrazného výboje
U_i (V)	... i-tá zkušební napěťová hladina, kde $i = 1 - m$
ΔU (V)	... napěťový rozdíl zkušebních hladin
U_{imp} (V)	... výstupní impulzní napětí
$U_{imp n}$ (V)	... výstupní impulzní napětí n-stupňového generátoru
$U_{imp p}$ (V)	... vrchol (maximální hodnota amplitudy) napětí U_{imp}
U_p (V)	... přeskokové napětí
U_{ss} (V)	... vstupní stejnosměrné napětí zdroje
β (%)	... velikost překmitu (Obrázek 1.5)
η (-)	... činitel účinnosti (využití) impulzního generátoru
η_c (-)	... účinnost určená parametry obvodu generátoru

η_s (-)	... účinnost určená tvarem vygenerovaného impulzu
τ_f (-)	... čelní časová konstanta
τ_t (-)	... týlní časová konstanta
ALI	... aperiodické atmosférické napětí (aperiodic lightning impulse)
ASI	... aperiodické spínací napětí (aperiodic switching impulse)
ES	... elektrizační soustava
GIS	... plynem izolované systém (gas insulated system)
LI	... atmosférické napětí (lightning impulse)
MN	... malé napětí
NN	... nízké napětí
OLI	... oscilační atmosférické napětí (oscillating lightning impulse)
OSI	... oscilační spínací napětí (oscillating switching impulse)
PE	... polyethylen
PVC	... polyvinylchlorid
SF ₆	... fluorid sírový
SI	... spínací napětí (switching impulse)
SJ	... spínací jiskřiště
SW	... software
TO	... testovaný objekt
UVN	... ultra vysoké napětí
VFF	... impulzní napětí s velmi rychlým čelem (very fast front impulse voltage)
VN	... vysoké napětí
VVN	... velmi vysoké napětí
ZVN	... zvláště vysoké napětí
GWP	... potenciál globálního oteplování (global warming potential)

Úvod

Elektrická energie je dnes nezbytnou součástí našeho života. Je tedy velmi důležité zajistit v každém okamžiku nepřetržitou, spolehlivou a bezpečnou dodávku elektřiny od jejího zdroje až ke koncovému spotřebiteli. Tuto dodávku zajišťuje elektrizační soustava (ES), která obsahuje mnoho elektrických zařízení, jejichž spolehlivost ovlivňuje i spolehlivost výroby, přenosu a distribuce elektřiny. Dodávka elektrické energie je tedy závislá na spolehlivosti elektrizační soustavy, přičemž spolehlivost ES je dána spolehlivostí jejích dílčích prvků.

Jednou z častých příčin výpadku dodávky elektřiny je úder blesku do některého ze zmíněných prvků soustavy, nebo přechodové jevy, které vznikají při spínacích procesech či jiných manipulacích na zařízeních ES. Pro simulaci blesku slouží impulsní generátory, díky kterým je mimo jiné dnes možné ověřit, jak vysoké napětí jsou schopny snést jednotlivé prvky v ES či jejich izolace a také určit způsob šíření přepětí po těchto prvcích. Tyto generátory mohou také simulovat přepětí, které vzniká při odpojování nebo připojování zdrojů elektrické energie do sítě či jiné manipulaci na zařízeních v soustavě. Způsoby testování jsou stanoveny v příslušných normách.

Tato práce se zabývá vlivem tvaru (parametrů) zkušebnímu napěťového impulzu na izolační pevnost (průrazné chování izolace). Některé výzkumné práce ukazují, že normalizovaný tvar zkušebnímu impulzu nemusí být ve všech případech optimální variantou pro ověření chování izolace VN a VVN zařízení. Většina těchto prací se zaměřuje na testy plynu SF₆ (fluorid sírový).

Cílem mé práce je shrnout aktuální poznatky z řešené problematiky a rozšířit již získané poznatky praktickými testy v laboratoři VN, kde zkoušeným izolačním materiálem je plynná izolace tvořená syntetickým vzduchem. Tento izolant je testován jako jedna z možných alternativ pro plyn SF₆, který je součástí skupiny plynů uváděných v souvislosti s globálními klimatickými změnami (Kjótský protokol k rámcové úmluvě Organizace spojených národů o změně klimatu, Příloha A).

Plynná izolace tvořená SF₆ byla a dosud je široce používána v energetických zařízeních díky své vysoké spolehlivosti a kompaktnosti. Vzhledem k tomu, že plyn SF₆ má však vysoký potenciál globálního oteplování (GWP) 23 500, požadavek na snížení jeho vlivu na životní prostředí se zvyšuje. Z tohoto důvodu je například vyvíjena snaha snižovat množství emisí SF₆ do atmosféry či hledat alternativní řešení k plynem izolovaným systémům (GIS) využívajících SF₆, jak je uvedeno mimo jiné v [22].

Z výše uvedených okolností vyplývá, že je potřeba studovat a z technických hledisek posuzovat základní a praktické vlastnosti těchto hledaných alternativ. Těmito potenciálními alternativami využitelnými pro GIS jsou myšleny systémy, které používají plyny přírodního původu (suchý vzduch, N_2 , CO_2) a směsi plynů N_2/SF_6 , a které mohou nahradit stávající plynem SF_6 izolované systémy. Mezi hlavní zařízení, která jsou předmětem studia a jsou použitelná pro GIS, je možno například řadit plynem izolované rozvodny, vypínače, plynem izolované zapouzdřené vodiče a spínací zařízení. [22]

Informace uvedené v [22] mohou pomoci snížit dopady stávajících plynem izolovaných systémů s SF_6 na životní prostředí.

Pro testy, které v rámci diplomové práce realizuji, je zvolen zkušební postup podle ČSN EN 60060-1 [1], zkoušky více hladinami (Třída 1). Jako zkušební napětí je použito atmosférické oscilující impulzní napětí.

Práce navazuje na diplomovou práci pana inženýra Dunovského „Vliv parametrů napěťového impulsu na průrazné chování izolace“, který v praktické části své práce využíval jiné tvary zkušebních impulsů.

1 Uvedení do problematiky impulzního namáhání VN zařízení

Zařízení provozovaná na hladinách obecně vysokého napětí (tj. jde o hladiny VN, VVN, ZVN, UVN) nám umožňují bezproblémový přístup k elektrické energii v každém místě a životní situaci. Jejich využití k dálkovému přenosu elektrické energie především minimalizuje její ztráty. [3]

Zařízení v ES lze dle velikosti napětí rozdělit na základě normy ČSN 330010 ed. 2 [14] do několika skupin (viz Tabulka 1.1).

Tabulka 1.1: Rozdělení elektrických zařízení podle napěťových hladin. [14]

Napěťové pásmo*)	Označení napětí		Název zařízení	Jmenovité napětí		
				v uzemněné soustavě		v izolované soustavě
	Mezinárodní	české		mezi vodičem a zemí	mezi vodiči	mezi vodiči
I	ELV	MN	zařízení malého napětí	do 50 V**) včetně	do 50 V**) včetně	do 50 V**) včetně
II	LV	NN	zařízení nízkého napětí	nad 50 V do 600 V včetně	nad 50 V do 1 000 V**) včetně	nad 50 V do 1 000 V**) včetně
–	HV***)	VN	zařízení vysokého napětí	nad 0,6 kV a menší než 30 kV	nad 1 kV a menší než 52 kV	nad 1 kV a menší než 52 kV
		VVN	zařízení velmi vysokého napětí	od 30 kV a menší než 171 kV	od 52 kV a menší než 300 kV	od 52 kV a menší než 300 kV
		ZVN	zařízení zvlášť vysokého napětí	–	od 300 kV do 800 kV včetně	–
		UVN	zařízení ultra vysokého napětí	–	nad 800 kV	–

Poznámky k tabulce:

*) *Napěťová pásma I a II v oblasti napětí do 1 000 V jsou stanovena normou ČSN IEC 449. V oblasti zařízení vysokého napětí uvádějí technické normy IEC a EN (např. ČSN EN 61936-1 a ČSN EN 50341-1) rozsah napětí, pro který se uvádějí nejvyšší napětí pro zařízení od 3,6 kV do 800 kV včetně.*

***) *Pro stejnosměrná zařízení se za malá napětí považují jmenovitá napětí do 120 V včetně, za nízká napětí se považují jmenovitá napětí vyšší než 120 V do 1 500 V včetně, za vysoká napětí se považují napětí vyšší než 1 500 V.*

****) *Obecně se v mezinárodních a evropských normách napětí nad 1 kV mezi vodiči uvádí jako vysoké napětí a označuje se – HV. Jsou v něm zahrnuta napětí označovaná podle této normy VN, VVN, ZVN a UVN. V normách IEC, EN a v jiných dokumentech EU i v dokumentech některých států se uvádí též tzv. střední napětí (medium voltage – MV), které svým rozsahem napětí odpovídá přibližně v ČR používanému VN. Uvádí se o něm, že spadá pod termín vysoké napětí (HV). Mezní hodnoty tohoto napětí nejsou celosvětové ani celoevropsky jednotně stanovené. Proto není toto napětí v této normě uvedeno. HV také může označovat nejvyšší napětí ze dvou nebo více napětí použitých v přístroji nebo v instalaci, přičemž LV pak označuje nejnižší ze dvou nebo více napětí použitých v přístroji nebo v instalaci (viz např. ČSN IEC 60050-151). Takovéto označení se uplatňuje například u transformátorů pro označení jeho vinutí.*

Ve zkušebnách VN jsou testována zařízení ES na úrovních VN, VVN, ZVN i UVN. [3]

Jelikož se ve své diplomové práci zabývám průrazným chováním těchto zařízení při zkouškách impulzním napětím a v její praktické části zkoumám elektrickou pevnost plynného izolantu, objasňuji v této úvodní kapitole nejprve základní pojmy řešené problematiky. Dále zde popisuji zdroj zkušebního napětí a jeho vzájemnou vazbu se zkoušeným objektem a charakterizují průběhy a hlavní parametry různých druhů napěťových impulzů používaných při napěťových zkouškách.

1.1 Izolace a její elektrická pevnost

Izolanty jsou látky elektricky nevodivé, tedy takové, které nevedou elektrický proud.

Za ideálních podmínek neobsahuje izolant žádné volné částice s elektrickým nábojem, avšak v praxi dokonalý izolant nenajdeme. Každý izolant je zároveň dielektrikem, tj. látkou schopnou polarizace reagující na účinky elektrického pole. To však neplatí obráceně, dielektrikum nemusí být izolantem.

Izolanty lze rozčlenit podle mnoha hledisek, přičemž za základní lze považovat dělení dle jejich skupenství. Zde jde o izolanty:

- pevné – např. plasty (PVC, PE, teflon), slídu, keramiku, sklo, porcelán, papír, ...
- kapalné – např. minerální oleje, rostlinné oleje, syntetické oleje, ...
- plynné – např. vzduch, dusík, fluorid sírový (SF₆), vzácné plyny, ...

Dále je izolanty možno rozdělit například podle původu na organické a anorganické, nebo podle vzniku na přírodní, zušlechtěné nebo umělé.

Izolanty pevného skupenství se používají tam, kde je potřeba mechanické upevnění vodiče. Jinde je možné použít izolační materiály různého skupenství a často se také izolační materiály kombinují.

Izolace může být samočinně se obnovující, je-li použit izolant plynného skupenství, nebo samočinně se neobnovující, je-li použita pevná látka. Je také možné částečné obnovení izolace (u kapalin). Podle skupenství izolantu, v němž dojde k výboji při rázu, může vzniknout buď rázový průraz, nebo rázový přeskok. Průraz nastává v izolantu pevného skupenství a přeskok v izolantu plynném nebo kapalném. Samočinně se obnovující izolace je taková izolace, která je schopna po přiložení zkušebního napětí a následném přeskoku úplně obnovit své izolační vlastnosti. Samočinně se neobnovující izolace je taková izolace, která po přiložení zkušebního napětí a následném průrazu ztrácí nebo úplně neobnovuje své izolační vlastnosti. Tzn., že izolace testovaného objektu (TO) je částečně nebo zcela zničena.

O elektrické pevnosti izolantu tedy hovoříme tehdy, když elektrické napětí překročí určitou kritickou hodnotu a izolant v elektrickém poli přichází o své izolační vlastnosti. Vzniká tak elektrický průraz, popř. přeskok. Elektrická pevnost izolantu se udává v kV/cm nebo kV/mm.

Dále se izolace dělí na vnější a vnitřní. Vnější izolace je taková, která přichází do kontaktu s okolním prostředím. Je tedy vystavena elektrickému namáhání, atmosférickým účinkům a dalším vnějším podmínkám (vlhkost, znečištění, hmyz, atd.). Vnitřní izolace je před těmito účinky vnějších vlivů chráněna. [1], [2], [3], [6], [11], [13]

1.2 Zdroj zkušebního napětí

Zkoumání vlivu přepětí na izolaci a určení elektrické pevnosti u strojů, přístrojů, kabelů, izolátorů či izolačních materiálů vysokonapětových zařízení je hlavním úkolem zkušeben a laboratoří vysokého napětí. Většina těchto laboratoří je vybavena zdrojem vysokého a velmi vysokého střídavého, stejnosměrného a rázového napětí. Rázové zdroje generují zkušební napětíové impulzy.

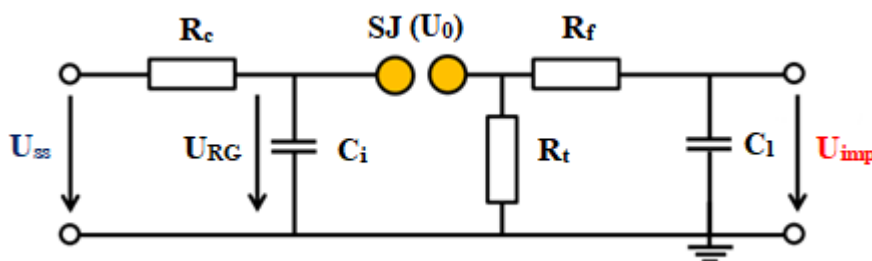
Velmi vysoké střídavé napětí se nejčastěji generuje sériovým (kaskádním) spojením dvou nebo tří transformátorů. Ze střídavého napětí se pomocí polovodičových usměrňovačů získává vysoké stejnosměrné napětí. V rázových generátorech se vytváří rázové napětí. V rámci mé diplomové práce jsem prováděla testy, při kterých byl jako zdroj zkušebního napětí použit vícestupňový rázový generátor (viz kapitola 1.2.2).

Zmíněný zdroj napětí (rázový generátor) vyskytující se v laboratořích či zkušebnách slouží tedy k vytváření zkušebního impulzního napětí a využívá se při zkouškách na elektrických zařízeních napětíovými impulzy různých tvarů. Pomocí tohoto zdroje zkušebního napětí se zkoumají účinky některých přepětíových jevů na zkoušený objekt, např. pomocí spínacího či atmosférického impulzu (viz kapitola 1.3).

Pro vytvoření aperiodického impulzního napětí musí zkušební obvod obsahovat tvarovací rezistory a kapacitní zátěž. K získání oscilačního impulzu je obvod vybaven navíc indukčností, která je zapojena mezi generátorem a kapacitní zátěží. Pomocí tohoto obvodu lze vytvořit až dvojnásobnou vrcholovou hodnotu oscilačního impulzního napětí ve srovnání s aperiodickým impulzním napětím, což je důležité pro testování v terénu, kde jsou využívány mobilní impulzní testovací systémy a kde jde o tzv. zkoušky na místě použití zkoušeného objektu (viz norma ČSN EN 60060-3). [1], [2], [3], [6]

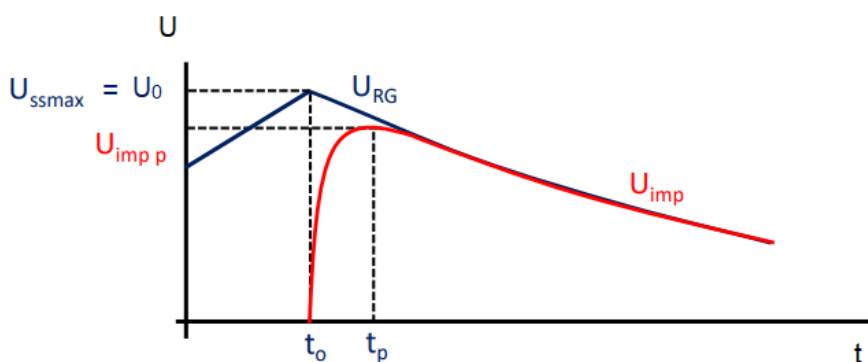
1.2.1 Jednostupňový impulzní generátor

Na Obrázku 1.1 je vidět obvyklé zapojení rázového neboli impulzního jednostupňového generátoru, kterým je možno generovat napěťový impulz.



Obrázek 1.1: Schéma zapojení jednostupňového rázového generátoru napětí. [10]

Impulzní kapacita C_i se nabije ze stejnosměrného zdroje U_{ss} přes nabíjecí odpor R_c na hodnotu napětí U_0 a následně dochází na spínacím jiskřišti (SJ) k přeskoku. Dále přes čelní odpor R_f dochází k nabíjení zatěžovací kapacity C_1 a zároveň se přes týlní odpor R_t vybíjí impulzní kapacita C_i . Čelní odpor R_f modeluje dobu trvání čela impulzu T_1 a týlní odpor R_t ovlivňuje dobu trvání půltýlu T_2 impulzu. V důsledku skládání těchto procesů je generován impulz s amplitudou U_{imp} . Na Obrázku 1.2 je graficky znázorněno generování impulzu.

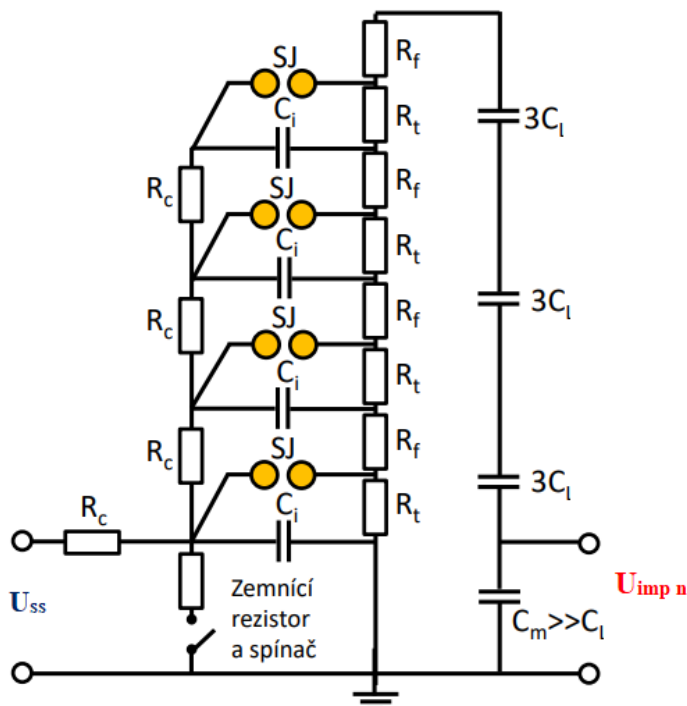


Obrázek 1.2: Generování impulzního napětí. [10]

Použití jednostupňového generátoru je omezeno velikostí napětí nabíjecího zdroje. Tento generátor se používá pouze do velikosti napětí 200 kV, a proto se pro ZVN uplatňuje několikastupňové uspořádání (viz kapitola 1.2.2). [3], [5], [6]

1.2.2 Vícestupňový impulzní generátor

Vícestupňový neboli Marxův generátor byl v roce 1923 představen německým inženýrem Erwinem Marxem. Skládá se z velkého počtu kondenzátorů, rezistorů a jiskřišť uspořádaných do několika stupňů (viz Obrázek 1.3).



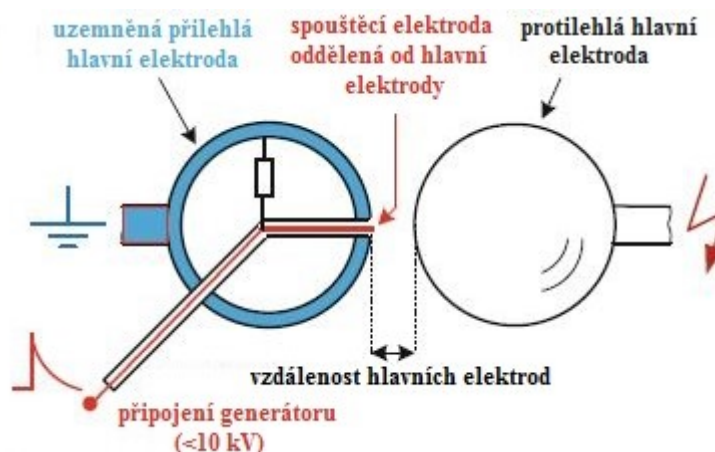
Obrázek 1.3: Schéma zapojení čtyřstupňového rázového generátoru napětí. [10]

Pomocí stejnosměrného zdroje vysokého napětí se nejprve nabíjí řada paralelně zapojených kondenzátorů C_i přes nabíjecí rezistory R_c , které spojují jednotlivé stupně. Mezi stupni jsou umístěna SJ , chovající se při daném napětí, které je zpočátku nižší než průrazné napětí jiskřiště, jako rozpojený obvod. Avšak při překročení velikosti průrazného napětí u nich dojde k přeskoku elektrického výboje a jiskřiště spojí již nabitě kondenzátory C_i do série, čímž dojde k tomu, že se napětí na kondenzátorech sečte a na posledním jiskřišti, které odděluje výstup generátoru od napájení, vzroste napětí na hodnotu rovnou n -násobku napájecího napětí U_{ss} , kde n je počet stupňů Marxova generátoru.

Impulzní kapacity C_i všech stupňů jsou nabíjeny přes nabíjecí odpory R_c spojené do série v jednom sloupci. Pokud jsou nabíjecí odpory správně navrženy, nehraje při nabíjení žádnou roli, že nabíjecí odpor n -tého stupně je n -krát větší než nabíjecí odpor prvního stupně, protože nabíjecí čas je zvolen dostatečně dlouhý pro úplné nabití všech kapacit. V současné době se používá tyristorové řízení nabíjecího procesu s konstantním proudem až do dosažení předem

nastaveného napětí, při kterém je iniciován průraz na spouštěcím jiskřišti. V důsledku toho se kapacity C_i na každém stupni vybíjejí přes týlní odpor R_t a současně je zátěžová kapacita C_l nabíjena ze sériového spojení všech kapacit C_i a čelních odporů R_f .

Trigování (řízené vyvolání průrazu na spouštěcím jiskřišti prvního stupně rázového generátoru (viz Obrázek 1.4), které vede ke spuštění celého zdroje), je zajištěno pomocí tříelektrodového uspořádání na jiskřišti prvního stupně (trigatron).



Obrázek 1.4: Spouštěcí jiskřiště víceetapového generátoru. [5]

Vrcholová hodnota impulzního napětí $U_{imp p}$ je nižší než průrazné napětí spouštěcího jiskřiště U_0 . Poměr mezi těmito dvěma napětími udává tzv. činitel účinnosti nebo také využití jednostupňového impulzního generátoru:

$$\eta = \frac{U_{imp p}}{U_0} < 1; \eta = \eta_s \cdot \eta_c \quad (1.1)$$

Činitel využití impulzního generátoru může být chápán jako součin účinnosti η_s závislé na tvaru impulzu (stoupá s poměrem mezi dobou týlu a čela) a účinnosti η_c závislé na parametrech obvodu (čím je impulzní kapacita C_i větší v porovnání s kapacitou zátěžovací C_l , tím vyšší je účinnost obvodu). Činitel využití pro atmosférické impulzní napětí je obvykle relativně vysoký $\eta \approx 0,85 - 0,95$ a pro spínací impulzní napětí podstatně nižší $\eta \approx 0,70 - 0,80$.

Výstupní impulzní napětí $U_{imp n}$ lze pak určit takto:

$$U_{imp n} = n \cdot \eta \cdot U_0 \quad (1.2)$$

Různé druhy napěťových impulzů, které se generují pomocí výše zmíněného generátoru, podrobně popisují v kapitole 1.3. [5], [3], [6]

1.2.3 Vzájemná vazba mezi zdrojem impulzního napětí a testovaným objektem

Většina objektů testovaných atmosférickým impulzním napětím, jako jsou izolátory, průchodky, GIS (plynem izolované systémy), výkonové transformátory nebo vzorky kabelů, představují pro testovací systém kapacitní zátěž. V několika případech, např. pro nízkonapěťové vinutí výkonových transformátorů, se při zkoušce uplatní vliv indukčnosti zkoušeného objektu. Odporové zkoušené objekty nemají žádný vliv, protože venkovní izolátory nejsou testovány ve vlhkých nebo znečištěných stavech atmosférickým napětím. Vliv TO je možno vysvětlit na ekvivalentním jednostupňovém obvodu (viz Obrázek 1.1).

V případě testování kapacitních objektů lze zatěžovací kapacitu C_l , která se obvykle skládá ze základní zatěžovací kapacity C_b generátoru a kapacity zkoušeného objektu C_{to} , vypočítat podle vztahu:

$$C_l = C_b + C_{to} \quad (1.3)$$

Tato zatěžovací kapacita ovlivňuje časovou konstantu doby trvání čela vlny τ_f , časovou konstantu doby trvání pultýlu vlny τ_t a účinnost obvodu rázového generátoru η_c :

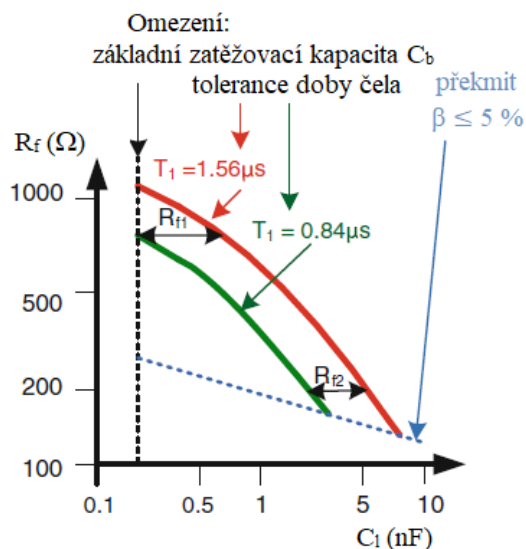
$$\tau_f = R_f \cdot \left(\frac{C_i \cdot (C_b + C_{to})}{C_b + C_{to} + C_i} \right) \quad (1.4)$$

$$\tau_t \approx R_t \cdot (C_i + C_b + C_{to}) \quad (1.5)$$

$$\eta_c \approx \frac{C_i}{C_i + C_b + C_{to}} \quad (1.6)$$

Doba čela T_l , která je charakterizovaná konstantou τ_f závisí především na kapacitě TO, neboť obvykle platí, že $C_i \gg C_b + C_{to}$, přičemž $C_{to} > C_b$, a proto $\tau_f \approx R_f \cdot (C_b + C_{to})$.

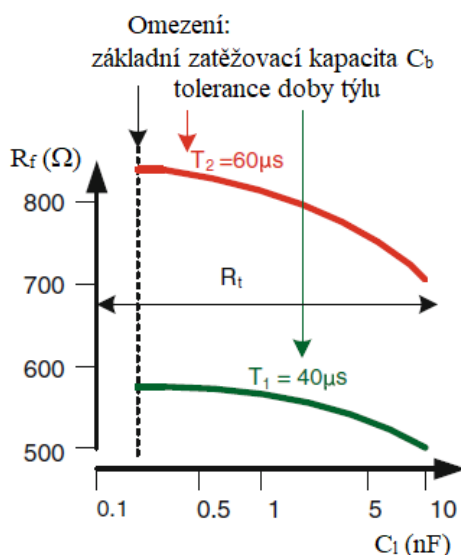
Vzhledem k tomu, že rozsah tolerance doby čela (0,84 – 1,56 μ s) je menší než dvojnásobek její spodní hranice, je třeba odpovídajícím způsobem přizpůsobit čelní odpory R_f generátoru. Doba čela vlny je téměř dvojnásobná v případě, kdy je zatěžovací kapacita TO zdvojnásobena. Pro fixní hodnotu konstanty τ_f , respektive doby čela T_l , lze vypočítat potřebnou hodnotu R_f pro horní nebo spodní mez tolerance doby čela. Vodorovná černá oboustranná šipka (viz Obrázek 1.5) udává rozsah zátěže, pro který lze použít jeden odpor R_{f1} pro generování standardních napětí zkušebních impulzů. Pro vyšší zatěžovací kapacitu je třeba použít nižší odpor R_{f2} , atp. Pokud je čelní odpor nastaven příliš nízko, je generováno nežádoucí přepětí, které omezuje tvorbu standardních impulzů.



Obrázek 1.5: Nastavení čelního odporu. [5]

Aby bylo možno nastavit potřebnou proměnnou velikost čelního odporu pro široký rozsah kapacitní zátěže, je každý generátor vybaven několika sadami rezistorů. Obvykle jsou tyto sady navrženy tak, aby mohly být rezistory zapojeny v sériovo-paralelních kombinacích.

Doba půltýlu T_2 není příliš ovlivněna kapacitou zkoušeného objektu, ale především impulzní kapacitou generátoru C_i . Jeden týlní odpor R_t proto postačuje k pokrytí celého tolerančního časového pásma půltýlu 40 – 60 μs (viz Obrázek 1.6).



Obrázek 1.6: Nastavení týlního odporu. [5]

Generátor dosahuje účinnost 95 % při $C_i \gg C_{to}$. Tato účinnost klesá se stoupající kapacitou TO a pro hodnoty $C_{to} > 0,2 C_i$ se již tento způsob testování nedoporučuje. [5]

1.3 Impulzní napětí a jeho parametry

Jak bylo uvedeno v kapitole 1.2, schopnost zařízení odolávat přepětím se ověřuje testováním ve zkušebnách a laboratořích VN. Všechny druhy dále zmíněných impulzů se mohou používat pro zkoušky vysokým napětím. Zkoušky je důležité provádět hlavně proto, aby byla ověřena správná konstrukce elektrických zařízení. A dále je také možné při nich zjišťovat potenciální závady na izolaci zařízení, což je předmětem mé diplomové práce.

Impulzy napětí, které se pro tyto zkoušky vysokým napětím používají, se generují v impulzních zdrojích tak, aby co nejvěrněji simulovaly podmínky při vzniku přepětí v reálné situaci. Přitom je nutno brát na zřetel, že se v praxi vyskytují stále nové a nové tvary VN signálů.

Impulz má povahu jednosměrné vlny, která rychle nebo plynule narůstá do vrcholové hodnoty a potom pomaleji klesá k nule. Existují dva druhy elektrických impulzních napětí, které způsobují poruchy v ES a nemají periodický průběh. Jejich amplituda může dosáhnout několikrát vyšší hodnoty, než má střídavé napětí při normálním bezporuchovém provozu. Jde o atmosférické napětí (viz kapitola 1.3.1), které může být způsobeno úderem blesku do elektrického zařízení, a o spínací přepětí (viz kapitola 1.3.2) vznikající při spínajících procesech v ES.

Impulzy atmosférické a spínací se od sebe liší dobou čela impulsu T_1 (viz Obrázky 1.7 a 1.14). Atmosférický impulz vzrůstá rychle do nejvyšší hodnoty a pak pomalu klesá k nule. Podle normy ČSN EN 60060-3 [2] je definován nárůstem doby čela do 20 μs . Dle stejné normy je jako spínací impulz definován impulz s delšími čely než 20 μs a na rozdíl od atmosférického impulzu napětí spínacího impulzu vzrůstá plynule na nejvyšší hodnotu a v týlu vlny klesá k nule. Také jeho celkové trvání je mnohem delší.

Jak již bylo zmíněno v kapitole 1.1, při poruše izolace dochází buď k průrazu, je-li izolant pevného skupenství, nebo k přeskoku v izolantu plynném nebo kapalném. Tento průraz nebo přeskok může nastat:

- ve stoupající části vlny (většinou mezi 2 až 5 μs), pak jde o vlnu useknutou v čele (viz Obrázek 1.8),
- ve vrcholu vlny nebo v části klesající, zde jde o vlnu useknutou v týle (viz Obrázek 1.9).

Podle normy ČSN EN 60060-1 [1] jsou požadovány pro různé zkoušky vysokým napětím různé tvary impulzů, které popisují v této kapitole. [1], [2], [6]

1.3.1 Atmosférické impulzní napětí (LI)

Bylo zjištěno, že atmosférické výboje vedou ke vzniku přepětí. Klasickým příkladem vzniku atmosférického přepětí je úder blesku. Průměrná doba trvání blesku jsou 2 μ s a jeho maximální hodnota proudu překračuje 10 kA. Za rok v České republice nastane přibližně 30 úderů blesku na 100 km délky vedení.

Atmosférická přepětí na venkovních vedeních vznikají při bouřkách:

- nepřímými údery blesku (indukovaná přepětí),
- přímými údery blesku do fázových vodičů,
- přímými údery blesku do zemnicích lan,
- přímými údery blesku do stožárů.

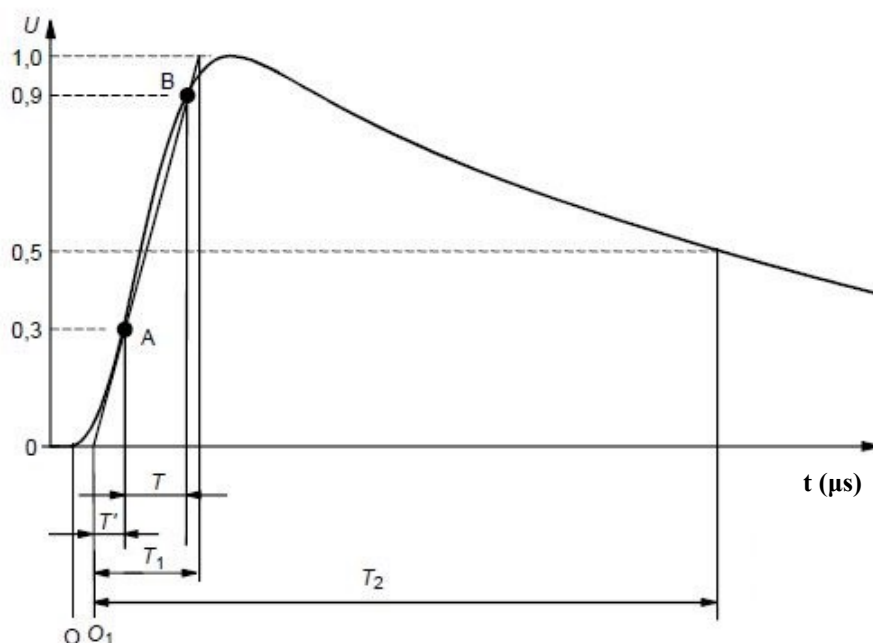
Na Obrázku 1.7 je znázorněno plné atmosférické impulzní napětí, tj. napětí, které není přerušeno průrazným výbojem. Pro účely zkušebnictví se u každé napěťové vlny definují parametry, které tyto křivky impulzního napětí popisují. Jsou to:

- O_I – zdánlivý počátek,
- T_I – doba čela vlny,
- T_2 – doba půltýlu vlny,
- T_v – doba do vrcholu,
- T_d – doba trvání vrcholu.

Zdánlivý počátek O_I je možno získat proložením bodů A a B přímkou protaženou na časovou osu. Doba čela vlny T_I je definována jako 1,67násobek intervalu T , což je doba vzrůstu napětí mezi body A a B , tedy mezi 30 % a 90 % vrcholové hodnoty napětí. Doba čela vlny byla zavedena z důvodu snazšího měření.

Doba půltýlu T_2 je časový interval mezi zdánlivým počátkem O_I a okamžikem v týlu, kdy hodnota napětí klesla na polovinu vrcholové hodnoty. Časový interval mezi počátkem O a vrcholem vlny se nazývá dobou do vrcholu T_v a doba trvání vrcholu napětí T_d je časový interval, ve kterém je napětí vyšší než 90 % vrcholové hodnoty (viz Obrázek 1.14).

Dále je každá vlna charakterizována svojí polaritou, vrcholovou hodnotou, tvarem a dobou trvání (desítky μs). [1], [3], [6], [8], [9]



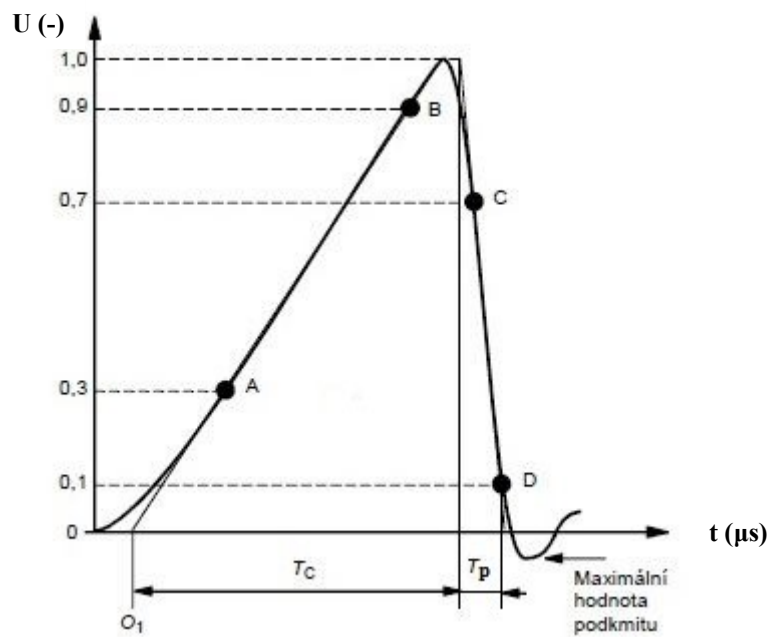
Obrázek 1.7: Plný atmosférický impulz. [1]

Normalizovaný plný atmosférický impulz je s určitými tolerancemi definován jako poměr $T_1/T_2 = 1,2/50 \mu\text{s}$. U atmosférického impulzního napětí jsou akceptovány následující dovolené odchylky od standardního tvaru $1,2/50 \mu\text{s}$:

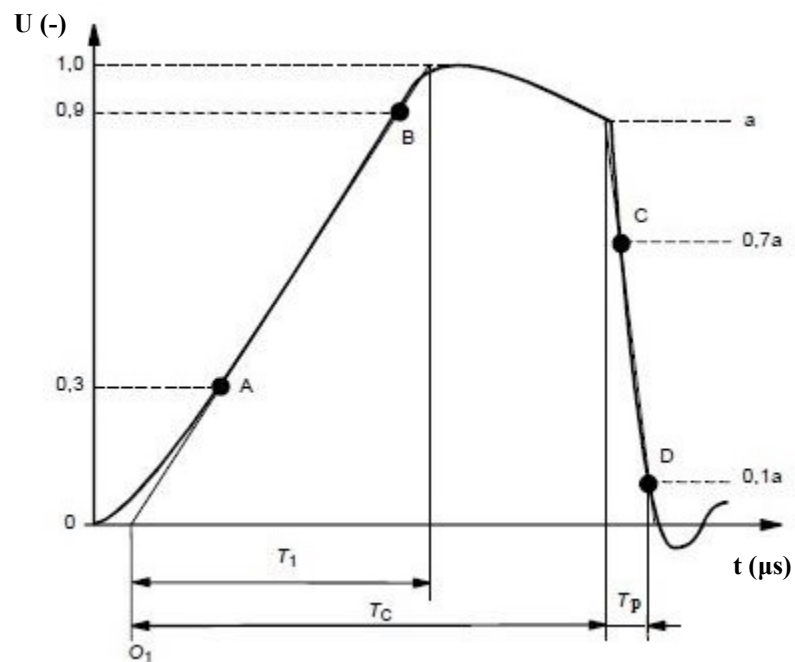
- pro vrcholovou hodnotu $\pm 3 \%$,
- pro dobu čela vlny T_1 $\pm 30 \%$,
- pro dobu půltýlu vlny T_2 $\pm 20 \%$.

V praxi však nastávají situace, kdy dochází k useknutí vlny přeskokem či průrazem na vnější nebo vnitřní izolaci zkoušeného objektu nebo na ochranném prvku. Useknutý atmosférický impulz je vidět na Obrázcích 1.8 a 1.9. Tyto dva obrázky se znázorněným atmosférickým impulzním napětím se od sebe liší časem, kdy k useknutí vlny došlo. Useknutý atmosférický impulz je charakteristický tím, že při něm průrazný či přeskokový výboj způsobí rychlé zhroucení napětí téměř na nulovou hodnotu, ať už se jedná o impulz s oscilacemi (viz Obrázky 1.12 a 1.13), nebo bez nich. Jak již bylo řečeno, tento pokles se může vyskytnout v čele, ve vrcholu nebo v týlu impulzu. Pro účely zkoušek se jedná o impulz useknutý pomocí

vnějšího usekávacího jiskřiště v předepsaném časovém rozmezí sloužící k ověření odolnosti zařízení proti působení impulzů s vyšším frekvenčním obsahem. [1], [6], [8], [9]



Obrázek 1.8: Atmosférické impulzní napětí useknuté v čele. [1]



Obrázek 1.9: Atmosférické impulzní napětí useknuté v týle. [1]

I tyto dva výše uvedené impulzy (viz Obrázky 1.8 a 1.9) lze z části popsat časovými parametry již zmíněnými u plného atmosférického napětí, je u nich však zapotřebí znát ještě parametry další, kterými jsou:

- T_p – doba poklesu napětí,
- T_c – doba do useknutí (doba trvání vlny),
- okamžik useknutí.

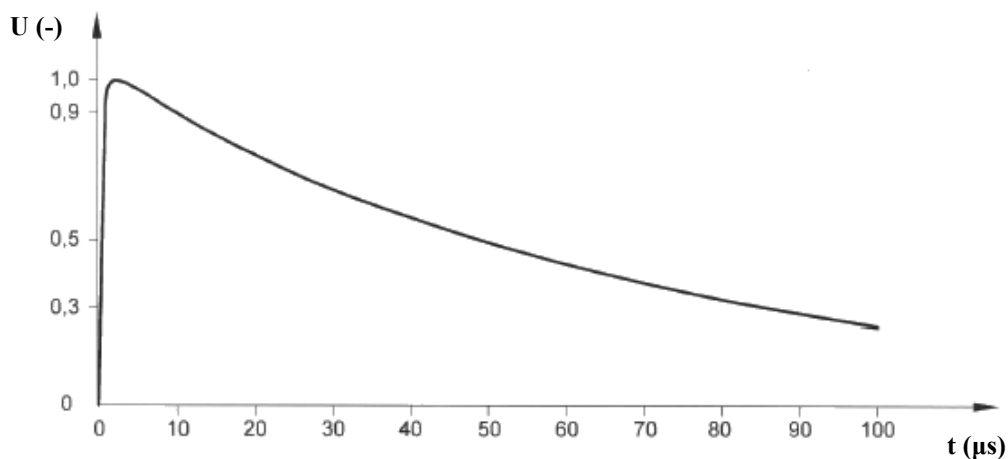
Doba poklesu T_p je definována jako 1,67násobek časového intervalu mezi body C a D tedy mezi 70 % a 10 % hodnoty napětí a , při které došlo k jeho zhroucení. Dobou do useknutí T_c , neboli dobou trvání vlny, je myšlen časový interval mezi zdánlivým počátkem O_1 a okamžikem, kdy u vlny dojde k useknutí. Okamžik useknutí nastává ve vzdálenosti $0,3T_p$ před bodem C . [1], [2], [6], [8], [9]

Kromě normy ČSN EN 60060-1 [1] existuje také norma ČSN EN 60060-3 [2], která definuje požadavky na zkoušky vysokým napětím na místě použití zkoušeného objektu, tedy co nejbližše jeho provozním podmínkám. Podle této normy se používají k testování dva typy atmosférických impulzních napětí, kterými jsou aperiodické a oscilační impulzní napětí. Testy na místě instalace mají specifické podmínky a norma definuje zkušební napětí vhodná pro omezení plynoucí z těchto testů. [2]

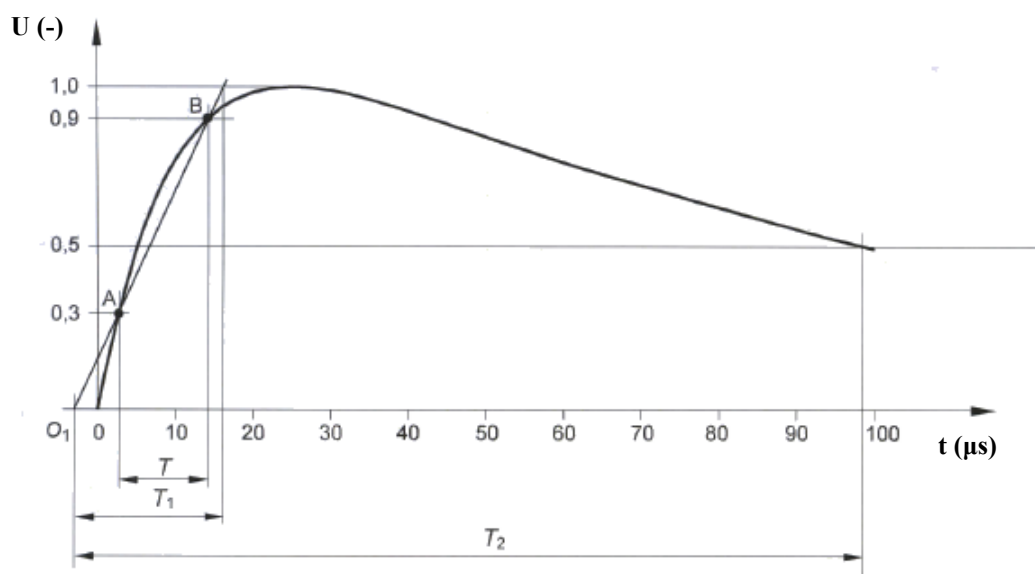
Aperiodické atmosférické impulzní napětí (ALI)

Na Obrázcích 1.10 a 1.11 níže je patrný průběh aperiodického atmosférického impulzního napětí. Je to takové impulzní napětí, které rychle narůstá do maximální hodnoty a následně pomaleji, bez oscilací, klesá k nule. Příkladem aperiodického impulzního napětí, o kterém jsem se již zmínila v úvodu této kapitoly 1.3.1, je právě normalizované atmosférické impulzní napětí označované jako 1,2/50 μs , kde 1,2 μs je doba trvání čela impulzu T_1 a 50 μs je doba trvání půltýlu impulzu T_2 .

Obdobně jako již dříve zmíněné impulzy i tyto jsou popsány stejnými časovými parametry O , T , T_1 , T_2 . Na Obrázku 1.10 je znázorněn příklad aperiodického atmosférického impulzu 0,8/50 μs , tj. s dobou čela $T_1 = 0,8 \mu\text{s}$ a dobou půltýlu $T_2 = 50 \mu\text{s}$.

Obrázek 1.10: Aperiodický atmosférický impulz 0,8/50 μs . [2]

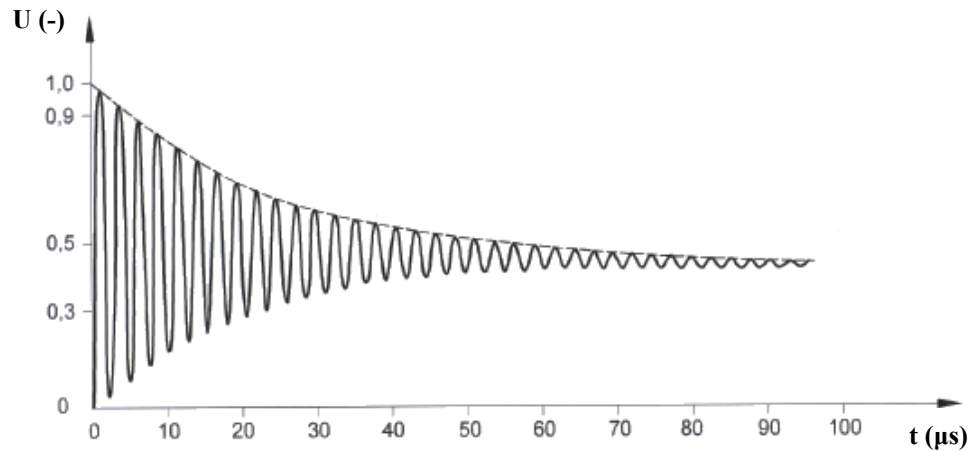
Na Obrázku 1.11 je také vidět průběh aperiodického atmosférického impulzu, tentokrát ale s dobou čela $T_1 = 20 \mu\text{s}$ a dobou půltýlu $T_2 = 100 \mu\text{s}$. [1], [2]

Obrázek 1.11: Aperiodický atmosférický impulz 20/100 μs . [2]

Oscilační atmosférické impulzní napětí (OLI)

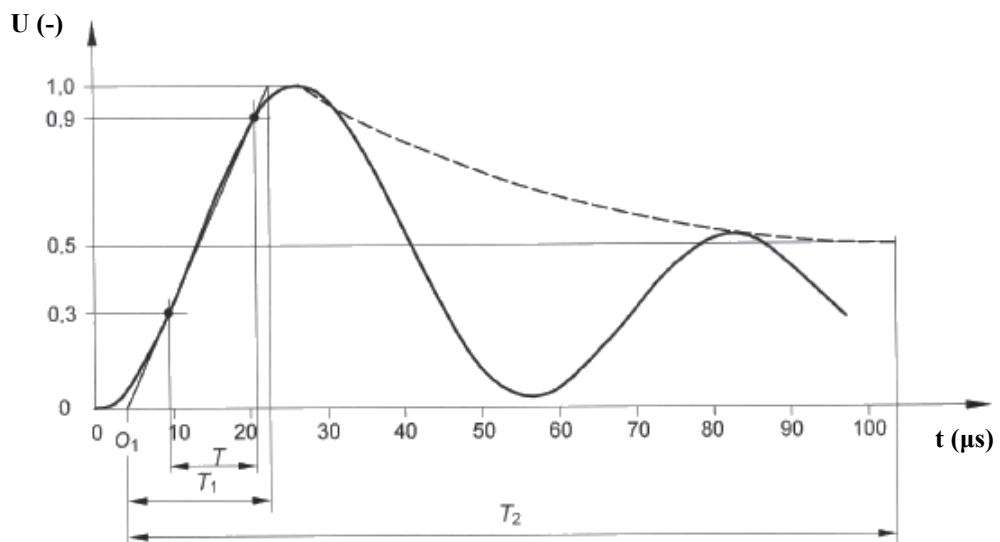
Průběh tohoto atmosférického impulzního napětí, který je znázorněn na Obrázcích 1.12 a 1.13, má oscilující charakter. Napětí zde opět rychle roste do maximální hodnoty a poté klesá tlumenými oscilacemi k nule. Tento impulz je charakterizován obalovou křivkou a kmitočtem oscilací s kladnou nebo zápornou polaritou. Kmitočet je v rozmezí od 15 kHz do 400 kHz.

Tyto impulzy jsou rovněž popsány časovými parametry O_1 , T , T_1 , T_2 . Na Obrázku 1.12 je znázorněn příklad oscilačního atmosférického impulzu 0,8/50 μs , tj. s dobou čela $T_1 = 0,8 \mu\text{s}$, dobou půltýlu $T_2 = 50 \mu\text{s}$ a s frekvencí 370 kHz. [5]



Obrázek 1.12: Oscilační atmosférický impulz 0,8/50 μs , 370 kHz. [2]

Na Obrázku 1.13 je vidět další příklad oscilačního atmosférického impulzu, tentokrát ale s dobou čela $T_1 = 20 \mu\text{s}$, dobou půltýlu $T_2 = 100 \mu\text{s}$ a frekvencí 16 kHz. [2]



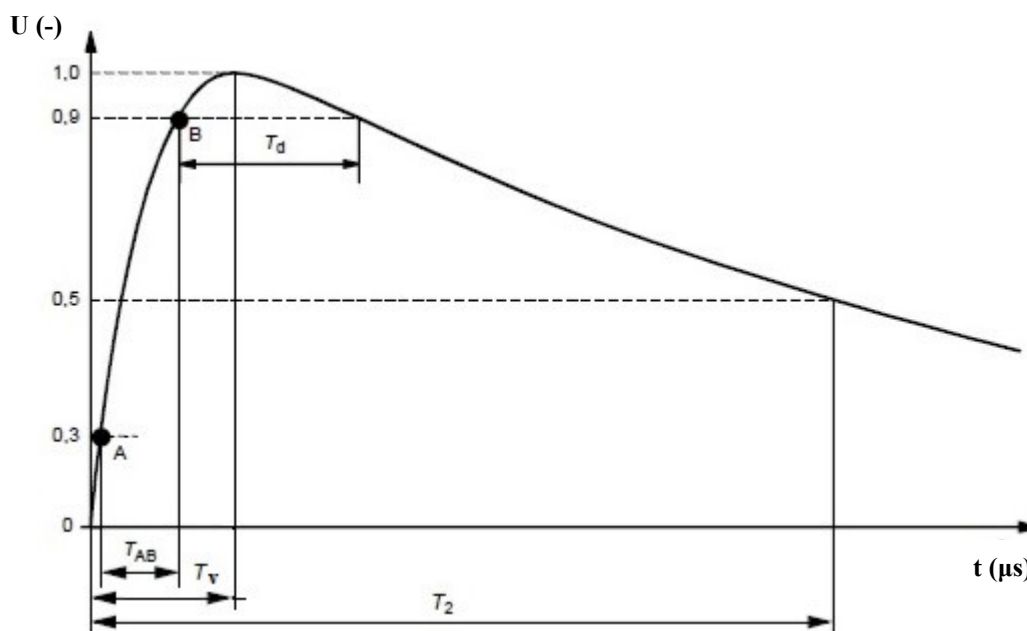
Obrázek 1.13: Oscilační atmosférický impulz 20/100 μs , 16 kHz. [2]

1.3.2 Spínací impulzní napětí (SI)

Na Obrázku 1.14 je zobrazen tvar spínacího impulzního napětí. A dále jsou na tomto obrázku vyznačené časové parametry, které vlnu charakterizují. Jsou to:

- O – skutečný počátek,
- T_2 – doba půltýlu vlny,
- T_v – doba do vrcholu,
- T_d – doba trvání vrcholu (doba nad 90 % hodnoty maximálního napětí).

Skutečný počátek O je okamžik, ve kterém se zaznamenaná křivka spínacího impulzního napětí začne monotónně zvyšovat či snižovat. Doba půltýlu T_2 znázorňuje časový interval mezi skutečným počátkem O a bodem na křivce, ve kterém hodnota napětí klesla na polovinu vrcholové hodnoty. Dobou do vrcholu T_v je v obrázku znázorněn časový interval mezi skutečným počátkem O a vrcholovou hodnotou impulsu a je definován jako 2,4násobek intervalu $T = T_{AB}$, který je mezi body A a B , tedy mezi 30 % a 90 % vrcholové hodnoty napětí. Doba trvání vrcholu T_d udává časový interval, kdy spínací impulzní napětí přesahuje hodnotu 90 % jeho maximální hodnoty.



Obrázek 1.14: Spínací impulzní napětí. [1]

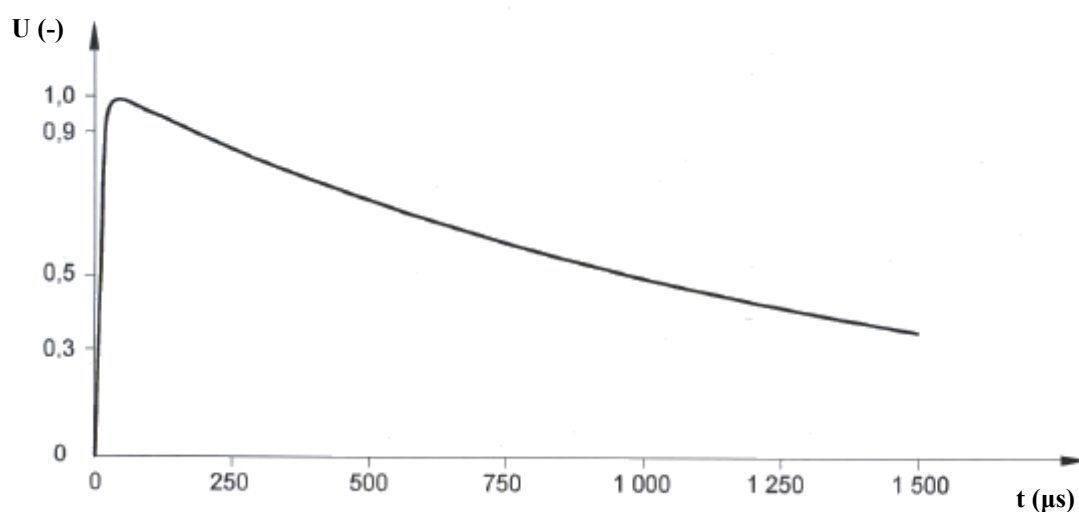
Normalizovaný spínací impulz je definován poměrem $T_v/T_2 = 250/2\ 500$. Ze zkušebních důvodů se opět akceptují dovolené odchylky od skutečně zaznamenaných hodnot, a to takto:

- pro vrcholovou hodnotu $\pm 3\ %$,
- pro dobu do vrcholu vlny T_v $\pm 20\ %$,
- pro dobu půltýlu vlny T_2 $\pm 60\ %$.

I spínací impulzní napětí může být dále rozděleno na aperiodické a oscilační spínací impulzní napětí. [1], [2], [9]

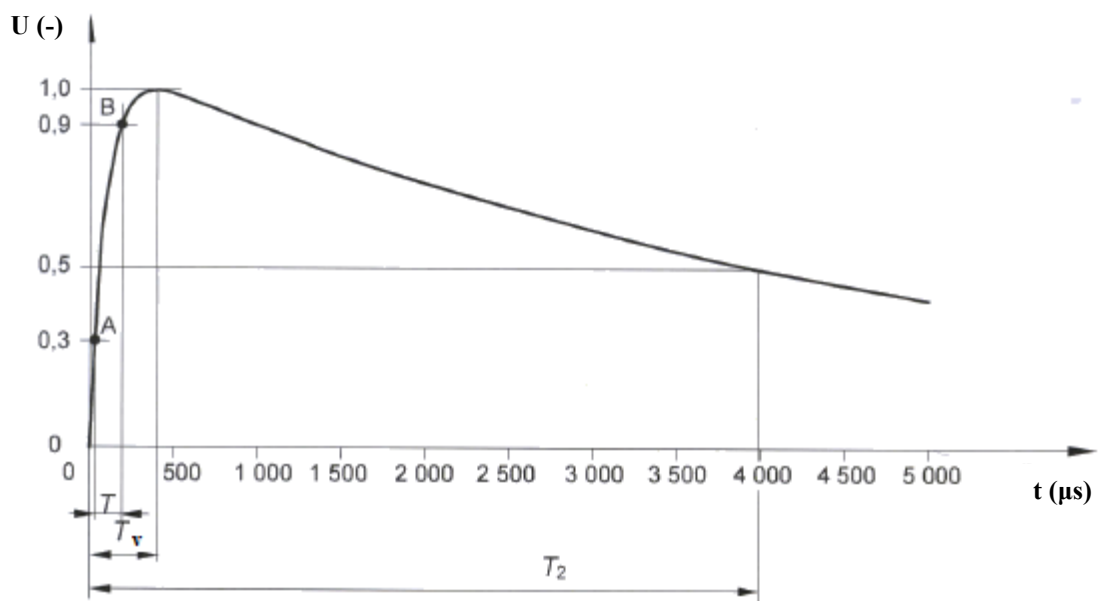
Aperiodické spínací impulzní napětí (ASI)

Na Obrázcích 1.15 a 1.16 jsou vidět příklady aperiodických spínacích impulzů. Obrázek 1.15 ukazuje aperiodický spínací impulz s dobou do vrcholu $T_v = 20\ \mu\text{s}$ a dobou půltýlu $T_2 = 1\ 000\ \mu\text{s}$. [2]



Obrázek 1.15: Aperiodický spínací impulz 20/1 000 μs . [2]

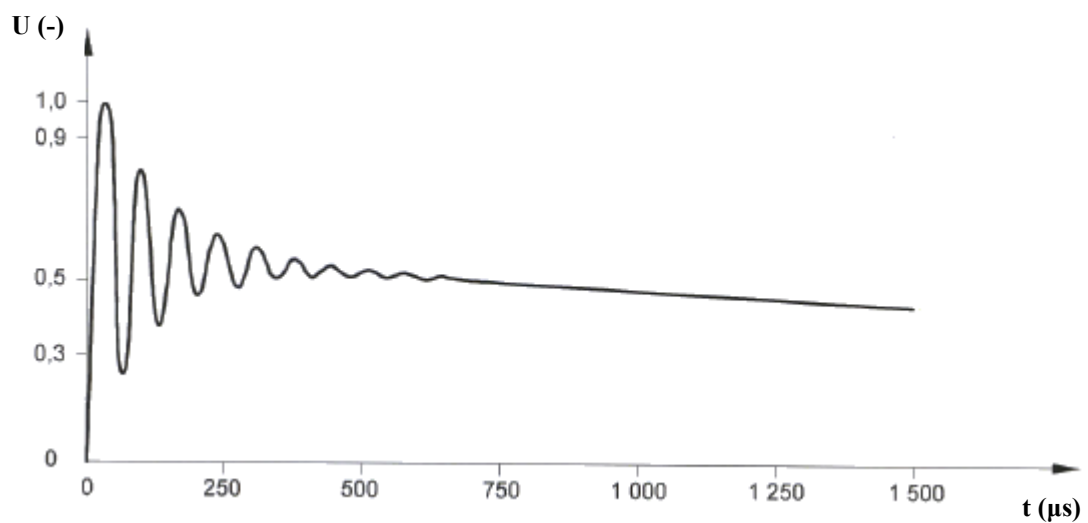
Na Obrázku 1.16 je zobrazen rovněž aperiodický spínací impulz, tentokrát ale s dobou do vrcholu $T_v = 400 \mu\text{s}$ a dobou půltýlu $T_2 = 4\,000 \mu\text{s}$. [2]



Obrázek 1.16: Aperiodický spínací impulz 400/4 000 μs . [2]

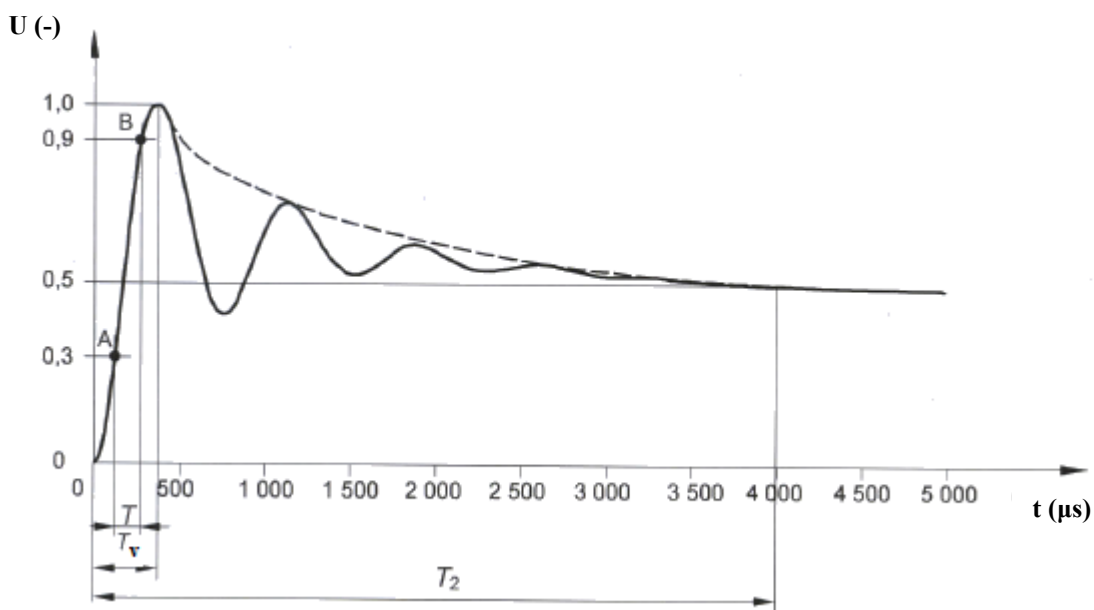
Oscilační spínací impulzní napětí (OSI)

Na Obrázku 1.17 je znázorněn příklad oscilačního spínacího impulzu s dobou do vrcholu $T_v = 20 \mu\text{s}$, dobou půltýlu $T_2 = 1\,000 \mu\text{s}$ a frekvencí 15 kHz. [2]



Obrázek 1.17: Oscilační spínací impulz 20/1 000 μs , 15 kHz. [2]

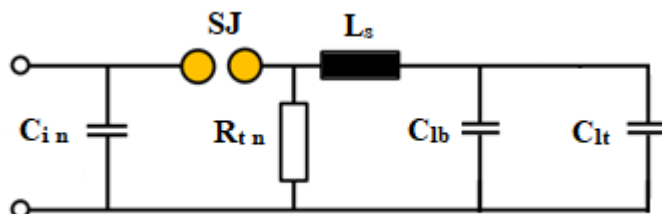
A na Obrázku 1.18 je vidět další příklad oscilačního spínacího impulsu, tentokrát ale s dobou do vrcholu $T_v = 400 \mu\text{s}$, dobou půltýlu $T_2 = 4\,000 \mu\text{s}$ a frekvencí 1 kHz. [2]



Obrázek 1.18: Oscilační spínací impuls 400/4 000 μs , 1 kHz. [2]

1.3.3 Parametry ovlivňující tvar testovacího impulsu

Při testování prováděném v rámci zkoušek ve vysokonapěťové laboratoři využitím aperiodického atmosférického impulzního napětí jsou indukčnosti v obvodu rušivými prvky, které generují nežádoucí přeměny. Pro zkoušky na místě instalace podle ČSN EN 60060-3 [2] ale indukčnost L_s cívky zapojené do obvodu vytváří společně s kapacitou zátěže C_l oscilační obvod. Na Obrázku 1.19 je ukázán ekvivalentní obvod charakterizující generování oscilačního impulzního napětí.



Obrázek 1.19: Ekvivalentní obvod generování oscilačního impulzního napětí. [5]

Tento obvod je aktivován vybitím impulzních kondenzátorů generátoru C_{in} . Výstupním napětím jsou pak tlumené oscilace kolem vybíjecí křivky impulzních kapacit generátoru. Frekvenci kmitání lze vypočítat takto:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_s \cdot \frac{C_l \cdot C_{in}}{C_l + C_{in}}}} \quad (1.7)$$

Pro generátor s n stupni je třeba použít impulzní kapacitu a příp. i týlní odpor o hodnotách:

$$C_{in} = \frac{C_i}{n} \quad \text{a} \quad R_{in} = n \cdot R_t \quad (1.8)$$

Celková kapacita zátěže C_l je dána součtem základní zatěžovací kapacity C_{lb} generátoru a zatěžovací kapacity testovaného objektu C_{lt} :

$$C_l = C_{lb} + C_{lt} \quad (1.9)$$

Napevno připojená indukčnost L_s nahrazuje čelní (tlumící) odpory R_f .

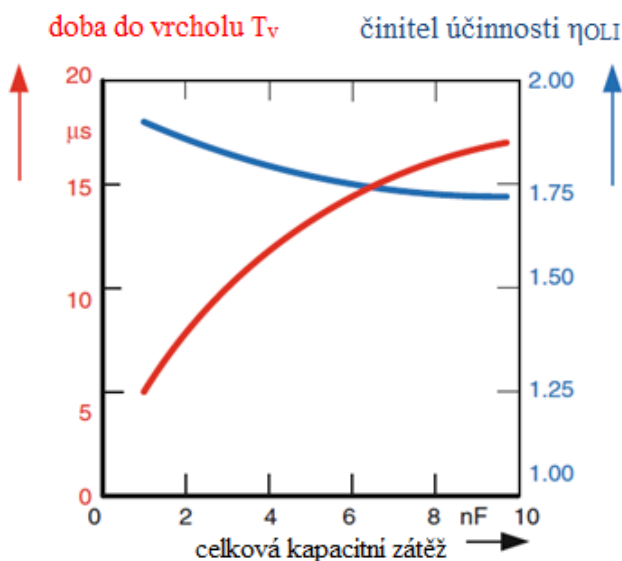
Podle normy ČSN EN 60060-3 [2] jsou impulzní napětí s oscilacemi $f_0 > 15$ kHz považovány za oscilační atmosférické impulzní napětí (viz Obrázky 1.12 a 1.13) a impulzní napětí s oscilacemi $f_0 < 15$ kHz za oscilační spínací impulzní napětí (viz Obrázky 1.17 a 1.18). Tlumení je určeno ztrátami v obvodu zejména na týlních rezistorech R_t pro čistě kapacitní objekty zkoušené aperiodickým impulzem. Vzhledem k tomu, že tyto ztráty jsou vyšší pro oscilační spínací impulzní napětí než pro oscilační atmosférické impulzní napětí, OSI napětí vykazuje nejen nižší frekvenci, ale také větší tlumení.

Teoreticky může oscilační impulzní napětí (OLI nebo OSI) dosáhnout vrcholové hodnoty, která je dvojnásobkem maximální hodnoty příslušného aperiodického impulzního napětí (ALI nebo ASI). V praxi dosahuje přibližně 90 % této hodnoty. Činitele účinnosti η_{OLI} a η_{OSI} jsou:

$$\eta_{OLI} = \frac{U_{OLI}}{U_{0\Sigma}} \approx 1,7 - 1,8 \quad \text{a} \quad \eta_{OSI} = \frac{U_{OSI}}{U_{0\Sigma}} \approx 1,3 - 1,4, \quad (1.10)$$

kde $U_{0\Sigma}$ je kumulativní nabíjecí napětí.

Obrázek 1.20 ukazuje závislost činitele účinnosti (modrá charakteristika) a doby do vrcholu (červená křivka) na kapacitní zátěži zkoušeného objektu.



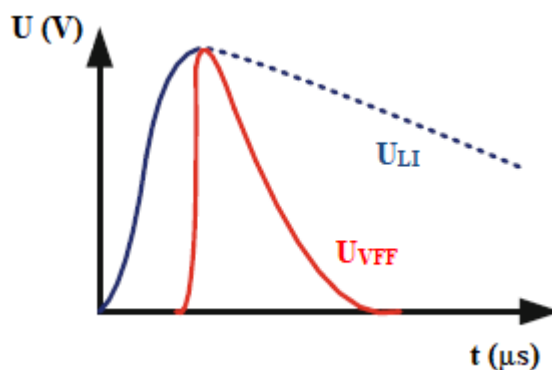
Obrázek 1.20: OLI charakteristika impulzního testovacího systému. [5]

Fakt, že tyto činitele účinnosti jsou ve srovnání s činiteli určenými pro aperiodická impulzní napětí vysoké, je obzvláště důležitý v případě zkoušek v terénu, kdy jsou využívány mobilní impulzní testovací systémy. Proto se používají oscilační atmosférická i spínací impulzní napětí pro testování na místě použití zkoušeného objektu.

Generování napětí OLI vyžaduje nízkou indukčnost, kterou lze snadno vytvořit. Oproti tomu generování OSI vyžaduje mnohem vyšší indukčnost. Cívka používaná pro napětí OSI je tedy mnohem delší, silnější a těžší než cívka, která se používá pro napětí OLI. Dále bylo zjištěno, že přínos testování pomocí OSI je malý; proto je v praxi aplikováno hlavně testování pomocí OLI.

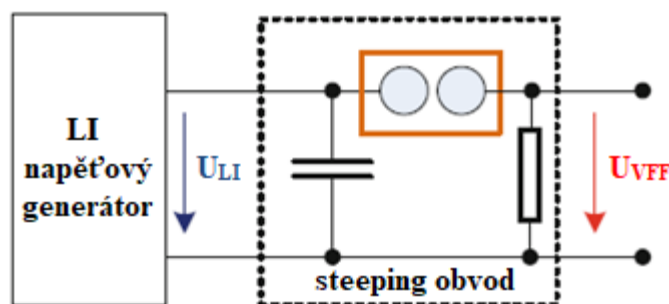
1.3.4 Impulzní napětí s velmi strmým čelem (VFF)

Speciálním tvarem impulzu pro vysokonapěťové zkoušky je impulzní napětí s velmi strmým čelem, jehož průběh první vlny je vidět na Obrázku 1.21, kde je také patrný rozdíl mezi tímto napětím a atmosférickým impulzním napětím.



Obrázek 1.21: Impulzní napětí s velmi strmým čelem. [5]

Very fast front over-voltages (VFF) jsou generována spínáním GIS odpojovačů a následnými odrazy na GIS přípojnicích, průrazy izolace venkovních vedení strmým LI napětím nebo při otevření bleskojistek. Podobná napětí jsou předpokládána v případě jaderného výbuchu (EXO-EMP – výbuch jaderné nálože za hranicí zemské atmosféry). Tato přepětí mohou být charakterizována například oscilujícím impulzem s prvním čelem několik desítek až stovek ns a superponovaným podílem vyšších frekvencí (viz Obrázek 1.22).

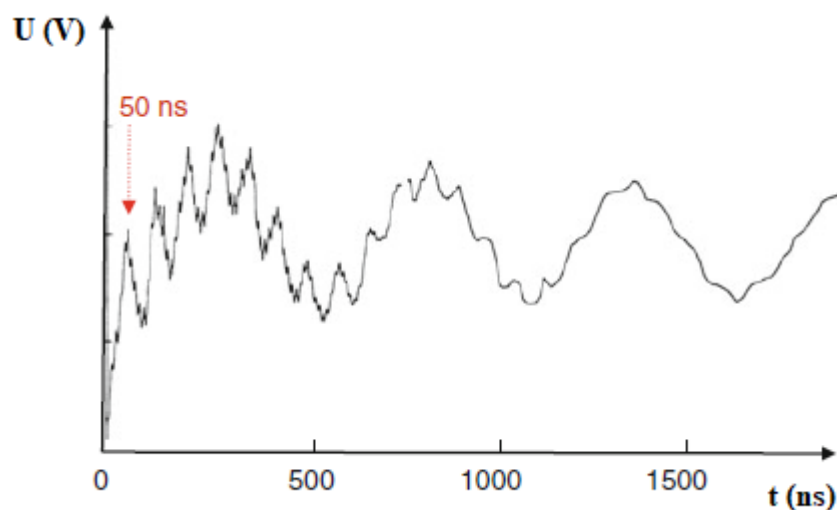


Obrázek 1.22: Generování impulzního napětí s velmi strmým čelem. [5]

I tento zkušební impulz je nejčastěji generován pomocí Marxova impulzního generátoru, který je ovšem připojený k tzv. steeping obvodu. Tento obvod zajišťující generování extrémně strmého čela impulzu se skládá z kondenzátoru a rychlého jiskřiště izolovaného stlačeným plynem s vysokou průraznou pevností. Toto jiskřiště je zapojeno v sérii se zkoušeným objektem a umožňuje dosáhnout čas čela impulzu v řádu několika desítek ns. Impulzní napěťový generátor bez steeping obvodu pracující bez čelních odporů může generovat impulzní napětí s časy čela až 100 ns.

Nejčastějším testovaným objektem, kde se využívá tento impulz, je GIS. Což může být plynem (SF_6) izolovaná rozvodna s malými rozměry, která je velmi spolehlivá. Zkušenosti z praxe vykazují nízkou poruchovost v řádu jedné poruchy na 100 provozních let. Důvodem je právě brzké zavedení vysokonapěťových zkoušek na místě.

Obrázek 1.23 ukazuje typický příklad impulzního napětí s velmi strmým čelem. [5]



Obrázek 1.23: Průběh impulzního napětí s velmi strmým čelem. [5]

2 Teorie zkoušek impulzním napětím

2.1 Druhy zkušebních postupů

Existuje několik druhů zkušebních postupů (viz níže kapitoly 2.1.1 a 2.1.2) a je vždy důležité vybrat pro testování izolace ten správný. Jeho volba závisí na druhu izolace zkoušeného objektu, která může být (viz kapitola 1.1) samočinně se obnovující (plynná) nebo samočinně se neobnovující (pevné látky, kombinovaná izolace). [3]

2.1.1 Zkoušky průrazným výbojem

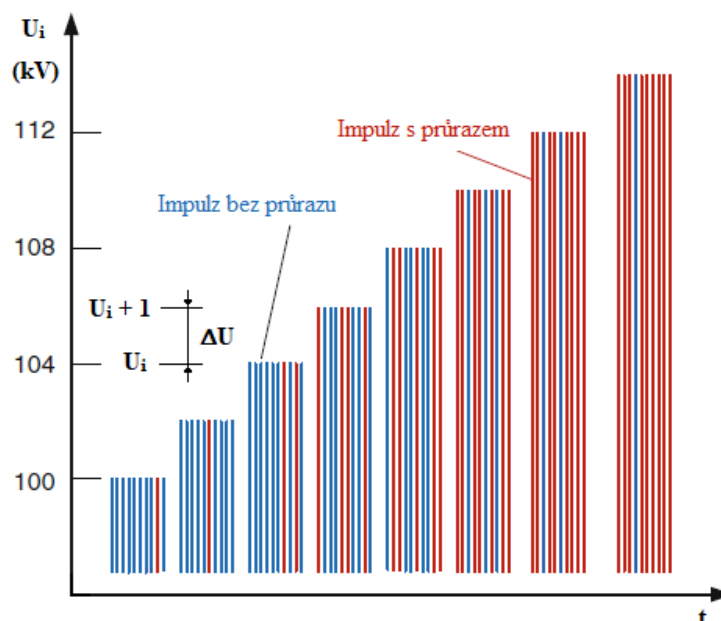
Pokud je možné realizovat na testovaném objektu přeskok, lze postupy těchto zkoušek rozdělit pro účely statistického vyhodnocování dle normy ČSN EN 60060-1 [1] do 3 tříd.

Zkoušky více hladinami (Třída 1)

Tento zkušební postup se nejčastěji využívá pro impulzní napětí, je však možné ho použít i pro zkoušky střídavým a stejnosměrným napětím s předepsanou dobou namáhání.

Postup zkoušky třídy 1 začíná přiložením n napět'ových impulzů na zkoušený objekt, kde dojde ke $k \leq n$ průrazným výbojům na každé napět'ové hladině U_i ($i = 1, 2, \dots, m$). Po přiložení všech n impulzů na testovaný objekt na jedné napět'ové hladině U_i se zvýší přikládané napětí na U_{i+1} o krok ΔU , tj. $U_{i+1} = U_i + \Delta U$, a opět se provede zkouška přiložením n impulzů. Tento postup se opakuje na všech hladinách.

Počet napět'ových hladin je označen jako m a dle normy ČSN EN 60060-1 [1] by mělo platit, že $m \geq 5$, přičemž počet přiložených impulzů na každé napět'ové hladině je $n \geq 10$. Krok mezi sousedními napět'ovými hladinami ΔU by měl být v rozsahu od 1 % do 6 % odhadnuté hodnoty U_{50} . Grafické znázornění této zkoušky je patrné z Obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Příklad zkoušky více hladinami napětí. [5]

Výsledkem zkoušek je počet k průrazných výbojů na každé napěťové hladině U_i při n přiložení napětí. [1], [5], [8]

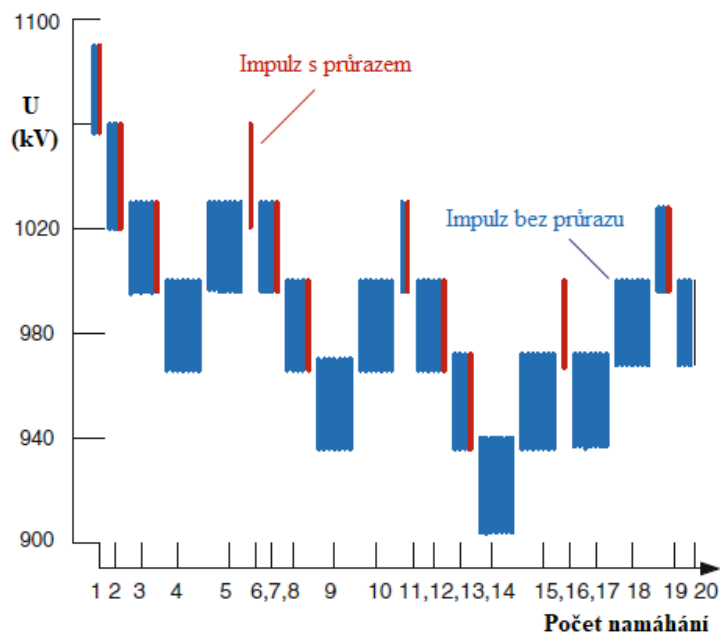
Zkoušky metodou nahoru-dolů (Třída 2)

Zkoušky třídy 2 se provádí přiložením n impulzů o stejném napětí na jednotlivé napěťové hladiny v m skupinách. Pro tuto metodu jsou běžně využívány dva zkušební postupy, a to:

- výdržný postup,
- výbojový postup.

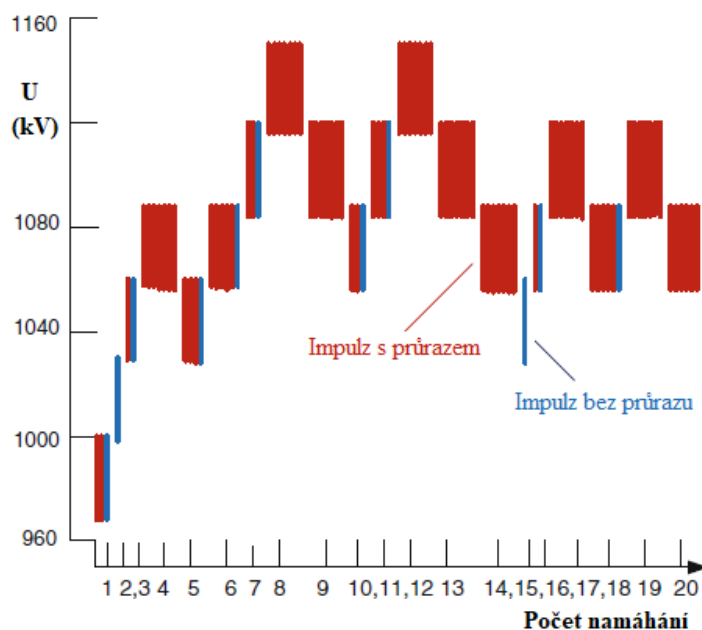
U obou těchto postupů se v každé následující skupině napěťová hladina buď zvyšuje, nebo snižuje o malý rozdíl ΔU , a to podle toho, jaké výsledky vyšly v předešlé skupině namáhání.

Výdržný postup (viz Obrázek 2.2) je zaměřený na hledání napěťových hladin, u kterých se předpokládá nízká pravděpodobnost výskytu průrazného výboje. Pokud v dané skupině nedošlo po přiložení napětí k žádnému průraznému výboji, pak se napěťová hladina zvyšuje o napětí ΔU , v opačném případě se o stejnou hodnotu napěťová hladina snižuje, a to hned po průrazu.



Obrázek 2.2: Výdržný postup u zkoušky nahoru-dolů. [5]

Druhý z uvedených postupů, tedy výbojový postup (viz Obrázek 2.3), je protikladem výdržného postupu a je zaměřen na hledání napěťových hadin, u kterých se předpokládá vysoká pravděpodobnost výskytu průrazného výboje. Nedojde-li k přeskoku, pak se napěťová hladina zvyšuje o napětí ΔU , a naopak dojde-li zde k přeskokům u všech zvolených impulzů, napěťová hladina se o stejnou hodnotu napětí snižuje. Podobně jako u výdržného postupu se napěťová hladina mění hned, jakmile nedojde k přeskoku.



Obrázek 2.3: Výbojový postup u zkoušky nahoru-dolů. [5]

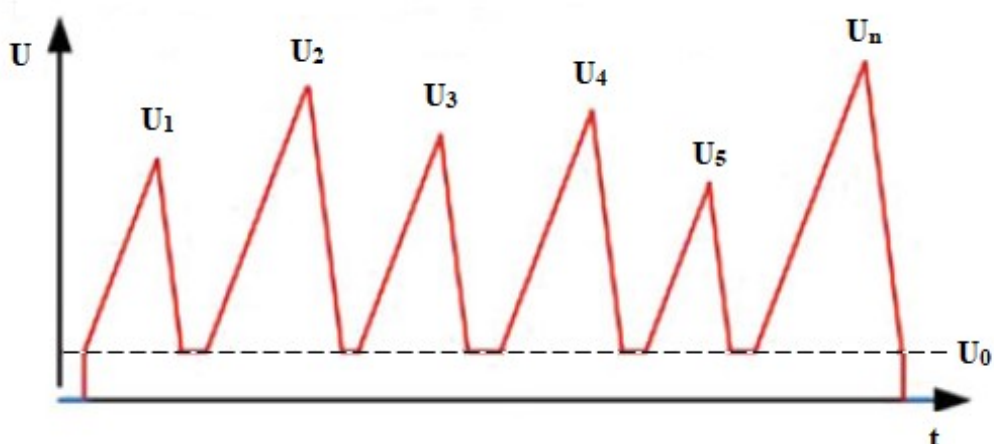
U obou dvou výše zmíněných postupů platí, že pokud je $n = 1$, pak se oba postupy přibližují zkoušce nahoru-dolů s 50% napětím průrazného výboje.

Zkoušky mající hodnotu $n = 7$ udávají 10% a 90% napětí průrazného výboje, to je definováno jako výdržné, potažmo jako napětí průrazného výboje (viz kapitola 2.1.2, postup D). Zkoušky s jinými hodnotami n se také používají pro měření napětí, ovšem s jinými pravděpodobnostmi výskytu průrazného výboje. Další parametry, tj. rozsah mezi hladinami ΔU , který by měl být v rozmezí 1,5 % až 3 % odhadnuté hodnoty U_{50} a počet skupin $m > 15$. [1], [5], [8]

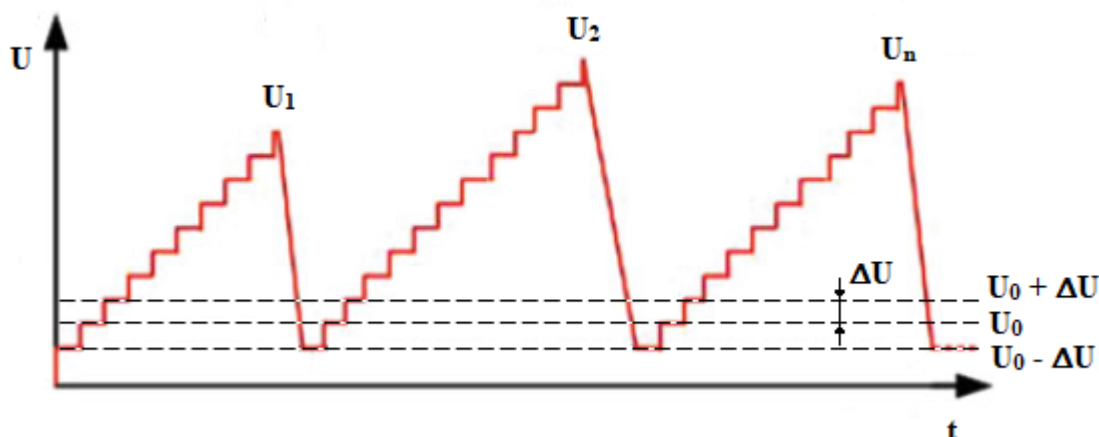
Zkoušky postupným namáháním (Třída 3)

Zkoušky třídy 3 se provádí n -krát tak, aby vždy došlo k průraznému výboji na zkoušeném objektu. Takovéto zkoušky provádíme plynulým zvyšováním (viz Obrázek 2.4) nebo postupným zvyšováním (viz Obrázek 2.5) střídavého nebo stejnosměrného napětí, anebo postupným zvyšováním impulzního napětí (viz Obrázek 2.6), vždy až do průrazného výboje.

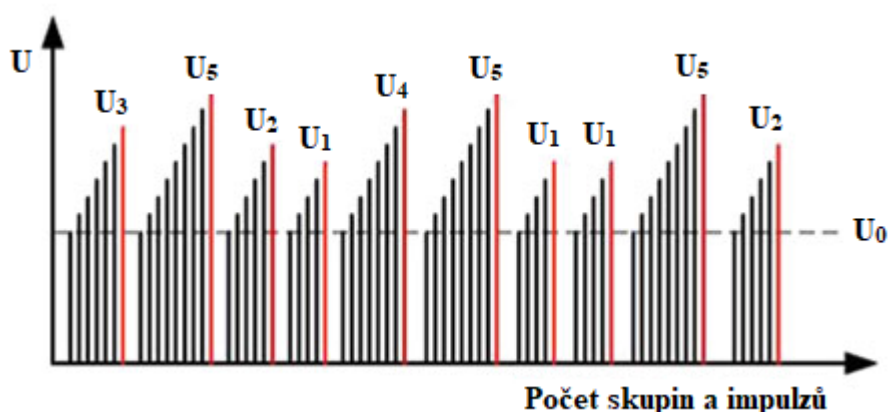
Při plynulém zvyšování je na zkoušený objekt přiváděno napětí mezi hodnotami U_0 až U_i , při které dochází k průraznému výboji. Při postupném zvyšování napětí je toto napětí na zkoušený objekt přiváděno po krocích ΔU až do průrazného výboje s hodnotou napětí U_i . Nebo je zde také možné opět udržovat zkušební napětí na neměnné napěťové hladině, dokud není zpozorován průraz v čase t_i .



Obrázek 2.4: Souvislé zvyšování střídavého nebo stejnosměrného napětí. [5]



Obrázek 2.5: Postupné zvyšování střídavého nebo stejnosměrného napětí. [5]



Obrázek 2.6: Postupné zvyšování impulzního napětí. [5]

Výsledkem pak je buď n hodnot napětí U_i , nebo čas t_i , při kterém došlo k průraznému výboji ($n \geq 10$). Do této třídy patří zkoušky s průraznými výboji vyskytujícími se v čele impulzu. [1], [5], [8]

2.1.2 Zkoušky výdržným napětím

Zkoušky výdržným napětím mohou být použity pro samočinně se obnovující i samočinně se neobnovující izolaci. Tyto zkoušky se podle norem ČSN EN 60060-1 [1] a ČSN EN 60060-3 [2] mohou provádět podle čtyř postupů označených A, B, C a D. Požadavky těchto zkoušek jsou splněny, pokud nedojde k žádnému průrazu v části samočinně se neobnovující izolace.

U postupů A, B a C se u napětí přikládaného ke zkoušenému objektu stanoví pouze výdržná hodnota. Postup D je určený pro samočinně se obnovující izolaci a využívá metodu nahoru dolů.

Objekty, na kterých se provádí zkoušky výdržným napětím, jsou například průchodky a kondenzátory, výkonové tlumivky, kabely a kabelové soubory či transformátory. [1], [2], [3], [8]

Postup A

U postupu A se přikládají při stanovené hladině výdržného napětí na zkoušený objekt 3 impulzy určitého tvaru a polarity. Požadavky, které musí být pro tuto zkoušku dodrženy, jsou splněny za předpokladu, že nedojde ani k jedné poruše. V případě vzniku přeskočení objekt nevyhověl a není vhodný pro danou napěťovou hladinu. Tento postup se doporučuje použít pro zkoušky samočinně se neobnovující izolace, tj. pro kabely, kondenzátory či tlumivky. [1], [2], [8]

Postup B

Postup B se provádí přiložením 15 impulzů na zkoušený objekt. Opět je dán tvar a polarita impulzu na stanovené hladině jmenovitého výdržného napětí. Požadavky, které jsou pro tuto zkoušku vyžadovány, jsou splněny za předpokladu, že nedojde v části samočinně se obnovující izolace k více než 2 průrazným výbojům.

Obecně je bráno, že nedošlo k poruše v samočinně se neobnovující izolaci, pokud u posledních 3 impulzů nedošlo k průraznému výboji. Pokud dojde k jednomu průrazu mezi 13. až 15. impulzem, je možné přiložit další maximálně 3 impulzy, ne více. Nedojde-li k žádnému dalšímu průraznému výboji, zkouška proběhla úspěšně. [1], [2], [8]

Postup C

Při postupu C se na zkoušený objekt přiloží na stanovené hladině výdržného napětí 3 impulzy daného tvaru a polarity. Zkoušený objekt prošel testem, jestliže nedojde k žádnému průraznému výboji, a naopak zkoušený objekt neprošel, dojde-li k více než jednomu průraznému výboji.

Pokud dojde v samočinně se obnovující izolaci konkrétně k jednomu přeskočení, přiloží se pak na tento zkoušený objekt devět dalších impulzů. Nedojde-li u devíti nových impulzů k přeskočení, objekt zkoušce vyhověl.

Pokud při jakékoliv části zkoušky dojde k zjištění poruchy v samočinně se neobnovující izolaci, zkoušený objekt testem neprošel. [1], [8]

Postup D

U postupu D můžeme u samočinně se obnovující izolace vyhodnotit 10 % napětí průrazného výboje U_{10} aplikací postupů uvedených v kapitole 2.1.1. To nám umožňuje buď nepřímo vyhodnotit napětí U_{10} , nebo přímo vyhodnotit napětí U_{10} a U_{50} . U nepřímého vyhodnocení lze odvodit napětí U_{10} z hodnoty napětí U_{50} za použití vztahu $U_{10} = U_{50} (1 - 1,3s)$, kde např. za použití pouze vzdušné izolace za sucha hodnota odchylky napětí $s = 0,03$.

Napětí U_{10} můžeme vyhodnotit za použití metody nahoru-dolů, přičemž zde musí být použito minimálně 8 skupin lišících se hladinami napětí se 7 impulzy v každé skupině. Pokud není hodnota napětí U_{10} menší než stanovené výdržné impulzní napětí, zkoušený objekt prošel zkouškou.

Napětí U_{50} můžeme vyhodnotit jak metodou nahoru-dolů tak i metodou více hladin. Při použití metody nahoru-dolů musí být v tomto případě přiložen 1 impulz na každou z alespoň 12 skupin platných napětí. U metody více hladin musí být použity 4 hladiny napětí každá s alespoň 10 impulzy.

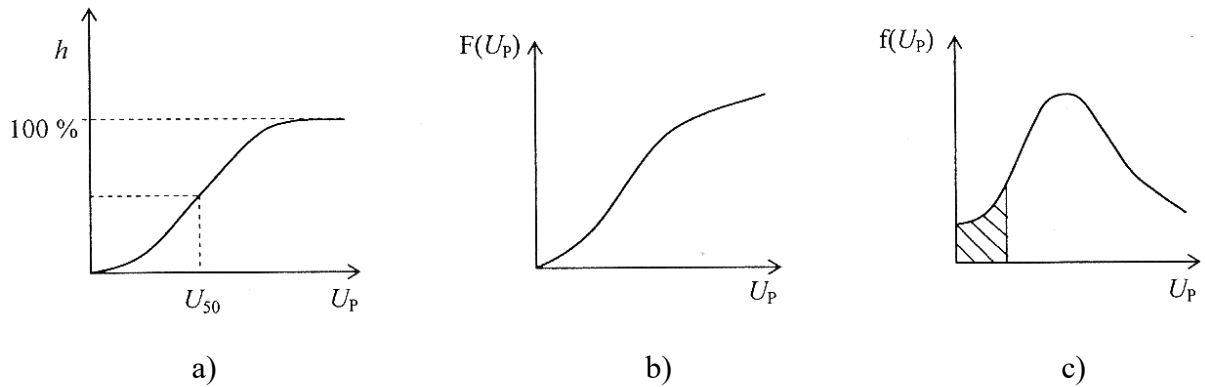
U všech zmíněných případů by se měl rozsah mezi hladinami ΔU pohybovat v rozmezí 1,5 % až 3 % odhadnuté hodnoty U_{50} . [1], [8]

2.2 Vyhodnocování zkoušek – statistika a distribuční funkce

Důležitou roli hraje u jevů charakterizujících průrazné chování zařízení VN prvek náhodnosti. Statistickými zákony se řídí soubory naměřených hodnot i různé prognózy a závěry.

Obecně přikládání konstantního napětí na vzduchovou mezeru vede k výskytu náhodné události v podobě „přeskoku“ nebo „výdrže“. Čím větší je počet přiložení napětí pro odhad četnosti průrazu, tím lepší je přizpůsobení odhadu ke správné, ale neznámé hodnotě pravděpodobnosti průrazu p . Měřítkem přesnosti odhadu je šířka intervalu spolehlivosti (konfidenční interval). Tento interval pokrývá hodnotu p s určitou hladinou spolehlivosti, například často používanou hladinou 95 %. Horní a dolní hranice konfidenčního intervalu jsou určeny na základě předpokládané teoretické distribuční funkce.

Obrázek 2.7 znázorňuje tzv. S křivku pro vyjádření závislosti pravděpodobnosti přeskoku na přiloženém napětí nebo doskokové vzdálenosti. Obrázek a) ukazuje závislost četnosti přeskoku h na napětí U_p . V tomto obrázku je také vidět polovinové přeskokové napětí U_{50} , u kterého je pravděpodobnost, že k přeskoku dojde, stejně velká jako pravděpodobnost, že k němu nedojde. Pokud je k dispozici dostatečně velký statistický soubor naměřených hodnot, je možné z četnosti přeskoku přejít na funkci $F(U_p)$ rozložení pravděpodobnosti přeskoku, viz obrázek b), která se také označuje jako distribuční funkce. Na obrázku c) je vidět hustota pravděpodobnosti f , kterou lze získat derivací distribuční funkce. Vyšrafovaná část (kvantil) definuje pravděpodobnost přeskoku při stanoveném napětí. V technice VN se hustota pravděpodobnosti pro vyhodnocení výsledků zkoušek zpravidla nepoužívá. Závislost pravděpodobnosti přeskoku na napětí je popsána teoretickou distribuční funkcí. [3]



Obrázek 2.7: S křivka. [3]

3 Shrnutí dosavadních poznatků

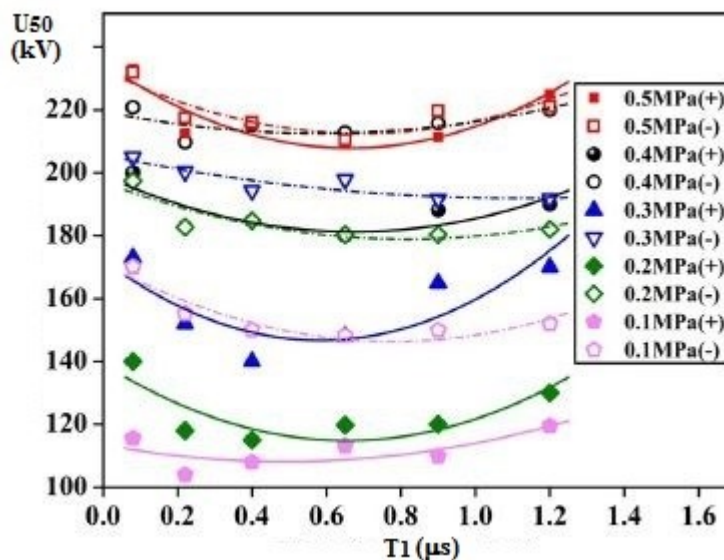
Jak jsem již zmínila v úvodu, moje práce navazuje na diplomovou práci pana inženýra Ondřeje Dunovského, který se zabýval podobnou tematikou. V této kapitole shrnu jeho i další známé poznatky již získané ve zkoumané oblasti, abych je mohla porovnat s výsledky, kterých jsem dosáhla já.

Pan inženýr Dunovský se ve své práci zabýval testováním zkoušeného objektu standardním aperiodickým atmosférickým impulzním napětím s různou dobou čela, zatímco moje práce je zaměřena na využití atmosférického impulzního napětí oscilačního. Mým úkolem je porovnání vlivu rozdílných tvarů (parametrů) těchto impulzů na izolační pevnost plynného izolantu umístěného ve zkušební nádobě.

Experimentální část práce vychází z poznatků publikovaných ve výzkumných člancích [12], [15], [16], [17]. Výsledky uvedených publikací analyzovaly vliv změny tvaru atmosférického impulzního napětí (změna doby čela nebo týlu, oscilace) na pevnost izolace. Práce konstatovaly v některých případech snížení odolnosti izolace proti tomuto typu přepětí, pokud dojde k odchylce od standardního tvaru zkušebního impulzu. Protože se takové změny tvaru v praxi vyskytují, diskutují pak publikace vhodnou volbu tvaru zkušebního impulzu u některých VN aplikací. Všechny experimenty používaly jako testovanou izolaci plyn SF₆. Cílem navazujících prací je vyhodnotit, jestli se podobné závislosti objevují i v izolaci tvořené syntetickým vzduchem.

Na Obrázku 3.1 z článku [12] je vidět příklad grafického zpracování závislosti 50% přeskokového napětí U_{50} na době čela T_l impulzu, poměnným parametrem je tlak plynné izolace SF₆ a polarita přiloženého impulzu. Doba čela vždy odpovídá velikosti nastaveného tlumícího odporu R_t . Při testech, které jsem prováděla (viz kapitola 4) byly použity tyto hodnoty:

- $R_t = 0 \Omega \rightarrow T_l = 0,3 \mu\text{s}$,
- $R_t = 100 \Omega \rightarrow T_l = 0,6 \mu\text{s}$,
- $R_t = 250 \Omega \rightarrow T_l = 1,2 \mu\text{s}$.

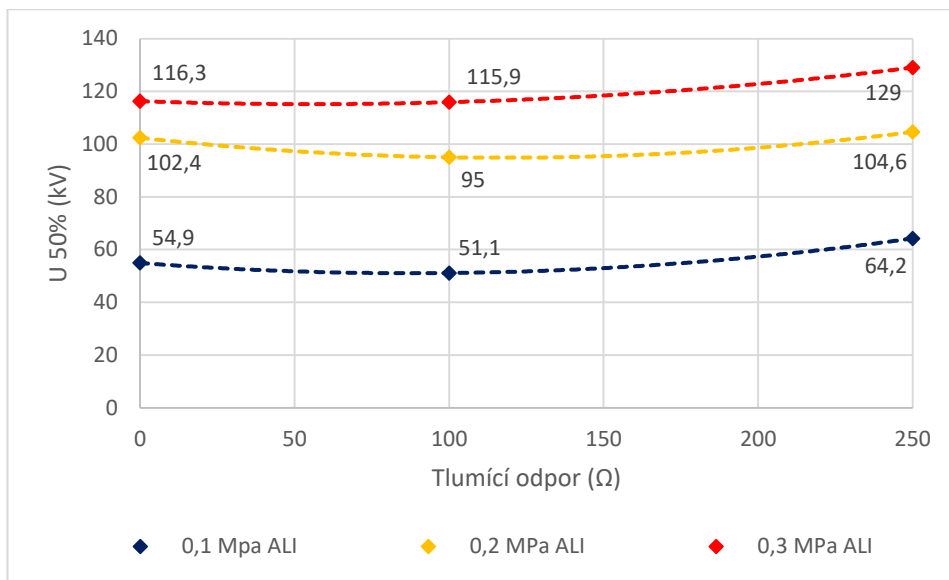
Obrázek 3.1: Závislost napětí U_{50} na době čela T_1 . [12]

Testy v tomto případě byly prováděny ve zkušební nádobě, která obsahovala plyn SF_6 a bylo zkoumáno průrazné chování tohoto plynu při použití aperiodického atmosférického impulzu. Pro generování zkušebního impulzu byl využit Marxův impulzní generátor. Elektrodová soustava byla umístěna uvnitř uzavřené nádoby a tvořena hrotovou elektrodou o poloměru zakřivení 2 mm a uzemněnou elektrodou kruhového tvaru s průměrem 300 mm. Vzdálenost obou elektrod od sebe byla 33 mm.

Na Obrázku 3.1 je vidět, že se zvyšujícími se hodnotami doby čela T_1 se mění i velikost polovinového přeskokového napětí U_{50} a křivky mají konvexní charakter (tvar písmene U). Závislost tak vykazuje minimum pro hodnotu doby čela, která neodpovídá standardní hodnotě 1,2 μs . Z toho vyplývá, že standardní atmosférický impulz nemusí být dostatečně citlivý indikátor pro odhalování možných závad izolace jako atmosférický impulz s $T_1 < 1,2 \mu\text{s}$. [4], [12]

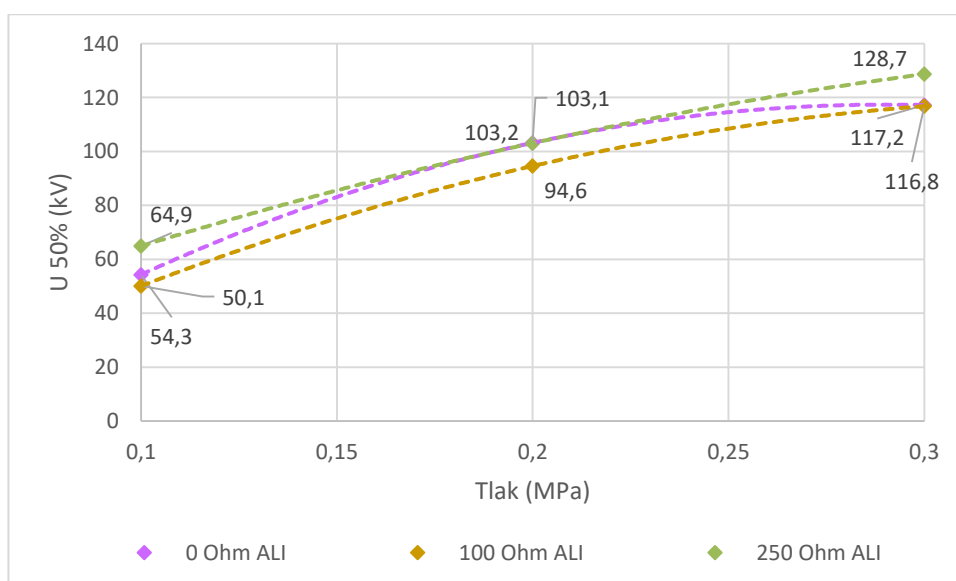
V Grafu 3.1, který jsem vytvořila z naměřených hodnot odpovídajících testování aperiodickým atmosférickým napětím a převzatých z práce [4], je vidět závislost U_{50} na tlumícím odporu, tedy na době čela, pro tři různé tlaky (0,1 MPa, 0,2 MPa, 0,3 MPa). Jde o případ, kdy zkušební nádoba obsahovala, stejně jako při mnou prováděných testech, syntetický vzduch, který se skládal z 80 % dusíku a z 20 % kyslíku. Elektrodová soustava, podmínky měření i nastavení všech ostatních parametrů použité při těchto testech jsou také stejné, což podrobně popisují v kapitole 4.2.

Z grafu je patrné, že i v plynné izolaci tvořené syntetickým vzduchem se potvrdily výsledky výzkumu zjištěné pro prostředí SF₆ (viz Obrázek 3.1), tj. závislosti získané proložením naměřených hodnot polynomem má tvar písmene U. [4]



Graf 3.1: Závislost U_{50} na tlumícím odporu (původní výzkum). [4]

Graf 3.2 odpovídající rovněž hodnotám uvedeným v [4] znázorňuje závislost U_{50} na tlaku plynu ve zkušební nádobě pro tři různé tlumící odpory (0 Ω , 100 Ω , 250 Ω). Z grafu je vidět, že pro všechny nastavené tlumící odpory s rostoucím tlakem roste i 50 % přeskokové napětí U_{50} .



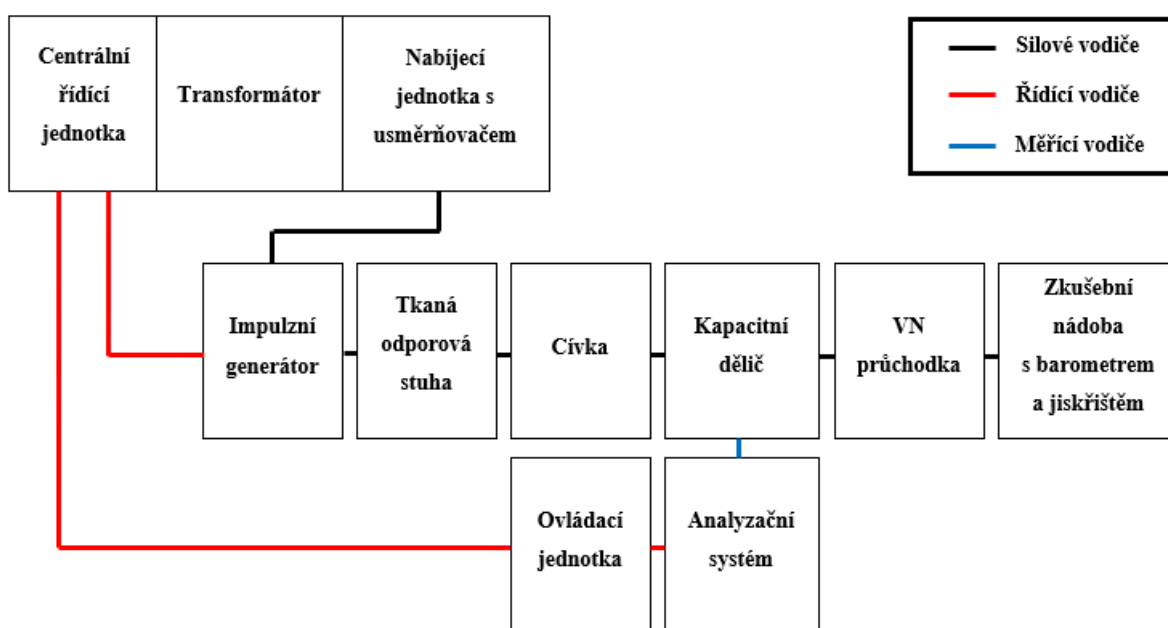
Graf 3.2: Závislost U_{50} na tlaku plynného izolantu (původní výzkum). [4]

4 Praktické testování napěťové pevnosti plynného izolantu

Hlavním cílem mé diplomové práce bylo realizovat sérii testů pro ověření vlivu tvaru impulzu na izolační pevnost konkrétního uspořádání zkoušeného objektu. Tyto experimentální zkoušky jsem provedla v laboratoři VN na Západočeské univerzitě v Plzni.

4.1 Schéma zapojení konkrétního uspořádání měřícího obvodu

Na Obrázku 4.1 je znázorněno zapojení měřícího obvodu použitého pro experiment.



Obrázek 4.1: Blokové schéma měřícího obvodu. [zdroj vlastní]

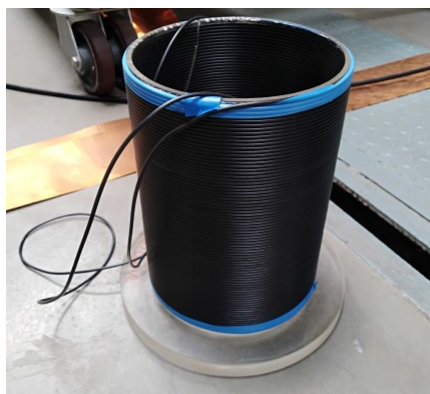
4.2 Popis zařízení a postup měření

Celá série testů provedených podle výše znázorněného zapojení probíhala za stejných podmínek. V hermeticky uzavřené zkušební nádobě (viz Obrázek 4.2) byl po celou dobu měření syntetický vzduch, který se skládal z 80 % dusíku a z 20 % kyslíku.



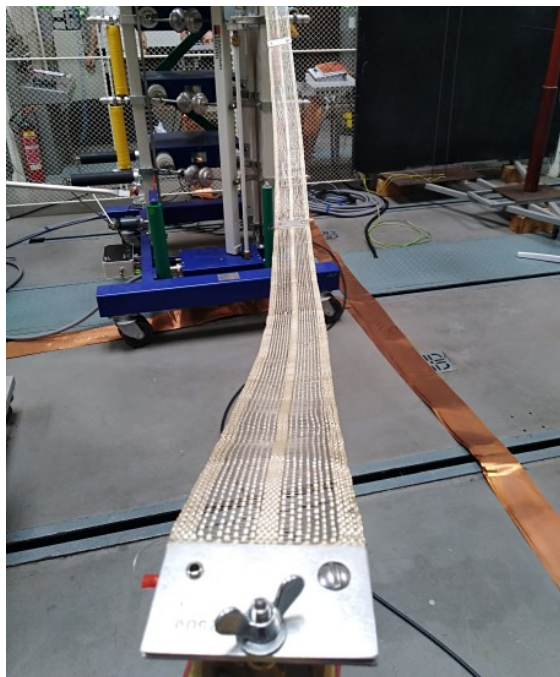
Obrázek 4.2: Zkušební nádoba. [zdroj vlastní]

Elektrodová soustava uvnitř nádoby byla tvořena kulovou elektrodou s poloměrem 75 mm a hrotem o poloměru 2 mm. Na cívce (viz Obrázek 4.3), která je do obvodu zapojena pro vytvoření oscilačního impulzního napětí, byla nastavena stálá hodnota indukčnosti 731 mH.



Obrázek 4.3: Cívka připojovaná do zkušebního obvodu. [zdroj vlastní]

Jedním z proměnných parametrů byl tlak izolačního plynu v nádobě. Pro tento experiment jsem zvolila hodnoty 0,1, 0,2 a 0,3 MPa. Druhým proměnným parametrem byl tlumicí odpor, který ovlivňoval rozkmitání přiloženého napěťového signálu. Na Obrázek 4.4 je vidět tkaná odporová stuha, jejímž zkracováním či prodlužováním je možno měnit velikost tlumicího odporu. Měření jsem provedla pro hodnoty 0 Ω , 100 Ω a 250 Ω .

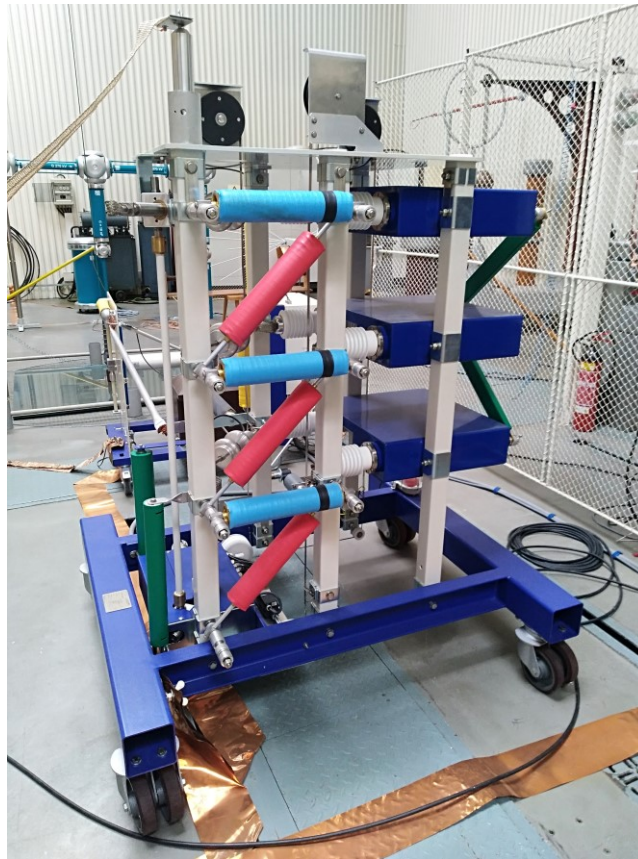


Obrázek 4.4: Tkaná odporová stuha. [zdroj vlastní]

Z Obrázků 4.6, 4.7 a 4.8 níže, je patrné, že tlumicí odpor ovlivňuje počet kmitů. Čím je tlumicí odpor větší, tím vzniká méně kmitů.

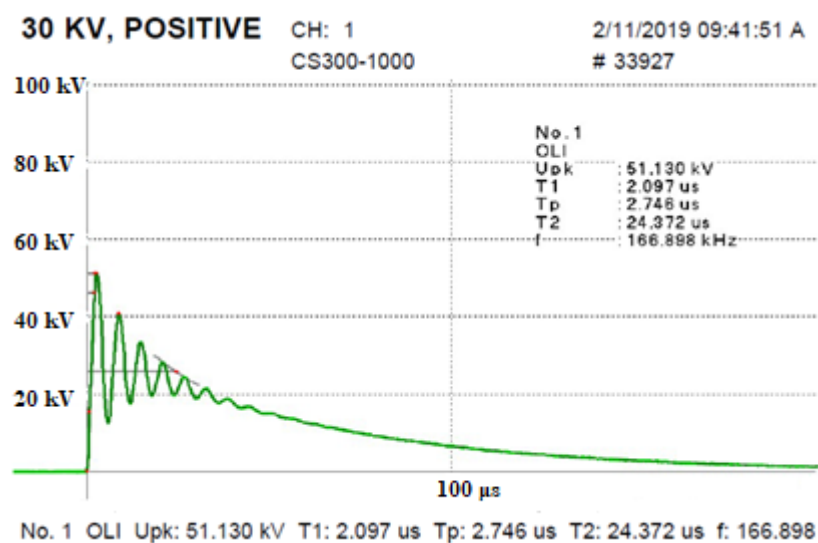
Při experimentu jsem použila zkušební metodu více hladin, která je popsána v kapitole 2.1.1. V Příloze 1 jsou uvedeny tabulky s výsledky průběhu zkoušky, do kterých jsem zaznamenávala přeskoky na jednotlivých napěťových hladinách. Na každé napěťové hladině jsem vždy aplikovala 25 napěťových impulzů, přičemž napěťový krok jsem volila s ohledem na průběh testu, vždy však v rozmezí 2 až 5 kV. Mezi přiložením jednotlivých impulzů jsem dodržovala časový interval 30 s, aby realizované testy nevykazovaly závislost výsledků na předchozím přiloženém napětí. Před každým vlastním měřením jsem zkontrolovala správnost zapojení obvodu a nastavení vstupních hodnot. Měření jsem prováděla pouze pro kladnou polaritu impulzu.

Na Obrázcích 4.6, 4.7, 4.8 vložených dále v textu jsou uvedeny tvary konkrétních napěťových signálů použitých v experimentální části mé práce. Pro vytvoření těchto zkušebních atmosférických impulzů napětí byl použit Marxův víceúrovňový generátor společnosti Heafely (viz Obrázek 4.5). Pro účely mnou realizovaných testů pracoval generátor v 2stupňovém zapojení.

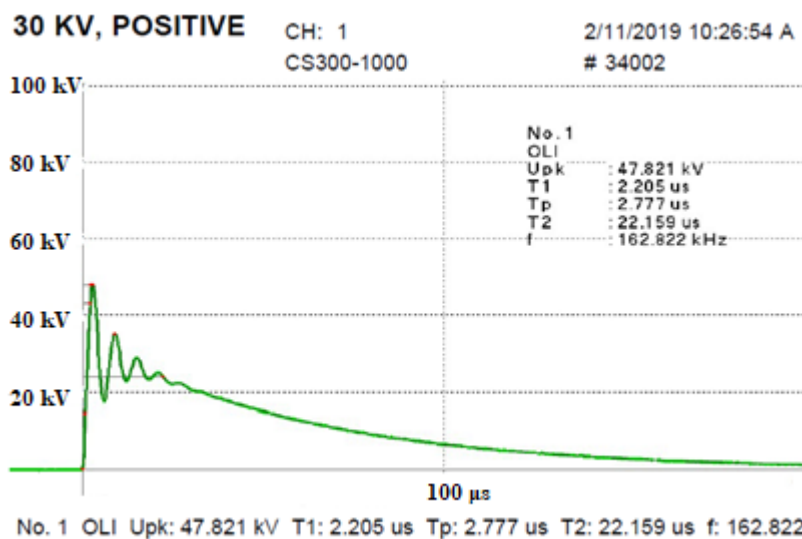


Obrázek 4.5: Rázový generátor Haefely. [zdroj vlastní]

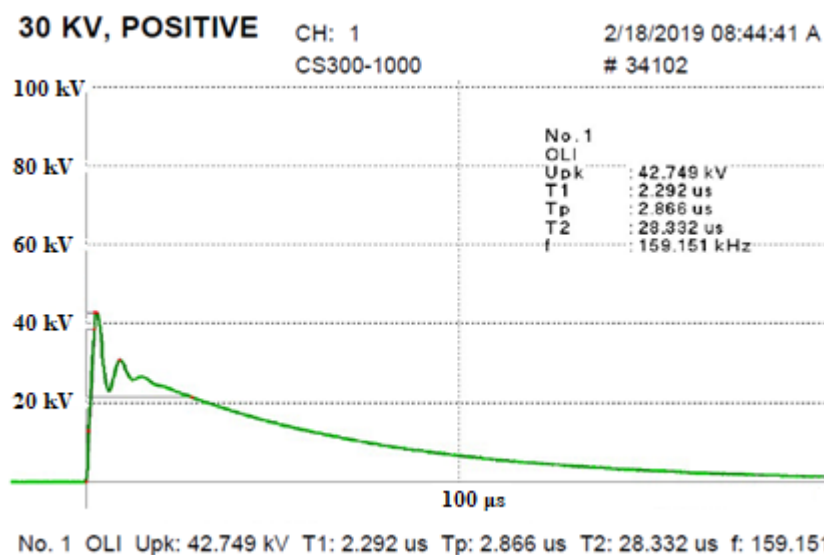
Pro ukázkou grafického výstupu jsem vybrala plné signály, tedy signály bez přeskočení, z měření probíhajícího pro všechny tři tlumící odpory při tlaku plynu 0,1 MPa a při nabíjecím napětí 30 kV.



Obrázek 4.6: Časová závislost napěťového signálu při tlumícím odporu 0 Ω. [zdroj vlastní]



Obrázek 4.7: Časová závislost napěťového signálu při tlumícím odporu 100 Ω. [zdroj vlastní]

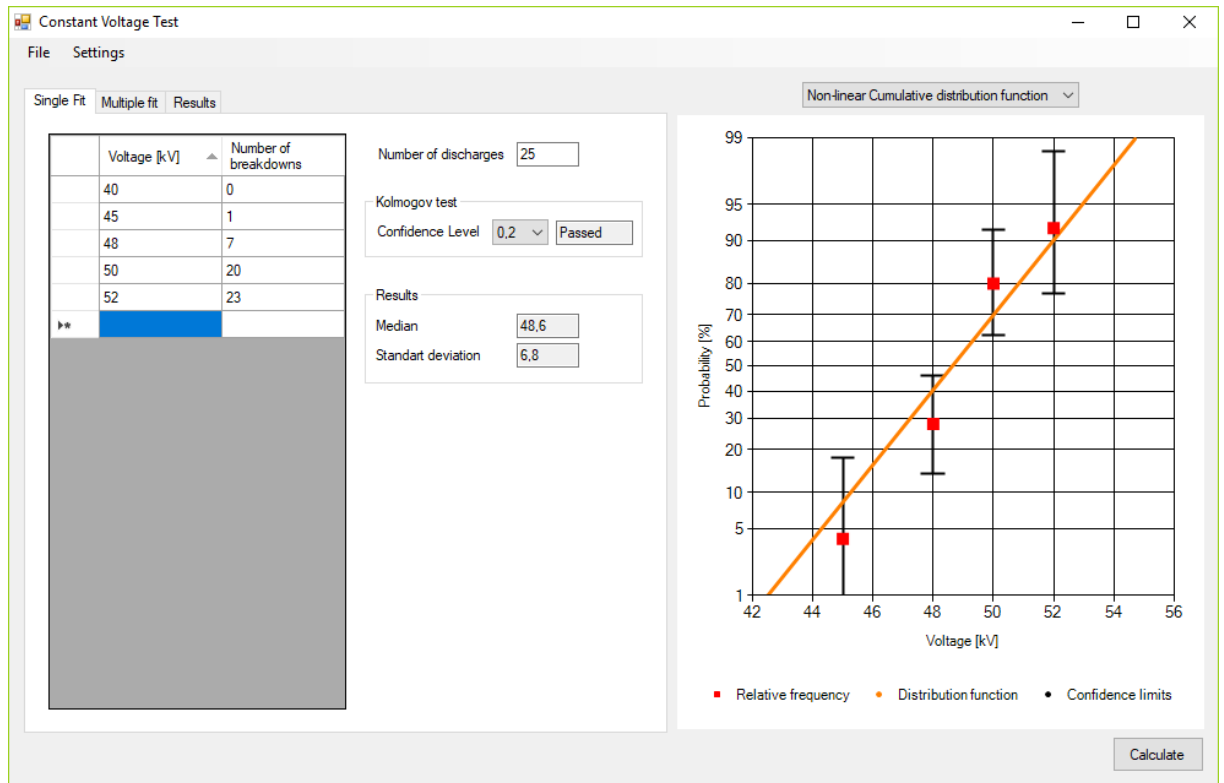


Obrázek 4.8: Časová závislost napěťového signálu při tlumícím odporu 250 Ω. [zdroj vlastní]

4.3 Statistické vyhodnocení výsledků měření

Pro statistické vyhodnocení naměřených výsledků jsem využila počítačový software Statistical Tool. Na Obrázcích 4.9 a 4.10 je vidět jeho grafické prostředí, do kterého jsem zanesla pro všechny skupiny měření velikosti napěťových hladin, při kterých testy probíhaly, a k nim vždy příslušný počet přeskoků v každé skupině, tj. vždy pro odpovídající hladinu napětí.

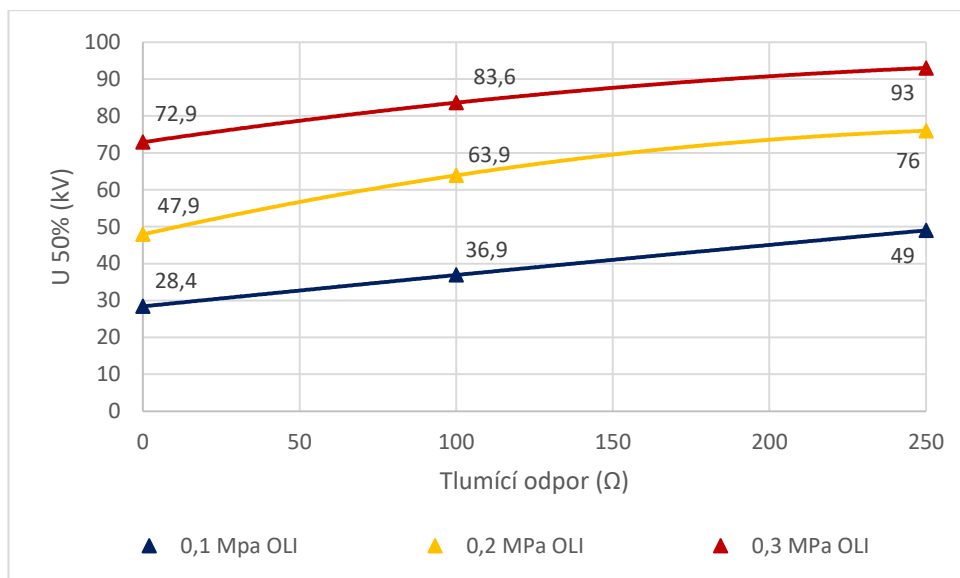
Na Obrázku 4.9 jde o nabíjecí napětí U_0 . V tomto případě jsou výsledky vyhodnocení prováděných testů uvedené v Grafech 4.1, 4.2, 4.3 a 4.4. Na Obrázku 4.10 je využita vrcholová hodnota generovaného impulzního napětí $U_{imp,p}$, výsledky vyhodnocení testů ukazují Grafy 4.5, 4.6, 4.7 a 4.8.



Obrázek 4.9: Prostředí statistického softwaru (př. pro nabíjecí napětí U_0). [7]

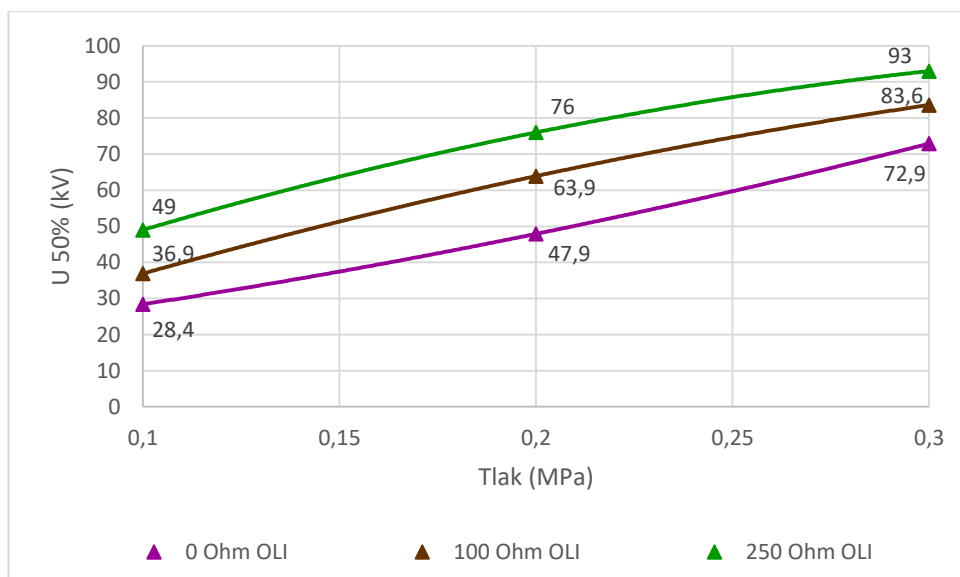
Po vložení všech hodnot zmíněných napětí tento SW vyhodnotil procentní pravděpodobnost přeskočení v závislosti na velikosti tohoto napětí. Z aproximace získaných bodů přímkou, která je opět vidět na Obrázcích 4.9 a 4.10 jsem získala 50% přeskovové napětí U_{50} a následně vyhodnotila jeho závislost na tlumícím odporu či tlaku v nádobě (viz Grafy 4.1, 4.2, 4.5 a 4.6).

Na Grafu 4.1 je znázorněna závislost 50% neboli polovinového přeskovového napětí U_{50} na tlumícím odporu při třech použitých tlacích testovaného plynu. Z tohoto grafu je vidět, že při zvyšujícím se tlumícím odporu se zároveň zvyšuje i polovinové přeskovové napětí. Dále vidíme, že čím větší je tlak, tím je i větší 50% přeskovové napětí, a to až o více než 20 kV.



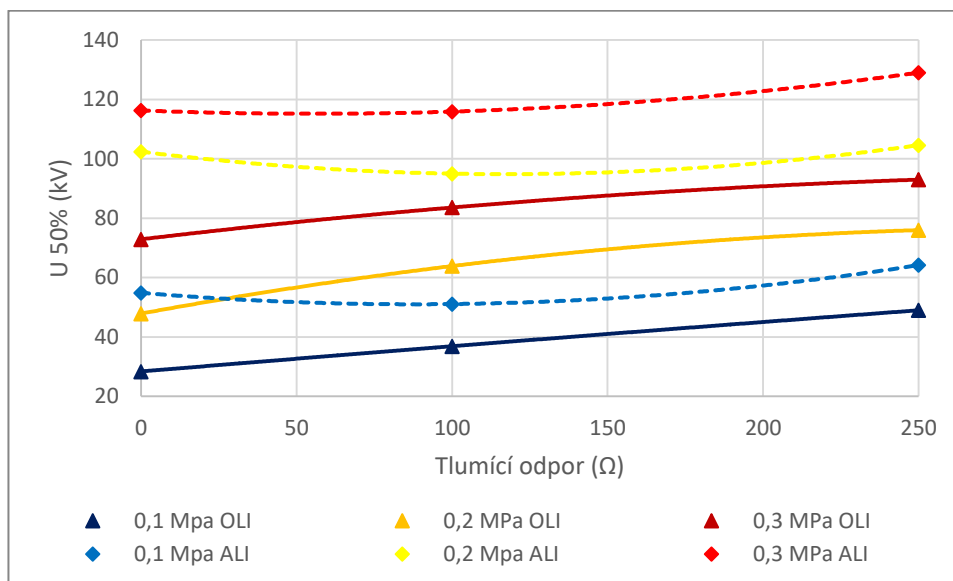
Graf 4.1: Závislost U_{50} na tlumícím odporu při nastaveném U_0 . [zdroj vlastní]

Graf 4.2 ukazuje závislost 50% přeskokového napětí U_{50} na tlaku při všech třech použitých hodnotách tlumícího odporu. Z tohoto grafu je zřejmé, že při zvyšujícím se tlaku se zároveň zvyšuje i polovinové přeskokové napětí. Dále vidíme, že čím větší je tlumící odpor, tím je i větší 50% přeskokové napětí.



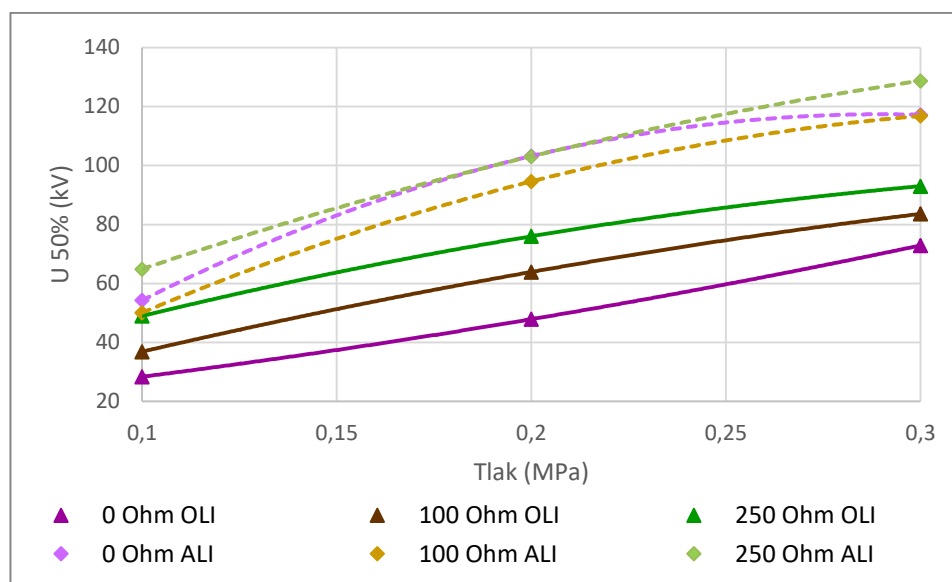
Graf 4.2: Závislost U_{50} na tlaku plynného izolantu při nastaveném U_0 . [zdroj vlastní]

V následujících Grafech 4.3 a 4.4 porovnávám průrazné chování testovaného plynu, které jsem zjistila já při prováděném experimentu s oscilačním impulzem, s výsledky uvedenými v [4], které odpovídají testům s aperiodickým impulzem.



Graf 4.3: Porovnání výsledků vycházejících z U_0 při změně tlumicího odporu pro OLI a ALI. [zdroj vlastní]

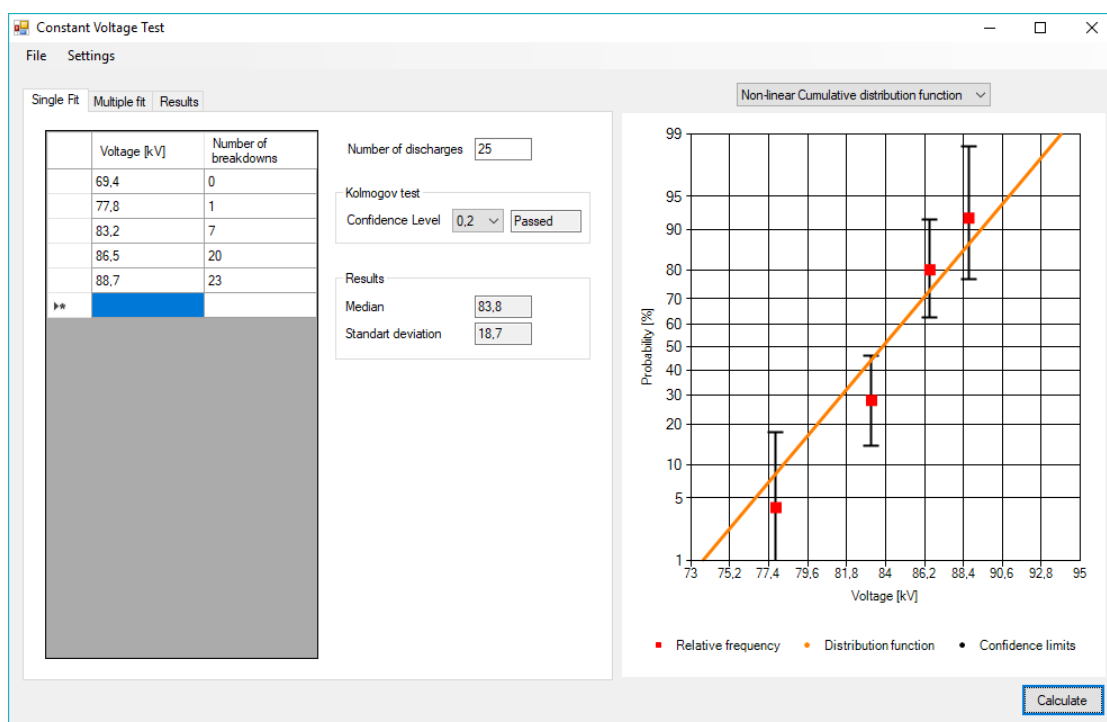
Graf 4.3 tedy znázorňuje jak výsledky naměřené při využití oscilačního napětí, tak i výsledky testů s použitím aperiodického impulzu. Z výsledků tohoto grafu je patrné, že závislost přeskovového napětí na charakteru kmitů v oscilujícím signálu, který odpovídá použitému tlumicímu odporu a hodnotě vřazené indukčnosti, má trvale rostoucí průběh, zatímco charakteristiky pro aperiodický signál vykazují tvar písmene U.



Graf 4.4: Porovnání výsledků vycházejících z U_0 při změně tlaku v nádobě pro OLI a ALI. [zdroj vlastní]

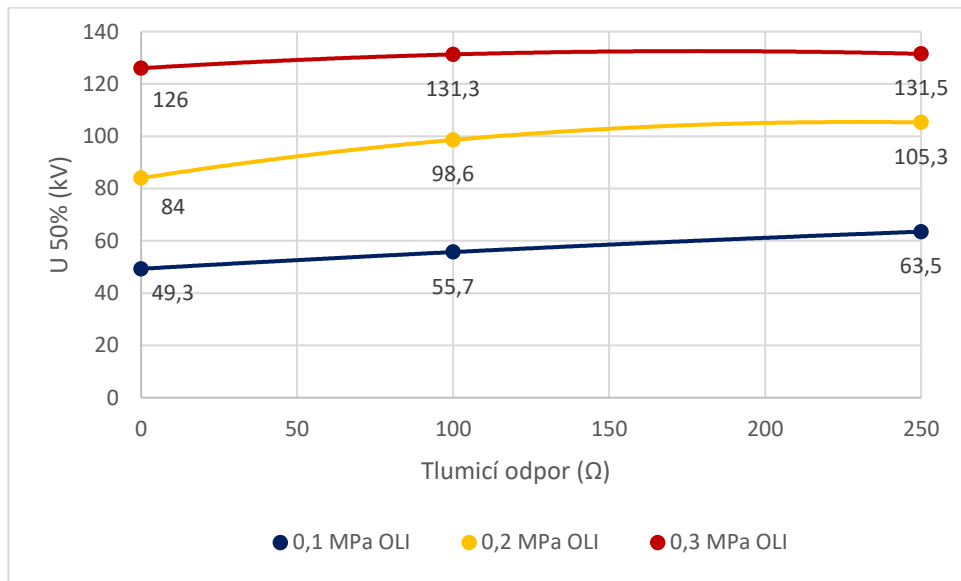
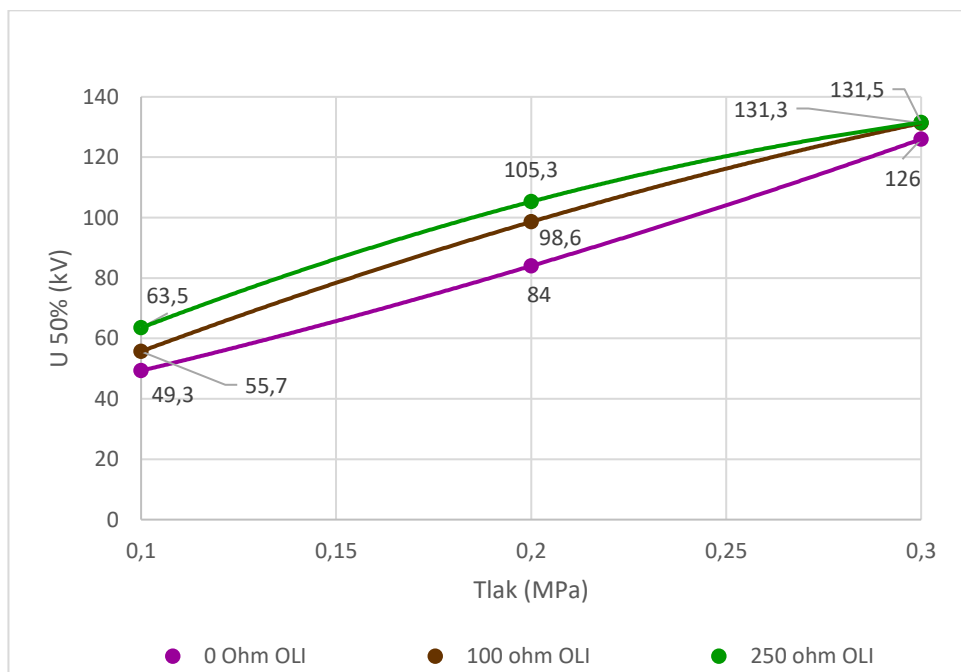
Z výsledků Grafu 4.4 je vidět, že závislost přeskokového napětí na tlaku plynu v nádobě má pro všechny nastavené tlumicí odpory a pro oba typy impulzního atmosférického napětí rovněž trvale rostoucí průběh.

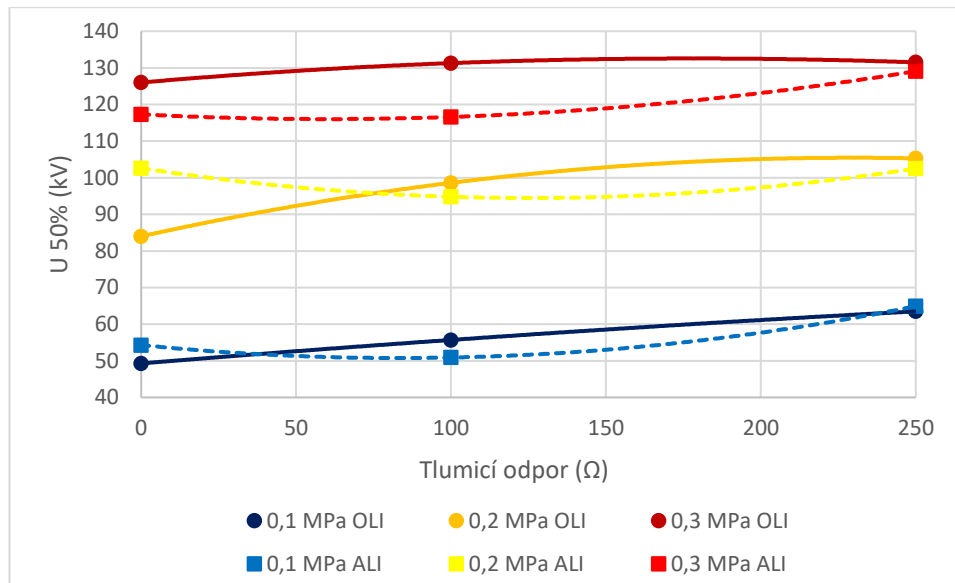
Níže uvedené Grafy 4.5, 4.6, 4.7 a 4.8 znázorňují závislosti polovinového přeskokového napětí odvozeného z vrcholové hodnoty generovaného impulzního napětí $U_{imp p}$ (viz Obrázek 4.10), které může být pro oscilující signál až dvojnásobné oproti napětí nabíjecímu, na tlumícím odporu či tlaku v nádobě.



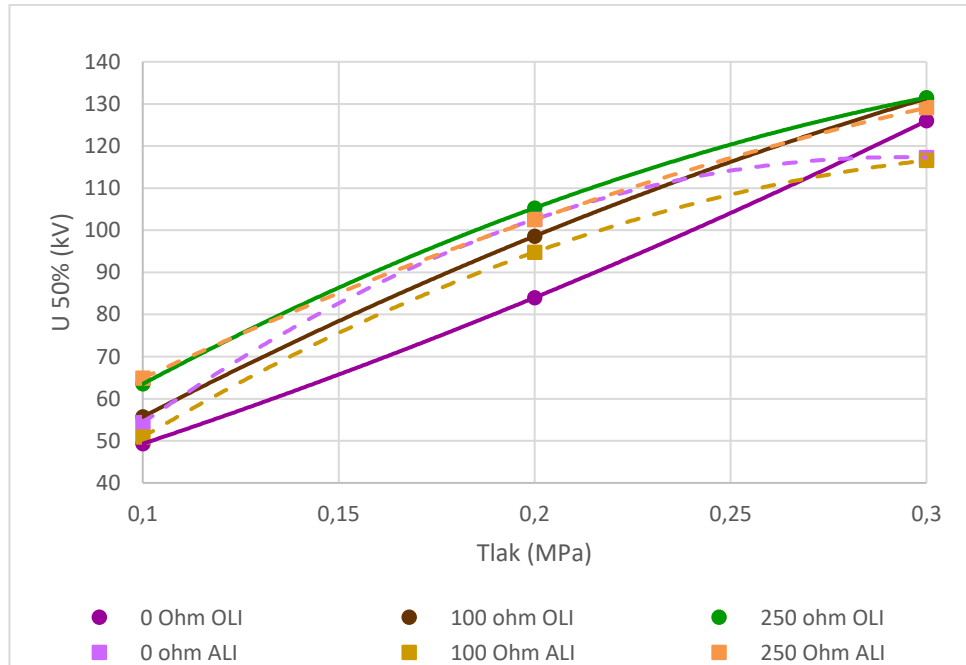
Obrázek 4.10: Prostředí statistického softwaru (př. pro maximální generované impulzní napětí $U_{imp p}$). [7]

Všechny tyto grafy lze v podstatě zhodnotit stejně jako výše uvedené Grafy 4.1, 4.2, 4.3 a 4.4 pouze s tím rozdílem, že mnou naměřené charakteristiky odpovídají asi 1,3 až 1,8násobku polovinového přeskokového napětí U_{50} . Což je způsobeno tím, jak jsem již zmínila, že vrcholová hodnota oscilačního atmosférického impulzu může být až dvojnásobná než vrchol aperiodického signálu. U ALI se tato vrcholová hodnota generovaného impulzu maximálně blíží k hodnotě nabíjecího napětí, zatímco u OLI je tedy maximální velikost generovaného napětí až 2krát větší, než je velikost napětí nabíjecího.

Graf 4.5: Závislost U_{50} na tlumícím odporu při nastaveném U_{imp} . [zdroj vlastní]Graf 4.6: Závislost U_{50} na tlaku plynného izolantu při nastaveném U_{imp} . [zdroj vlastní]



Graf 4.7: Porovnání výsledků vycházejících z U_{imp} při změně tlumicího odporu pro OLI a ALI. [zdroj vlastní]

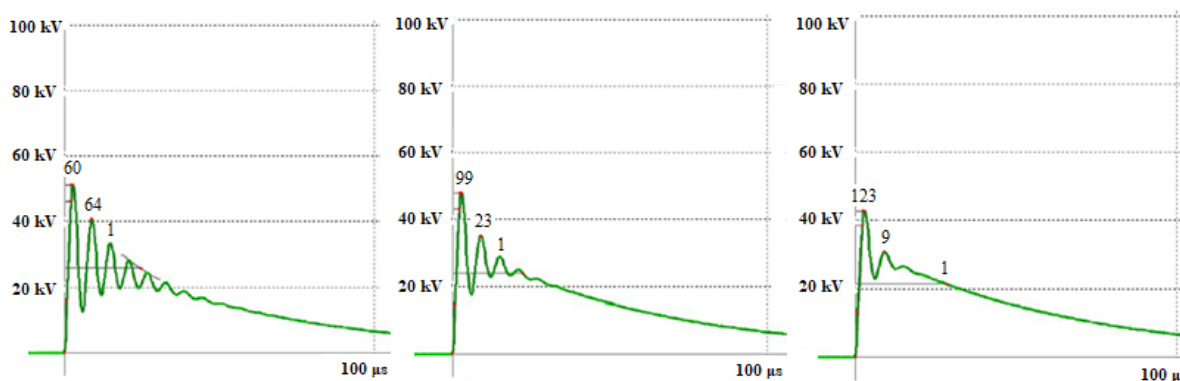


Graf 4.8: Porovnání výsledků vycházejících z U_{imp} při změně tlaku v nádobě pro OLI a ALI. [zdroj vlastní]

4.4 Vyhodnocení průrazného chování zkoušené izolace

V této kapitole zkoumám průrazné chování zkoušené izolace při různých parametrech napěťových impulzů. Sleduji, ve kterém okamžiku (při jakém kmitu) došlo k přeskoku, dále počet těchto přeskoků a také jejich závislost na konkrétních parametrech testovacího zařízení i testovaného objektu, kterými jsou velikost tlumících odporů generátoru související s tvarem generovaného impulzu a tlak zkoušeného plynu v nádobě.

Na Obrázku 4.11 jsou číselně vyznačeny počty přeskoků, a to vždy nad kmitem, při kterém k přeskoku došlo. Tyto obrázky se od sebe liší velikostí nastaveného tlumícího odporu. Jde o hodnoty shrnuté v Tabulce 4.1 v buňce s názvem celkem přeskoků.

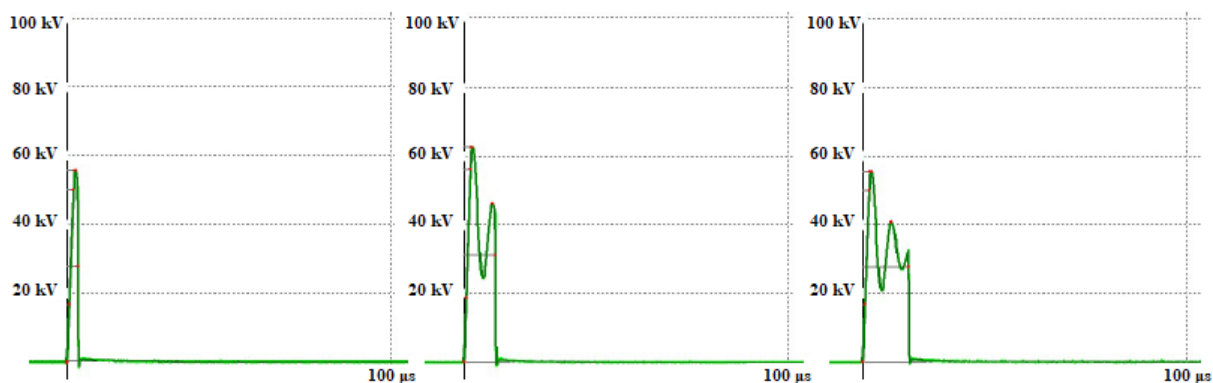


Obrázek 4.11: Počet přeskoků při tlumících odporech (zleva 0 Ω , 100 Ω , 250 Ω). [zdroj vlastní]

Z tohoto obrázku je vidět, že k největšímu počtu přeskoků dochází při prvním nebo druhém kmitu. Průměrný čas, při kterém dojde k přeskoku u prvního kmitu, je 2,98 μs , u druhého kmitu se průměrný čas přeskoku rovná 8,75 μs a 14,06 μs je doba do přeskoku u třetího kmitu. Dále zde vidíme, že čím více se zvyšuje tlumící odpor, tím je větší pravděpodobnost přeskoku na prvním kmitu.

V Příloze 2 jsou graficky zobrazeny všechny naměřené hodnoty, přičemž jsou tyto grafy rozdělené jak podle zvoleného tlumícího odporu, tak i podle hodnoty tlaku plynu v nádobě. Pouze u jednoho z provedených měření, viz měření pro 0,1 MPa a 250 Ω , došlo k přeskoku v klesající části, tedy v týle, a to v čase 29,457 μs .

Na Obrázku 4.12 je vidět grafické zobrazení přeskoku v 1., 2. a 3. vrcholu oscilujícího impulzního napětí.



Obrázek 4.12: Useknuté impulzní napětí v 1., 2. a 3. kmitu. [zdroj vlastní]

V Tabulce 4.1 a 4.2 jsou vyčísleny počty všech přeskoků vzniklých při realizovaných testech.

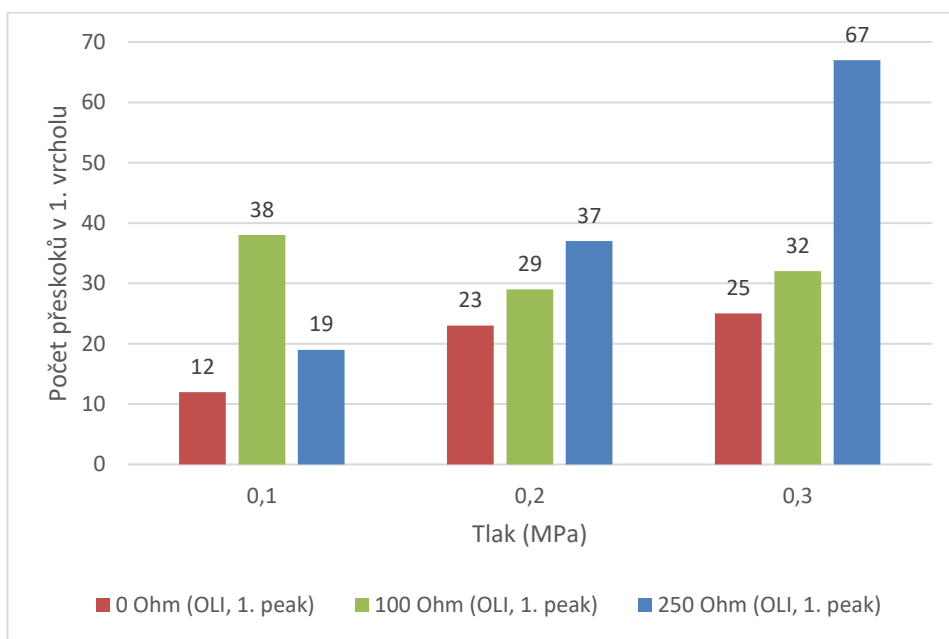
Tabulka 4.1: Počty přeskoků ve vrcholech kmitů při změně tlaku. [zdroj vlastní]

	Tlak v nádobě	0,1 MPa	0,2 MPa	0,3 MPa	Celkem přeskoků
Tlumící odpor	Vrcholy kmitů	–	–	–	–
0 Ω	1.	12	23	25	60
	2.	11	28	25	64
	3.	1	0	0	1
100 Ω	1.	38	29	32	99
	2.	1	15	7	23
	3.	1	0	0	1
250 Ω	1.	19	37	67	123
	2.	1	6	2	9
	3.	1	0	0	1

Tabulka 4.2: Počty přeskoků ve vrcholech kmitů při změně tlumícího odporu. [zdroj vlastní]

	Tlumící odpor	0 Ω	100 Ω	250 Ω	Celkem přeskoků
Tlak v nádobě	Vrcholy kmitů	–	–	–	–
0,1 MPa	1.	12	38	19	69
	2.	11	1	1	13
	3.	1	1	1	3
0,2 MPa	1.	23	29	37	89
	2.	28	15	6	49
	3.	0	0	0	0
0,3 MPa	1.	25	32	67	124
	2.	25	7	2	36
	3.	0	0	0	0

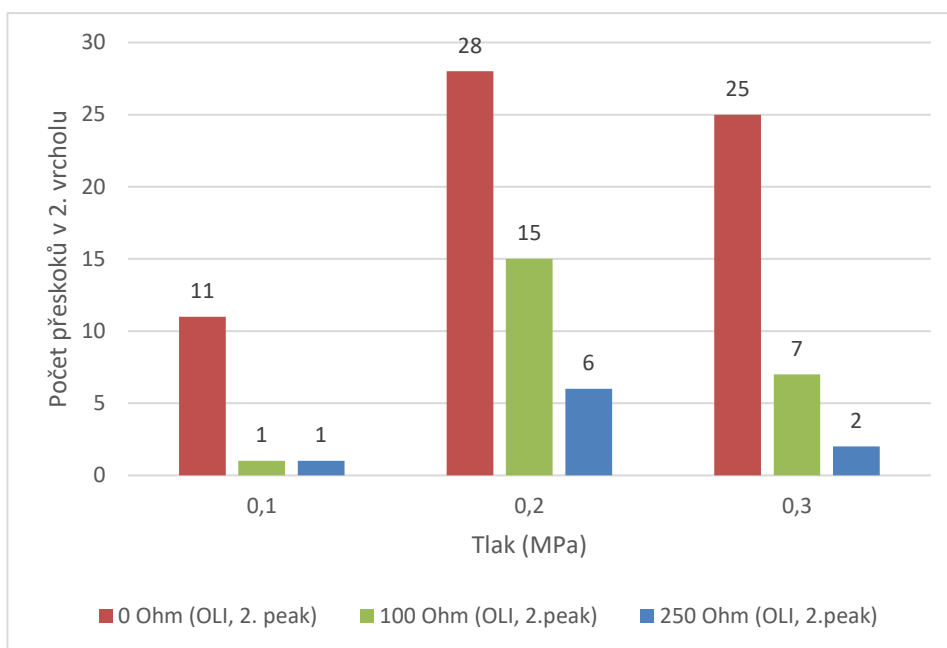
Graf 4.9 ukazuje počet přeskoků v 1. vrcholu impulsu při změně tlaku (viz Tabulka 4.1). Při tlumícím odporu 0 a 250 Ω se při zvyšujícím se tlaku zvyšuje i počet přeskoků. Při tlumícím odporu 100 Ω je počet přeskoků nejnižší pro 0,2 MPa, nejvyšší pro 0,1 MPa.



Graf 4.9: Počet přeskoků v 1. kmitu impulsu při změně tlaku. [zdroj vlastní]

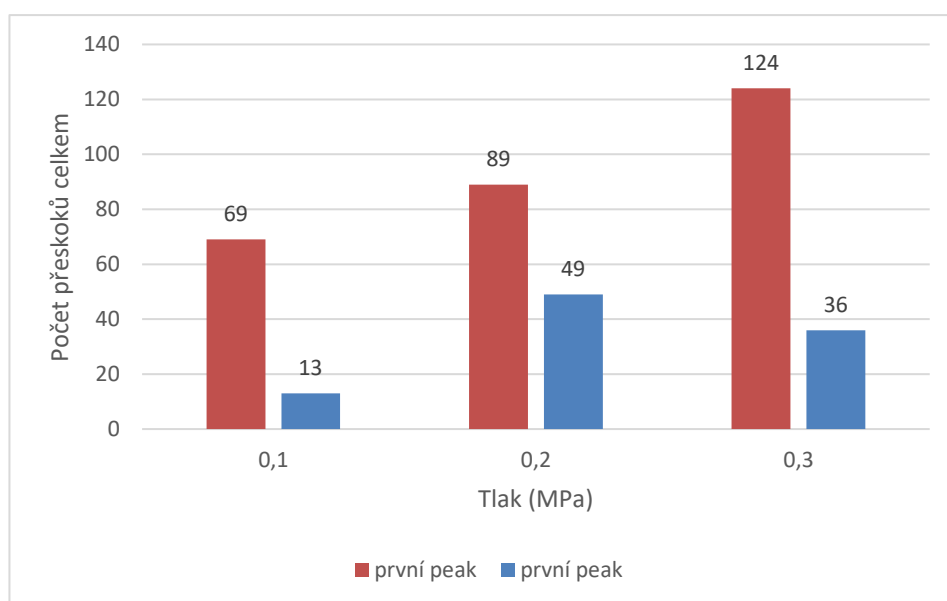
Graf 4.10 znázorňuje počet přeskoků v 2. vrcholu impulsu při změně tlaku (viz Tabulka 4.1). Z grafu je patrné, že při menším tlumícím odporu počet přeskoků roste (oproti

stavu v 1. kmitu), pro 0Ω je zde počet přeskoků největší. Dále je vidět, že při tlaku 0,2 MPa docházelo k nejvíce přeskokům u všech tlumících odporů.



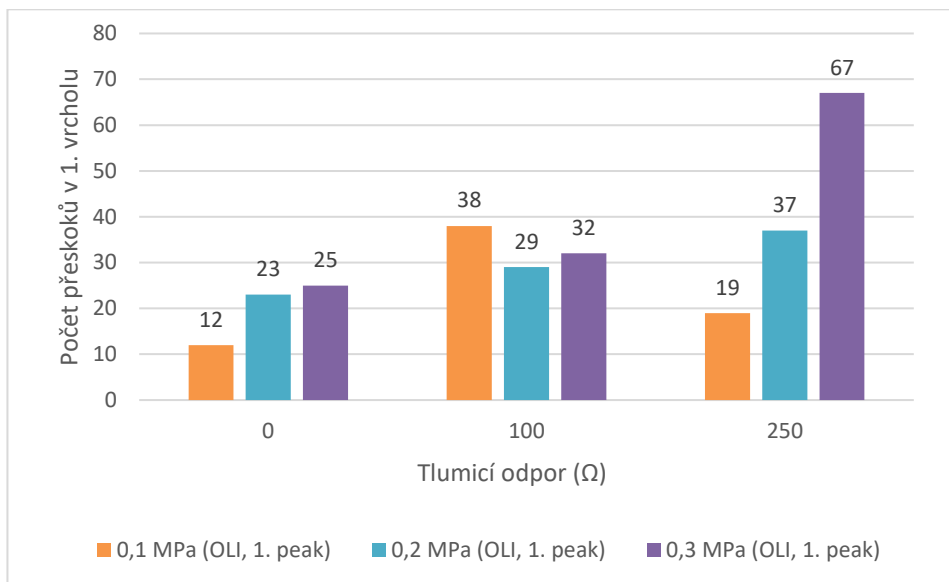
Graf 4.10: Počet přeskoků v 2. kmitu impulzu při změně tlaku. [zdroj vlastní]

Na Grafu 4.11, na kterém je pro porovnání vidět situace pro 1. a 2. kmit při změně tlaku, je patrné, že v 1. vrcholu kmitu impulzu počet přeskoků s rostoucím tlakem roste, zatímco v 2. vrcholu kmitu nejprve roste a poté klesá. Při všech nastavených tlacích je v 1. vrcholu počet přeskoků větší než v 2. (viz Tabulka 4.2).



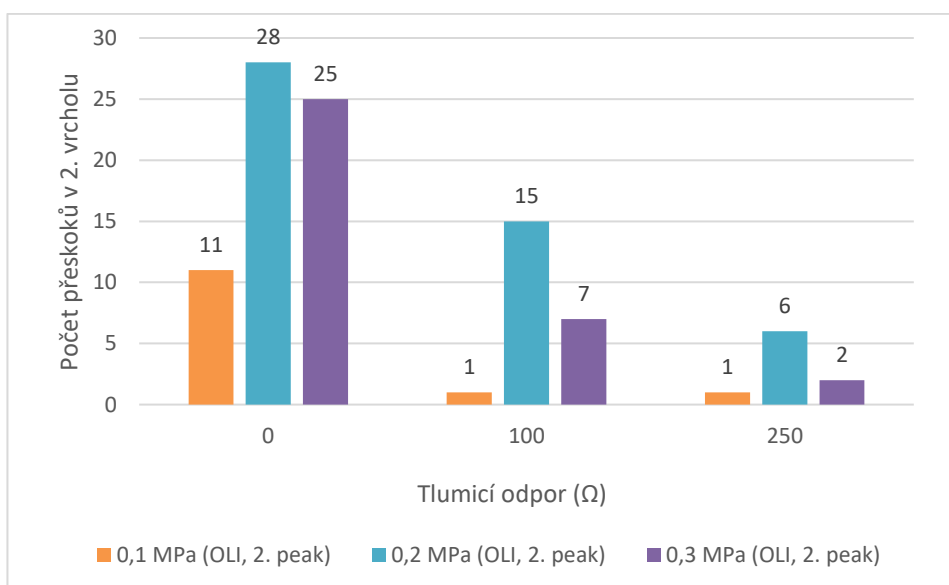
Graf 4.11: Počet přeskoků v 1. a 2. kmitu impulzu při změně tlaku. [zdroj vlastní]

Graf 4.12 ukazuje počet přeskoků v 1. vrcholu impulzu při změně tlumicího odporu (viz Tabulka 4.2). Při tlacích 0,2 MPa a 0,3 MPa se při zvyšujícím se tlumicím odporu zvyšuje i počet přeskoků. Při tlaku 0,1 MPa počet přeskoků nejprve roste, a pak klesá.



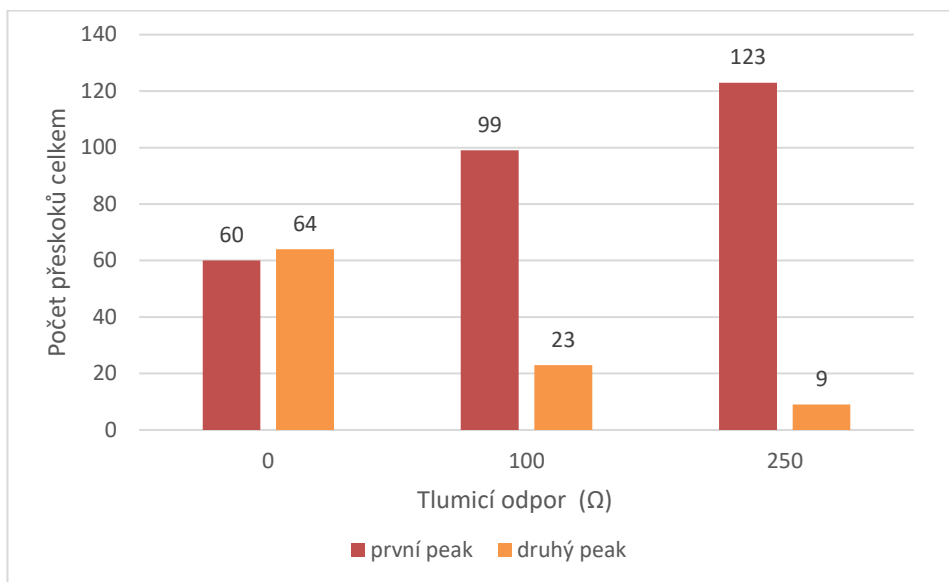
Graf 4.12: Počet přeskoků v 1. kmitu impulzu při změně tlumicího odporu. [zdroj vlastní]

Graf 4.13 znázorňuje počet přeskoků v 2. vrcholu impulzu při změně tlumicího odporu (viz Tabulka 4.2). Z grafu je patrné, že při nárůstu tlumicího odporu počet přeskoků klesá. Dále je vidět, že při tlaku 0,2 MPa docházelo k nejvíce přeskokům u všech tlumicích odporů.



Graf 4.13: Počet přeskoků v 2. kmitu impulzu při změně tlumicího odporu. [zdroj vlastní]

Na Grafu 4.14 je pro porovnání vidět situace pro 1. a 2. kmit při změně tlumícího odporu. V 1. vrcholu kmitu impulzu počet přeskoků s rostoucím tlumícím odporem roste, zatímco v 2. vrcholu kmitu klesá. Při tlumících odporech 100 Ω a 250 Ω je v 1. vrcholu počet přeskoků větší než v 2., ale při 0 Ω je počet přeskoků v obou kmitech téměř stejný (viz Tabulka 4.1).



Graf 4.14: Počet přeskoků v 1. a 2. kmitu impulzu při změně tlumícího odporu. [zdroj vlastní]

Při 3. kmitu došlo u všech tří tlumících odporů pouze k jednomu přeskoku, a to vždy při tlaku 0,1 MPa. Při tlacích 0,2 MPa a 0,3 MPa ve vrcholu 3. kmitu k přeskoku nedošlo.

Závěr

Bezpečnost, stabilita a nepřetržitost provozu elektrizační soustavy závisí na spolehlivosti a funkčnosti jejích dílčích prvků, které mohou být narušeny mimo jiné atmosférickým impulzním napětím způsobeným např. úderem blesku.

Tato práce se proto zabývá změnou průrazného chování izolace v závislosti na parametrech zkušebního napětí. Skutečný tvar vlny šířící se po vedení je formován řadou různých vlivů a znalost chování izolace zařízení vystavené přepětí je velmi důležitá. Informace o tom, zda normalizovaný zkušební impulz je dostatečně citlivý ukazatel pro posouzení odolnosti izolačního systému, je pro spolehlivý provoz klíčová.

V první části práce jsem se zaměřila na teoretický rozbor řešené problematiky. Objasňuji zde základní používané pojmy, jako jsou izolant, elektrická pevnost či napěťový impulz, přičemž charakterizují různé druhy normalizovaných impulzů, které se pro testy využívají, a shrnuji jejich základní parametry. V další kapitole popisují druhy zkušebních postupů a uvádím, jakým způsobem lze provádět vyhodnocování testů. A dále se zabývám již získanými poznatky z této oblasti.

Na základě zmíněných teoretických znalostí jsem v praktické části práce realizovala a vyhodnotila sérii testů pro ověření vlivu tvaru impulzu na izolační pevnost plynného izolantu při konkrétním uspořádání zkušebního obvodu.

Pro prováděné testy jsem zvolila zkušební postup více hladinami a na zkoušený objekt přikládala oscilační atmosférické impulzy. V praxi se v některých případech pro testování v místě použití zkoušeného objektu využívají mobilní impulzní testovací systémy, kde je zkušebním signálem OLI. OLI testy se uskutečňují i na zařízení UVN stejnosměrných přenosů. Zmíněné testy mají také velký význam pro posouzení průrazného chování izolace při šíření přepěťových vln na vedení.

Řešená problematika je zatím experimentálně a statisticky málo popsána. Cílem experimentální části práce byla především příprava metodiky pro zkoušky oscilujícím impulzním napětím a první série testů pro přípravu dalšího programu zkoušení a optimalizaci volby parametrů zkoušek. DP je součástí probíhajících výzkumných aktivit realizovaných ve vysokonapěťové laboratoři Fakulty elektrotechnické ZČU v Plzni.

Seznam obrázků, tabulek a grafů

OBRÁZEK 1.1: SCHÉMA ZAPOJENÍ JEDNOSTUPŇOVÉHO RÁZOVÉHO GENERÁTORU NAPĚTÍ.....	18
OBRÁZEK 1.2: GENEROVÁNÍ IMPULZNÍHO NAPĚTÍ.....	18
OBRÁZEK 1.3: SCHÉMA ZAPOJENÍ ČTYŘSTUPŇOVÉHO RÁZOVÉHO GENERÁTORU NAPĚTÍ.....	19
OBRÁZEK 1.4: SPOUŠTĚCÍ JISKŘIŠTĚ VÍCESTUPŇOVÉHO GENERÁTORU.....	20
OBRÁZEK 1.5: NASTAVENÍ ČELNÍHO ODPORU.	22
OBRÁZEK 1.6: NASTAVENÍ TÝLNÍHO ODPORU.	22
OBRÁZEK 1.7: PLNÝ ATMOSFÉRICKÝ IMPULZ.....	25
OBRÁZEK 1.8: ATMOSFÉRICKÉ IMPULZNÍ NAPĚTÍ USEKNUTÉ V ČELE.	26
OBRÁZEK 1.9: ATMOSFÉRICKÉ IMPULZNÍ NAPĚTÍ USEKNUTÉ V TÝLE.	26
OBRÁZEK 1.10: APERIODICKÝ ATMOSFÉRICKÝ IMPULZ 0,8/50 μ s.....	28
OBRÁZEK 1.11: APERIODICKÝ ATMOSFÉRICKÝ IMPULZ 20/100 μ s.....	28
OBRÁZEK 1.12: OSCILAČNÍ ATMOSFÉRICKÝ IMPULZ 0,8/40 μ s, 370 KHZ.	29
OBRÁZEK 1.13: OSCILAČNÍ ATMOSFÉRICKÝ IMPULZ 20/100 μ s, 16 KHZ.	29
OBRÁZEK 1.14: SPÍNACÍ IMPULZNÍ NAPĚTÍ.	30
OBRÁZEK 1.15: APERIODICKÝ SPÍNACÍ IMPULZ 20/1 000 μ s.	31
OBRÁZEK 1.16: APERIODICKÝ SPÍNACÍ IMPULZ 400/4 000 μ s.	32
OBRÁZEK 1.17: OSCILAČNÍ SPÍNACÍ IMPULZ 20/1 000 μ s, 15 KHZ.	32
OBRÁZEK 1.18: OSCILAČNÍ SPÍNACÍ IMPULZ 400/4 000 μ s, 1 KHZ.....	33
OBRÁZEK 1.19: ĚKVIVALENTNÍ OBVOD GENEROVÁNÍ OSCILAČNÍHO IMPULZNÍHO NAPĚTÍ.	33
OBRÁZEK 1.20: OLÍ CHARAKTERISTIKA IMPULZNÍHO TESTOVACÍHO SYSTÉMU.	35
OBRÁZEK 1.21: IMPULZNÍ NAPĚTÍ S VELMI STRMÝM ČELEM.	36
OBRÁZEK 1.22: GENEROVÁNÍ IMPULZNÍHO NAPĚTÍ S VELMI RYCHLÝM ČELEM.....	36
OBRÁZEK 1.23: PRŮBĚH IMPULZNÍHO NAPĚTÍ S VELMI STRMÝM ČELEM.	37
OBRÁZEK 2.1: PŘÍKLAD ZKOUŠKY VÍCE HLADINAMI NAPĚTÍ.....	39
OBRÁZEK 2.2: VÝDRŽNÝ POSTUP U ZKOUŠKY NAHORU-DOLŮ.....	40
OBRÁZEK 2.3: VÝBOJOVÝ POSTUP U ZKOUŠKY NAHORU-DOLŮ.	40
OBRÁZEK 2.4: SOUVISLÉ ZVYŠOVÁNÍ STRÍDAVÉHO NEBO STEJNOSMĚRNÉHO NAPĚTÍ.....	41
OBRÁZEK 2.5: POSTUPNÉ ZVYŠOVÁNÍ STRÍDAVÉHO NEBO STEJNOSMĚRNÉHO NAPĚTÍ.	42
OBRÁZEK 2.6: POSTUPNÉ ZVYŠOVÁNÍ IMPULZNÍHO NAPĚTÍ.....	42
OBRÁZEK 2.7: S KŘIVKA.	45
OBRÁZEK 3.1: ZÁVISLOST NAPĚTÍ U_{50} NA DOBĚ ČELA T_1	47
OBRÁZEK 4.1: BLOKOVÉ SCHÉMA MĚŘICÍHO OBVODU.....	49
OBRÁZEK 4.2: ZKUŠEBNÍ NÁDOBA.....	50
OBRÁZEK 4.3: CÍVKA PŘIPOJOVANÁ DO ZKUŠEBNÍHO OBVODU.	50
OBRÁZEK 4.4: TKANÁ ODPOROVÁ STUHA.	51

OBRÁZEK 4.5: RÁZOVÝ GENERÁTOR HAEFELY.	52
OBRÁZEK 4.6: ČASOVÁ ZÁVISLOST NAPĚŤOVÉHO SIGNÁLU PŘI TLUMÍCÍM ODPORU 0Ω	52
OBRÁZEK 4.7: ČASOVÁ ZÁVISLOST NAPĚŤOVÉHO SIGNÁLU PŘI TLUMÍCÍM ODPORU 100Ω	53
OBRÁZEK 4.8: ČASOVÁ ZÁVISLOST NAPĚŤOVÉHO SIGNÁLU PŘI TLUMÍCÍM ODPORU 250Ω	53
OBRÁZEK 4.9: PROSTŘEDÍ STATISTICKÉHO SOFTWARE (PŘ. PRO NABÍJECÍ NAPĚTÍ U_0).....	54
OBRÁZEK 4.10: PROSTŘEDÍ STATISTICKÉHO SW (PŘ. PRO MAX. GENEROVANÉ NAPĚTÍ $U_{IMP.P}$).	57
OBRÁZEK 4.11: POČET PŘESKOKŮ PŘI TLUMÍCÍCH ODPORÁCH (ZLEVA 0Ω , 100Ω , 250Ω).	60
OBRÁZEK 4.12: USEKNUTÉ IMPULZNÍ NAPĚTÍ V 1., 2. A 3. KMITU.	61
TABULKA 1.1: ROZDĚLENÍ ELEKTRICKÝCH ZAŘÍZENÍ PODLE NAPĚŤOVÝCH HLADIN.....	14
TABULKA 4.1: POČTY PŘESKOKŮ VE VRCHOLECH KMITŮ PŘI ZMĚNĚ TLAKU.	61
TABULKA 4.2: POČTY PŘESKOKŮ VE VRCHOLECH KMITŮ PŘI ZMĚNĚ TLUMÍCÍHO ODPORU.	62
GRAF 3.1: ZÁVISLOST U_{50} NA TLUMÍCÍM ODPORU (PŮVODNÍ VÝZKUM).....	48
GRAF 3.2: ZÁVISLOST U_{50} NA TLAKU PLYNNÉHO IZOLANTU (PŮVODNÍ VÝZKUM).	48
GRAF 4.1: ZÁVISLOST U_{50} NA TLUMÍCÍM ODPORU PŘI NASTAVENÉM U_0	55
GRAF 4.2: ZÁVISLOST U_{50} NA TLAKU PLYNNÉHO IZOLANTU PŘI NASTAVENÉM U_0	55
GRAF 4.3: POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ VYCHÁZEJÍCÍCH Z U_0 PŘI ZMĚNĚ TLUM. ODPORU PRO OLI A ALI.	56
GRAF 4.4: POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ VYCHÁZEJÍCÍCH Z U_0 PŘI ZMĚNĚ TLAKU PRO OLI A ALI.	56
GRAF 4.5: ZÁVISLOST U_{50} NA TLUMÍCÍM ODPORU PŘI NASTAVENÉM $U_{IMP.P}$	58
GRAF 4.6: ZÁVISLOST U_{50} NA TLAKU PLYNNÉHO IZOLANTU PŘI NASTAVENÉM $U_{IMP.P}$	58
GRAF 4.7: POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ VYCHÁZEJÍCÍCH Z $U_{IMP.P}$ PŘI ZMĚNĚ TL. ODPORU PRO OLI A ALI.	59
GRAF 4.8: POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ VYCHÁZEJÍCÍCH Z $U_{IMP.P}$ PŘI ZMĚNĚ TLAKU PRO OLI A ALI.	59
GRAF 4.9: POČET PŘESKOKŮ V 1. KMITU IMPULZU PŘI ZMĚNĚ TLAKU.	62
GRAF 4.10: POČET PŘESKOKŮ V 2. KMITU IMPULZU PŘI ZMĚNĚ TLAKU.	63
GRAF 4.11: POČET PŘESKOKŮ V 1. A 2. KMITU IMPULZU PŘI ZMĚNĚ TLAKU.	63
GRAF 4.12: POČET PŘESKOKŮ V 1. KMITU IMPULZU PŘI ZMĚNĚ TLUMÍCÍHO ODPORU.....	64
GRAF 4.13: POČET PŘESKOKŮ V 2. KMITU IMPULZU PŘI ZMĚNĚ TLUMÍCÍHO ODPORU.....	64
GRAF 4.14: POČET PŘESKOKŮ V 1. A 2. KMITU IMPULZU PŘI ZMĚNĚ TLUMÍCÍHO ODPORU.....	65

Seznam použité literatury a dalších informačních zdrojů

- [1] Norma ČSN EN 60060-1. *Technika zkoušek vysokým napětím – Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zastupitelství, 2011.
- [2] Norma ČSN EN 60060-3 OPRAVA 1. *Technika zkoušek vysokým napětím – Část 3: Definice a požadavky na zkoušky na místě*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [3] MACH, Veleslav. *Technika vysokého napětí*. 2. přepracované vydání. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, 2006. ISBN 978-80-248-1161-8.
- [4] DUNOVSKÝ, Ondřej. *Vliv parametrů napěťového impulsu na průrazné chování izolace*. Diplomová práce, ŽČU Plzeň, 2018.
- [5] HAUSCHILD, Wolfgang; LEMKE, Eberhard. *High-voltage test and measuring techniques*. Heidelberg: Springer, 2013. ISBN 978-3-642-45351-9.
- [6] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí*. 2. přepracované vydání. Praha: SNTL 1978.
- [7] Software statistical Tool.
- [8] *Vysokonapěťové zkušebnictví #3 Napěťové zkoušky*. [online]. [cit. 2019-03-10] Dostupné z: <https://docplayer.cz/8528187-Vysokonapetove-zkusebnictvi-3-napetove-zkousky.html>
- [9] BLAŽEK, Vladimír. *Zkušební zdroje vysokého napětí – MTVN*. [online]. [cit. 2019-03-25] Dostupné z: http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/OPVK_ePower/MTVN/Ucebni_text_MTVN.pdf
- [10] *Vysokonapěťové zkušebnictví*. [online]. [cit. 2019-04-02] Dostupné z: <https://www.powerwiki.cz/attach/EN1Podklady/Elektroenergetika-1-Vysokonapetove%20zkusebnictvi.pdf>
- [11] *Izolanty a dielektrika* [online]. [cit. 2019-04-15] Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/06.html>
- [12] WEN, Tao; ZHANG, Qiaogen; ZHANG, Lingli; et al. *Discussion on lightning impulse test waveform according to breakdown characteristics of SF₆ gas gaps*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, pp 2306-2313. ISSN 1070-9878, 2017.
- [13] *Izolanty*. [online]. [cit. 2019-04-26] Dostupné z: https://user.unob.cz/Leuchter/4_P%205%20%98_BAK_izolanty.pdf
- [14] Norma ČSN 330010_ed.2. *Elektrická zařízení – Rozdělení a pojmy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zastupitelství, 2014.

- [15] WEN, Tao; ZHANG, Qiaogen; ZHANG, Lingli; MA, Jiangtan; CHEN, Min; SHIMOMURA, Naoyuki a LI, Zhibing. *Research on impulse withstand test effectiveness from insulation characteristics of SF₆ gas gap with highly inhomogeneous electric field*. IEEE 1st International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE), pp 482-485, ISBN 978-1-5090-5736-8, 2017.
- [16] LI, Junhao; HU, Degui; ZHANG, Liang a CHE, Bin. *Dielectric breakdown characteristics of the rod-plane electrode system in SF₆ gas under oscillating impulse voltage*. IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), pp 308-311, ISBN 978-1-5090-2354-7, 2016.
- [17] WEN, Tao; ZHANG, Qiaogen; WU, Zhicheng; GUO, Can; CHEN, Min; ZHANG, Liang a TAN, Xiangyu. *Dielectric breakdown characteristics of the rod-plane electrode system in SF₆ gas under oscillating impulse voltage*. IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), pp 308-311, ISBN 978-1-5090-2354-7, 2016.
- [18] ZHANG, Lingli; LIU, Zehui; HAN, Xutao; LI, Junhao. *Breakdown characteristics of protrusion on HV conductor in GIS under oscillating and standard lightning impulse voltage*. IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), pp 550-553, ISBN 978-1-5090-3398-0, 2016.
- [19] LI, Junhao; ZHANG, Liang; HU, Degui; YAO, Xiu; XIONG, Jun; WANG, Sisi. *Breakdown characteristics of SF₆ in quasi-uniform field under oscillating lightning impulse voltages*. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, pp 915-922, ISBN 1558-4135, 2017.
- [20] SILVA, Alexandre; PIANTINI, Alexandre; SILVA, Daiana; SHIGIHARA, Milton. *Breakdown of 15 kV insulators under bipolar oscillating impulse voltage*. IEEE 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP), ISBN 978-1-5386-6634-0, 2018.
- [21] DIAZ, Ricardo; SEGOVIA, Adan. *A physical approach of the test voltage function for evaluation of the impulse parameters in lightning impulse voltages with superimposed oscillations and overshoots*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, pp 2738-2746, ISBN 1558-4135, 2016.
- [22] *Dry air, N₂, CO₂ and N₂/SF₆ mixtures for gas-insulated systems*. CIGRE, Working Group D1.51, ISBN 978-2-85873-432-0, 2018.
- [23] MA, S.; HU, Degui; LI, Junhao; WANG, S.; PENG, J.; CHEN, Y., ZHOU, S. *Characteristic and application of the oscillating impulse voltage on GIS in field*. IEEE 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM), pp 550-553, ISBN 978-1-5386-5788-1, 2018.

Seznam příloh

PŘÍLOHA 1: MĚŘICÍ TABULKY	1
PŘÍLOHA 2: POČTY PŘESKOKŮ PŘI JEDNOTLIVÝCH TLACÍCH.....	4

Přílohy

Příloha 1: Měřicí tabulky [zdroj vlastní]

Datum měření: 11.2.2019

tlak (okolí): 90,652 Pa
teplota(okolí): 23,5°Ctlak v měřicí nádobě: 1 bar
tlumící odpor: 0,2

počet stupňů: 2

Unabíjecí [kV]	Upeak [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	Σ
25	43,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
30	51,6	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	22
27	46,5	-	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2

Datum měření: 11.2.2019

tlak (okolí): 96,652 Pa
teplota(okolí): 23,5°Ctlak v měřicí nádobě: 1 bar
tlumící odpor: 100,2

počet stupňů: 2

Unabíjecí [kV]	Upeak [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	Σ
25	39,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
30	47,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
35	55,2	x	x	-	x	-	x	x	x	-	-	x	-	-	x	-	-	-	-	-	x	-	-	-	x	x	11
40	64,6	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
37	58,8	x	x	x	x	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5

Datum měření: 18.2.2019

tlak (okolí): 98,092 Pa
teplota(okolí): 24,5°Ctlak v měřicí nádobě: 1 bar
tlumící odpor: 250,2

počet stupňů: 2

Unabíjecí [kV]	Upeak [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	Σ
30	42,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
35	49,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
37	52,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
40	57,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
43	64,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
46	69,3	-	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	x	x	-	-	x	x	-	x	x	x	x	x	x	x	20

x - přeskok

Datum měření: 18.2.2019

tlak (okolí): 98,09 kPa
teplota(okolí): 24,5 °Ctlak v měřící nádobě: 2 bar
tlumicí odpor: 0 m

počet stupňů: 2

Unabíjecí [kV]	Upeak [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	Σ
40	69,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
45	77,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	1
48	83,2	X	X	-	-	-	X	-	-	-	X	-	X	X	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	7
50	86,5	X	X	X	X	X	X	X	-	X	X	X	-	-	X	X	-	X	X	X	-	X	X	X	X	X	20
52	88,7	X	X	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	X	X	23

Datum měření: 18.2.2019

tlak (okolí): 98,09 kPa
teplota(okolí): 24,5 °Ctlak v měřící nádobě: 2 bar
tlumicí odpor: 100 m

počet stupňů: 2

Unabíjecí [kV]	Upeak [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	Σ
45	74,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
50	79,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
55	87,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
57	90,7	X	X	-	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4
60	95,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
62	99,1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	X	16
65	102,2	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

Datum měření: 25.2.2019

tlak (okolí): 99,99 kPa
teplota(okolí): 25 °Ctlak v měřící nádobě: 2 bar
tlumicí odpor: 250 m

počet stupňů: 2

Unabíjecí [kV]	Upeak [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	Σ
55	78,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
60	85,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
65	92,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	X	-	2
67	95,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
70	100,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
75	106,1	-	-	-	-	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	19
77	105,3	-	-	X	X	X	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	22

x - přeskok

Datum měření: 25.2.2019

tlak (okolí): 99,496 Pa

tlak v měřicí nádobě: 3 bar

počet stupňů: 2

teplota(okolí): 25°C

tlumicí odpor: 0 m

Unabíjecí [kV]	Upeak [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	Σ
65	112,8	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	2
68	118,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
70	124,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	-	-	-	-	-	-	x	-	x	4
72	125,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	2
75	130,1	-	x	-	x	x	x	-	-	x	-	x	x	-	-	x	x	x	x	x	x	x	-	x	x	x	17
78	135,2	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

Datum měření: 25.2.2019

tlak (okolí): 99,496 Pa

tlak v měřicí nádobě: 3 bar

počet stupňů: 2

teplota(okolí): 25°C

tlumicí odpor: 100 m

Unabíjecí [kV]	Upeak [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	Σ
65	103,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
75	120	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
80	128,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	x	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	3
85	134,2	x	-	-	x	x	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	x	21
83	131,3	x	x	-	x	-	-	x	x	-	x	x	x	-	x	-	-	-	x	x	x	-	x	x	-	-	15

Datum měření: 25.2.2019

tlak (okolí): 99,496 Pa

tlak v měřicí nádobě: 3 bar

počet stupňů: 2

teplota(okolí): 25°C

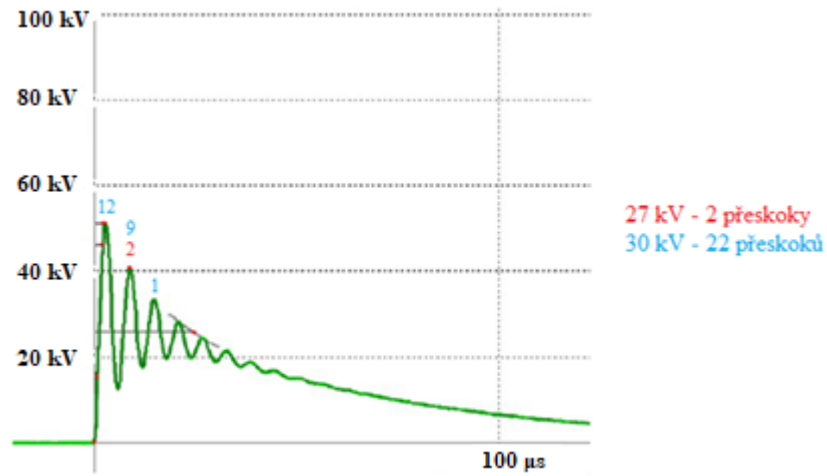
tlumicí odpor: 250 m

Unabíjecí [kV]	Upeak [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	Σ	
75	107,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	
80	114,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	
85	121,3	-	-	x	-	x	x	-	-	x	-	-	-	x	-	-	-	x	-	x	x	-	-	x	-	-	9	
87	124,4	-	x	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	x	-	x	-	5	
90	128,5	x	-	-	-	-	x	-	x	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	x	x	x	-	x	x	x	10	
93	131,3	-	-	-	x	x	-	-	x	x	-	-	x	-	-	x	x	-	-	x	x	-	-	-	x	-	10	
95	136,2	-	-	x	-	x	-	-	-	x	x	x	x	x	-	x	-	-	x	x	x	x	x	-	x	x	15	
100	138,8	-	-	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-	x	x	-	x	20

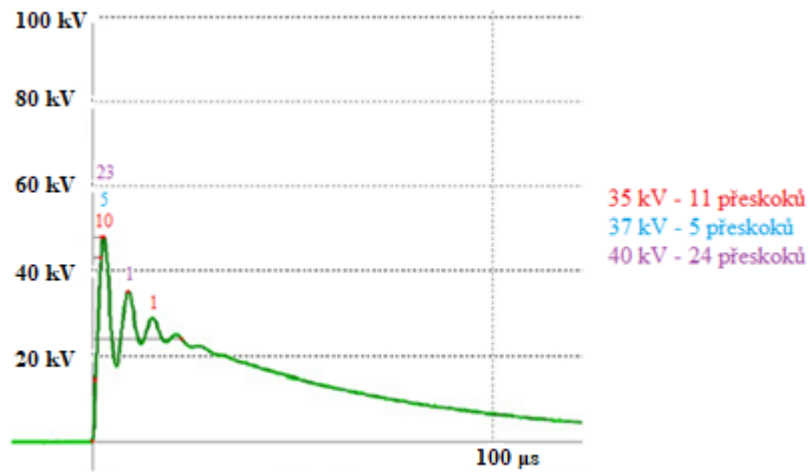
x - přeskok

Příloha 2: Počty přeskoků při jednotlivých tlacích [zdroj vlastní]

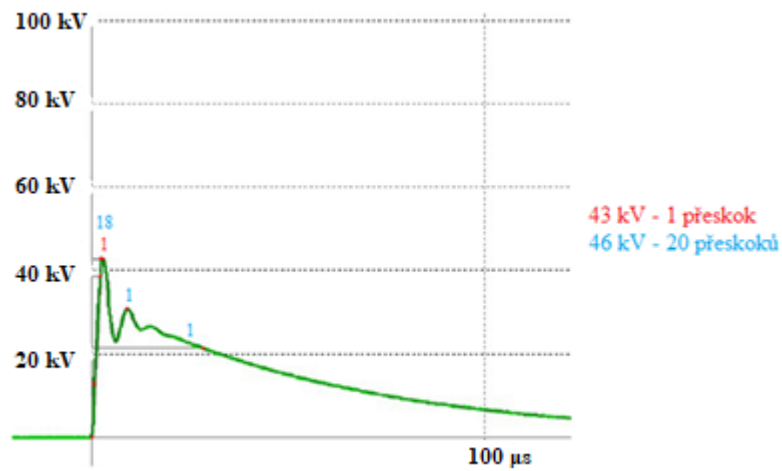
Měření pro 0,1 MPa a 0 Ω :



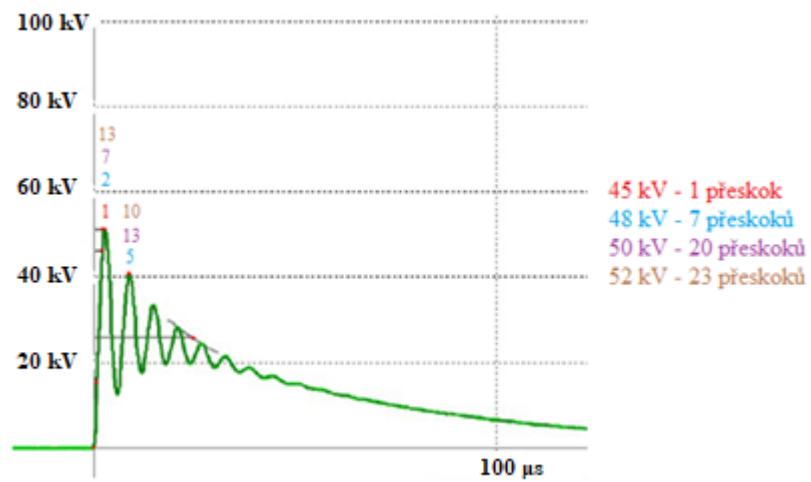
Měření pro 0,1 MPa a 100 Ω :



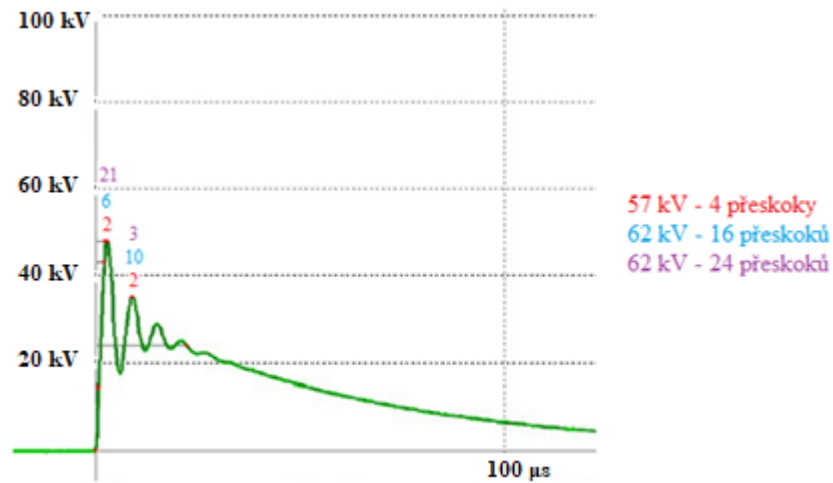
Měření pro 0,1 MPa a 250 Ω :



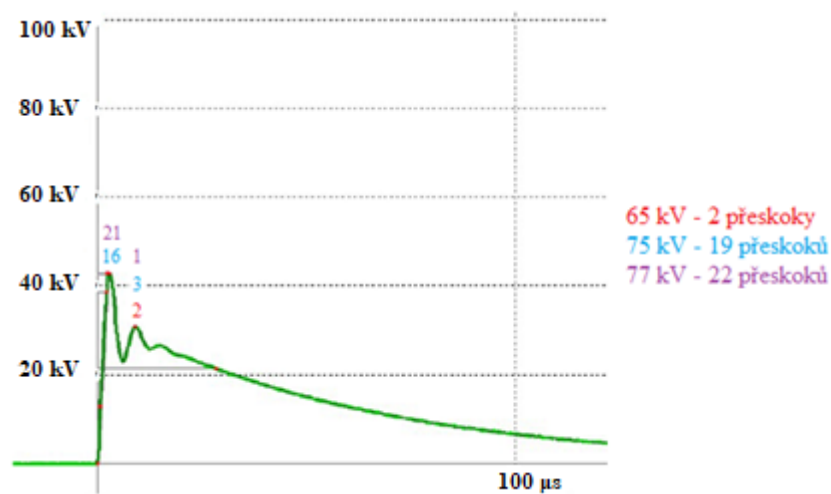
Měření pro 0,2 MPa a 0 Ω :



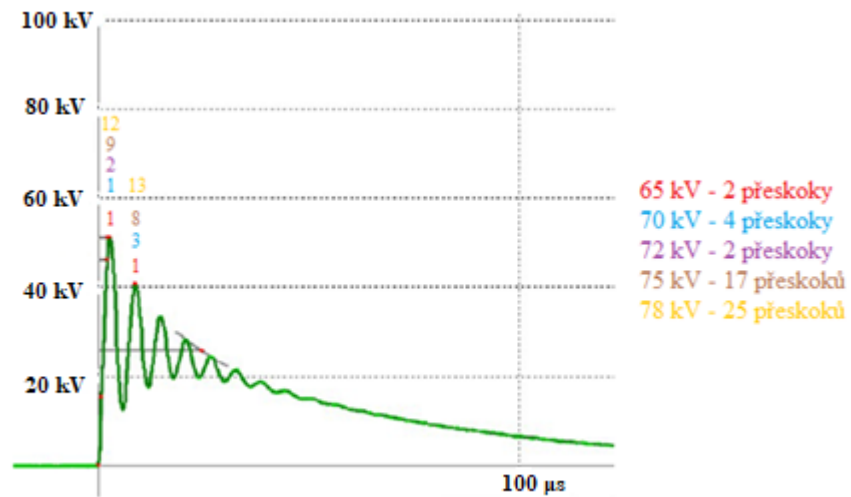
Měření pro 0,2 MPa a 100 Ω :



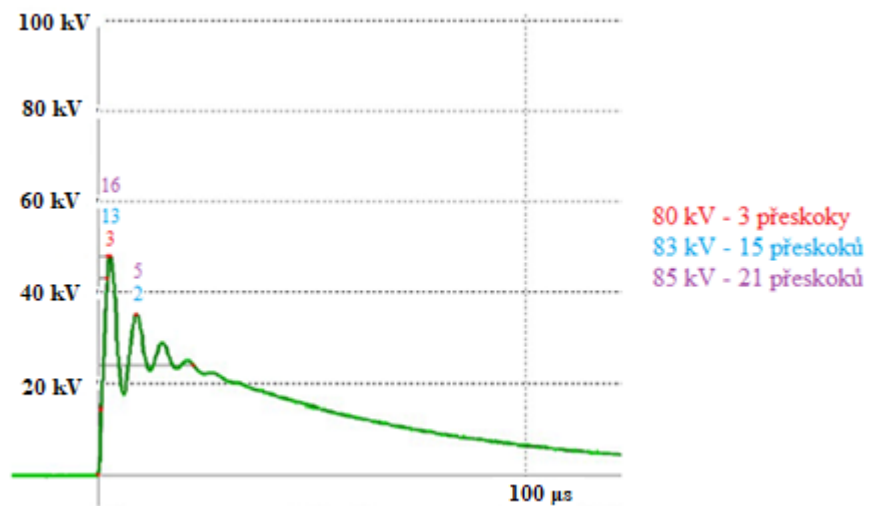
Měření pro 0,2 MPa a 250 Ω :



Měření pro 0,3 MPa a 0 Ω :



Měření pro 0,3 MPa a 100 Ω :



Měření pro 0,3 MPa a 250 Ω :

