

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Interpretace testů impulzním napětím

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

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

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej NOVOTNÝ**
Osobní číslo: **E14N0068P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Interpretace testů impulzním napětím**
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. Zabývejte se fyzikálními zákonitostmi výstavby výboje v nehomogenním poli.
2. Na základě získaných poznatků a s použitím literárních zdrojů analyzujte faktory ovlivňující průrazné chování izolačního média při impulzním namáhání.
3. Vliv vybraných faktorů ověřte a výsledky testů interpretujte.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

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


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

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**


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




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

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na reprodukovatelnost testů impulzním napětím. Zabývá se základními principy výstavby elektrického výboje v nehomogenním poli a faktory ovlivňujícími chování izolačního média při výbojové činnosti. Následně jsou v diplomové práci rozebrány statistické metody použité k vyhodnocení výbojové činnosti. Dále práce objasňuje princip výstavby napěťových impulzů pomocí rázového generátoru. Součástí práce je také experimentálně provedený výzkum zaměřující se na obtížně interpretovatelné testy impulzním napětím za použití statistických nástrojů k jejich vyhodnocení.

Klíčová slova

Impulzní napětí, atmosférický impulz, rázový generátor, prostorový náboj, ionizace, elektrická pevnost, koeficient nehomogenity, elektrické pole.

Abstract

This study is focused on the reproducibility of the test impulse voltage. It deals with the basic principles of construction of an electrical discharge in an inhomogeneous field and the factors influencing the behavior of the insulating medium during discharge activity. Subsequently, the thesis analyzed the statistical methods used to evaluate the discharge activity. The work also illustrates the principle construction of voltage impulses through the impulse voltage generator. The paper also carried an experimental research focusing on the difficult to interpret impulse voltage tests using statistical tools to evaluate them.

Key words

Impulse voltage, lightning impulse, impulse generator, space charge, ionization, electrical strength, coefficient of inhomogeneity, electric field.

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 15.5.2016

Ondřej Novotný

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce doc. Ing. Evě Mullerové, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
SEZNAM OBRÁZKŮ	12
SEZNAM GRAFŮ	13
SEZNAM TABULEK	13
ÚVOD	14
1 VZNIK ELEKTRICKÉHO VÝBOJE	16
1.1 IONIZACE.....	16
1.1.1 <i>Nárazová ionizace</i>	16
1.1.2 <i>Fotoionizace</i>	18
1.1.3 <i>Tepelná ionizace</i>	18
1.1.4 <i>Povrchová ionizace</i>	19
1.2 ELEKTRICKÁ PEVNOST.....	19
1.3 TOWNSENDŮV MECHANISMUS VZNIKU VÝBOJE V NEHOMOGENNÍM POLI.....	19
1.4 KANÁLOVÁ (STRIMÉROVÁ) TEORIE VZNIKU ELEKTRICKÉHO VÝBOJE V NEHOMOGENNÍM POLI.....	22
1.4.1 <i>Případ kladného hrotu</i>	23
1.4.2 <i>Případ záporného hrotu</i>	25
1.4.3 <i>Koróna</i>	26
2 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ CHOVÁNÍ IZOLAČNÍHO MÉDIA PŘI IMPULZNÍM NAMÁHÁNÍ	28
2.1 KOEFICIENT NEHOMOGENITY.....	28
2.2 TVAR A VELIKOST IMPULZNÍHO NAMÁHÁNÍ.....	29
2.2.1 <i>Atmosférický impulz</i>	29
2.2.2 <i>Normalizovaný atmosférický impulz</i>	30
2.2.3 <i>Plný a useknutý atmosférický impulz</i>	33
<i>Plný normalizovaný atmosférický impulz</i>	33
<i>Useknutý normalizovaný atmosférický impuls</i>	34
2.3 VLIV VZDÁLENOSTI ELEKTROD A TLAKU NA CHOVÁNÍ IZOLAČNÍHO MÉDIA.....	36
3 ZKUŠEBNÍ SYSTÉM PRO ZKOUŠKY IMPULZNÍM NAPĚTÍM	40
3.1 RÁZOVÝ GENERÁTOR.....	40
3.1.1 <i>Rázový generátor HAEFELY řady SGS</i>	44
3.2 OVLÁDACÍ SYSTÉM IMPULSNÍHO GENERÁTORU GC 223.....	45
3.3 VYSOKONAPĚŤOVÝ IMPULZNÍ ANALYZÁTOR HAEFELY ŘADY HIAS 743.....	46
4 ZKOUŠKY IMPULZNÍM NAMÁHÁNÍM	48
4.1 ZKOUŠKY POMOCÍ POSTUPU A.....	48
4.2 ZKOUŠKY POMOCÍ POSTUPU B.....	48
4.3 ZKOUŠKY POMOCÍ POSTUPU C.....	48
4.4 ZKOUŠKY POMOCÍ POSTUPU D.....	49
5 STATISTICKÉ HODNOCENÍ ZKOUŠEK IMPULZNÍM NAMÁHÁNÍM	50
5.1 TŘÍDA 1: ZKOUŠKY S VÍCE HLADINAMI.....	50
5.2 TŘÍDA 2: ZKOUŠKY METODOU NAHORU DOLŮ.....	51
5.2.1 <i>Výdržný postup namáhání</i>	51
5.2.2 <i>Výbojový postup namáhání</i>	52
5.2.3 <i>Vyhodnocení postupů namáhání</i>	52

5.3	TŘÍDA 3: ZKOUŠKY POSTUPNÝM NAMÁHÁNÍM	53
6	POUŽITÉ STATISTICKÉ METODY K VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍCH DAT	55
7	EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM INTERPRETACE ZKOUŠEK IMPULZNÍHO NAPĚTÍ	58
7.1	PRŮBĚH TESTOVÁNÍ	59
7.2	NEPROKAZATELNÉ TESTY	59
7.3	VÝZNAM TESTOVÁNÍ ANOMÁLIÍ	60
7.4	VYBRANÉ ZKOUŠKY IMPULZNÍHO NAPĚTÍ	60
7.5	STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ TESTŮ.....	63
7.5.1	<i>Testy s elektrodovým systémem R4B o vzdálenosti 40mm</i>	<i>63</i>
7.5.2	<i>Testy s elektrodovým systémem R4B o vzdálenosti 60mm</i>	<i>68</i>
7.5.3	<i>Ověření časové závislosti.....</i>	<i>73</i>
ZÁVĚR.....	75
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	77
PŘÍLOHY	79

Seznam symbolů a zkratek

ΔW_{in}	veličina charakterizující zvýšení vnitřní energie molekuly
v_{01}	rychlost narážející částice
v_2	rychlost druhé částice po srážce
m_1	hmotnost narážející částice
m_2	hmotnost druhé částice
ΔW_{inmax}	veličina charakterizující maximální zvýšení vnitřní energie molekuly
λ_E	střední volná dráha
U_i	ionizační napětí
h	Planckova konstanta
f	frekvence
W_i	kinetická energie fotonů
α	koeficient objemové ionizace
x	dráha
n_0	počet primárních elektronů
J_0	proudová hustota daná emisí elektronů z katody
γ	sekundární ionizační činitel
d	vzdálenost elektrod
η	Schwaigerův koeficient
E_{mean}	střední hodnota intenzity elektrického pole
E_{max}	hodnota maximální intenzity elektrického pole
U	hodnota napětí na elektrodách
β	velikost překmitu
β'	relativní velikost překmitu
T_1	doba čela
T_2	doba půltýlu
U_b	maximální hodnota základní křivky
U_e	maximální hodnota zaznamenané křivky
U_t	amplituda přiloženého napětí
$k(f)$	funkce zkušebního napětí.
C_s	impulsní kapacita
R_s	čelní odpor

R_p	týlní odpor
R_{ch}	nabíjecí odpor
C_{load}	nabíjecí kapacita
L_{loop}	indukčnost zkoušeného obvodu
SG	jiskřiště
C_s	celková impulzní kapacita
R'_s	čelní (sériový) odpor
n	počet stupňů rázového generátoru
R'_p	týlní (paralelní) odpor
U_0	nabíjecí napětí
τ_1, τ_2	časové konstanty
U_{10}	10% napětí průrazného výboje
U_{50}	směrodatná odchylka určena zkušební komisí
\tilde{x}_{75}	horní kvartil
s_x^2	rozptyl
\bar{x}	aritmetický průměr
$s(\bar{x})$	odhad směrodatné chyby

Seznam obrázků

<i>OBRÁZEK 1: PRINCIP NÁRAZOVÉ IONIZACE</i>	<i>18</i>
<i>OBRÁZEK 2: OBLASTI TOWNSENDOVO VÝBOJE</i>	<i>20</i>
<i>OBRÁZEK 3: ROZLOŽENÍ INTENZITY ELEKTRICKÉHO POLE SYSTÉMU Kladný hrot – záporná DESKA</i>	<i>24</i>
<i>OBRÁZEK 4: ROZLOŽENÍ INTENZITY ELEKTRICKÉHO POLE SYSTÉMU Záporný hrot – kladná DESKA</i>	<i>25</i>
<i>OBRÁZEK 5: VIDITELNÉ SPEKTRUM KORÓNY</i>	<i>27</i>
<i>OBRÁZEK 6: ROZDĚLENÍ TYPŮ POLÍ DLE STUPNĚ HOMOGENITY</i>	<i>29</i>
<i>OBRÁZEK 7: ZÁZNAM ČASOVÉHO PRŮBĚHU ZÁKLADNÍ, ZAZNAMENANÉ A ZBYTKOVÉ KŘIVKY S PŘEKMITEM</i>	<i>31</i>
<i>OBRÁZEK 8: KŘIVKA ZKUŠEBNÍHO NAPĚTÍ</i>	<i>32</i>
<i>OBRÁZEK 9 : KŘIVKA ZKUŠEBNÍHO NAPĚTÍ JAKOŽTO SOUČTU ZÁKLADNÍ A FILTROVANÉ KŘIVKY</i>	<i>33</i>
<i>OBRÁZEK 10: PLNÝ ATMOSFÉRICKÝ IMPULZ STANOVENÝ NORMOU ČSN EN 60060 – 1.....</i>	<i>34</i>
<i>OBRÁZEK 11: ATMOSFÉRICKÝ IMPULZ USEKNUTÝ V ČELE</i>	<i>35</i>
<i>OBRÁZEK 12: ATMOSFÉRICKÝ IMPULZ USEKNUTÝ V TÝLU</i>	<i>36</i>
<i>OBRÁZEK 13: EXPERIMENTÁLNĚ ZJIŠTĚNÁ (MODRÁ) A VYPOČÍTANÁ (ČERVENÁ) ZÁVISLOST PŘESKOKOVÉHO NAPĚTÍ U_p V HOMOGENNÍM POLI PRO VZDUCH</i>	<i>37</i>
<i>OBRÁZEK 14: EXPERIMENTÁLNÍ VÝSLEDKY 50% NAPĚTÍ V ZÁVISLOSTI NA VZDÁLENOSTI ELEKTROD PROVEDENÉ KURTEM FESREM</i>	<i>38</i>
<i>OBRÁZEK 15: ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ RÁZOVÉHO GENERÁTORU</i>	<i>41</i>
<i>OBRÁZEK 16: OBECNÉ SCHÉMA RÁZOVÉHO GENERÁTORU S VÍCE STUPNI</i>	<i>41</i>
<i>OBRÁZEK 17: 4 STUPŇOVÝ RÁZOVÝ GENERÁTOR HAEFELY</i>	<i>45</i>
<i>OBRÁZEK 18: BLOKOVÉ ZNÁZORNĚNÍ MODULÁRNÍHO USPOŘÁDÁNÍ MĚŘÍCÍHO ZAŘÍZENÍ HAEFELY</i>	<i>46</i>
<i>OBRÁZEK 19: VYSOKONAPĚŤOVÝ IMPULZNÍ ANALYZÁTOR HAEFELY ŘADY HIAS 743</i>	<i>47</i>

Seznam grafů

GRAF 1: POSTUP ZKOUŠKY TŘÍDY I.	50
GRAF 2: VÝDRŽNÝ POSTUP NAMÁHÁNÍ	51
GRAF 3: VÝBOJOVÝ POSTUP NAMÁHÁNÍ	52
GRAF 4: SOUVISLÉ ZVYŠOVÁNÍ NAPĚTÍ	53
GRAF 5: POSTUPNÉ ZVYŠOVÁNÍ NAPĚTÍ	54
GRAF 6: POROVNÁNÍ MĚŘENÍ Z ROKU 2014 S MĚŘENÍM Z ROKU 2016.....	62
GRAF 7: STATISTICKÉ PRAVDĚPODOBNOСТИ VZNIKU PŘESKOKU V DANÝCH AMPLITUDÁCH V JEDNOTLIVÝCH DNECH POZOROVÁNÍ.....	64
GRAF 8: KRABICOVÝ GRAF STATISTICKÉ PRAVDĚPODOBNOСТИ SESKUPENÝ PODLE $U(kV)$	64
GRAF 9: STATISTICKÉ PRAVDĚPODOBNOСТИ VZNIKU PŘESKOKU DEKOMPOVANÉ POMOCÍ TESTU ANOVA (VLIV NAPĚTÍ PŘI JEDNOTLIVÝCH DNECH MĚŘENÍ).....	66
GRAF 10: STATISTICKÉ PRAVDĚPODOBNOСТИ VZNIKU PŘESKOKU DEKOMPOVANÉ POMOCÍ TESTU ANOVA (VLIV JEDNOTLIVÝCH DNŮ MĚŘENÍ PŘI DANÝCH AMPLITUDÁCH)	67
GRAF 11: STATISTICKÉ PRAVDĚPODOBNOСТИ VZNIKU PRŮRAZU V DANÝCH AMPLITUDÁCH V JEDNOTLIVÝCH DNECH POZOROVÁNÍ.	68
Z GRAF 12: STATISTICKÉ PRAVDĚPODOBNOСТИ VZNIKU PŘESKOKU V JEDNOTLIVÝCH DNECH DEKOMPOVANÉ POMOCÍ TESTU ANOVA.....	69
GRAF 13: STATISTICKÁ PRAVDĚPODOBNOST VZNIKU PŘESKOKU NA JEDNOTLIVÝCH NAPĚŤOVÝCH HLADINÁCH.....	70
Z GRAF 14: ROZDÍLNOST PRAVDĚPODOBNOСТИ PŘESKOKU ZOBRAZENÉ POMOCÍ KRABICOVÉHO GRAFU	71
GRAF 15 STATISTICKÁ PRAVDĚPODOBNOST VZNIKU PŘESKOKU PŘI ODLIŠNOSTI PLYNOVÉ NÁPLNĚ	72
GRAF 16 STATISTICKÁ PRAVDĚPODOBNOST VZNIKU PRŮRAZU S ROZDÍLNÝM ČASOVÝM ROZESTUPEM MEZI RÁZOVÝMI VLNAMI.....	74

Seznam tabulek

TABULKA 1 : VYSVĚTLIVKY K OBECNÉMU SCHÉMATU VÍCESTUPŇOVÉHO RÁZOVÉHO GENERÁTORU	40
TABULKA 2: ČÍSELNÉ VYJÁDŘENÍ KONSTANT $K1$ A $K2$	43
TABULKA 3: PARAMETRY RÁZOVÉHO GENERÁTORU UMÍSTĚNÉHO VE ŠKOLNÍ LABORATOŘI	45
TABULKA 4: ZKOUŠKA VÍCE HLADINAMI, TEST VYKAZUJÍCÍ ANOMÁLNÍ CHOVÁNÍ.....	60
TABULKA 5: ZKOUŠKA VÍCE HLADINAMI, TEST VYKAZUJÍCÍ ANOMÁLNÍ CHOVÁNÍ.....	61
TABULKA 6: TEST (MULTI – LEVEL) ZLOMOVÉ NAPĚŤOVÉ HLADINY POUŽIT STARÝ RÁZOVÝ GENERÁTOR A NOVÉ VYHODNOCOVACÍ ZAŘÍZENÍ.....	63
TABULKA 7: STATISTICKÉ PRAVDĚPODOBNOСТИ VZNIKU PŘESKOKU DEKOMPOVANÉ POMOCÍ TESTU ANOVA	65
TABULKA 8: STATISTICKÉ PRAVDĚPODOBNOСТИ VZNIKU PŘESKOKU DEKOMPOVANÉ POMOCÍ TESTU ANOVA	70
TABULKA 9: STATISTICKÁ PRAVDĚPODOBNOST VZNIKU PŘESKOKU S ROZDÍLNOU PLYNOVOU NÁPLNÍ DEKOMPOVÁNO POMOCÍ ANOVA TESTU.....	72
TABULKA 10: STATISTICKÁ PRAVDĚPODOBNOST VZNIKU PŘESKOKU S ROZDÍLNÝM ČASOVÝM ROZESTUPEM MEZI RÁZOVÝMI VLNAMI DEKOMPOVÁNO POMOCÍ ANOVA TESTU	73

Úvod

Problematikou interpretace testů impulzním napětím je nutné se zabývat z důvodu experimentálně zjištěných nesrovnalostí při určitém seskupení testovaného objektu. Již v průběhu minulého století se touto problematikou zabývalo několik vědců, ale dosud nikdo není schopný určit přesné fyzikální pochody při průběhu zkoušek.

Tato práce je složena ze dvou částí, a sice z teoretické části a praktické části. Teoretická část se zabývá základními znalostmi z oblasti výstavby elektrického výboje v nehomogenním poli, dále jsou zde uvedeny faktory ovlivňující chování izolačního média při impulzním namáhání. V další části diplomové práce je uvedeno přístrojové vybavení vysokonapěťové laboratoře pro zkoušky impulzním napětím. Následující kapitoly pak doplňují informace o statistických metodách použitých v práci, impulzních zkouškách a jejich hodnocení. Teoretické znalosti jsou v závěru doplněné praktickým experimentem.

Teoretická část se nejprve zabývá fyzikální podstatou výstavby elektrického výboje v nehomogenním poli. Touto problematikou bylo nutné se zabývat z důvodu prováděného experimentálního měření, které probíhalo v nehomogenním poli. Tato kapitola nastiňuje základní fyzikální principy chování izolačního media při výbojové činnosti.

Dále jsou v práci rozebrány faktory ovlivňující výbojovou činnost. Zároveň jsou uvedeny stanovené předpisy pro zkoušky impulzním napětím na podkladě normy **ČSN EN 60060-1**. Touto normou jsou přesně definovány požadavky na zkušební vybavení a interpretaci výsledků.

Kapitola 3 se pak zabývá přístrojovým vybavením nutným pro konání zkoušek impulzním napětím. Pozornost je věnována principu rázového generátoru a jeho vybavení.

Kapitola 4 a 5 obsahuje zkušební postupy pro zkoušky impulzním napětím, a to v souladu s normou **ČSN EN 60060-1**. Kapitoly jsou věnovány jak přesným postupům při průběhu zkoušek, tak jejich hodnocení zkušební komisí.

Kapitola 6 uvádí použité statistické metody k vyhodnocení praktické části práce. Jsou zde vysvětleny základní statistické pojmy se zaměřením na použitou metodu k analýze

experimentálních zkoušek (metoda ANOVA), která byla stěžejní při vyhodnocení praktické části práce.

Praktická část je věnována reprodukovatelnosti zkoušek impulzním napětím. Nejprve jsou uvedeny zkoumané hypotézy, které byly v průběhu práce ověřovány. Dále je pozornost věnována průběhu testování včetně podmínek, při kterých byly zkoušky prováděny. Reprodukovatelnost testů impulzním napětím byla hodnocena na zkouškách, které vykazovaly nějaké nestandardní chování. Tyto testy byly následně detailně prozkoumány v několika dnech opakovaní měření a statisticky zpracovány pomocí metody ANOVA. Tato část obsahuje grafické a tabulkové výstupy z programu STATISTICA. Praktická část je také přílohou doplněna o záznamy prováděných testů.

1 Vznik Elektrického výboje

1.1 Ionizace

Po překročení meze velikosti napětí mezi elektrodami, které jsou umístěny v izolačním prostředí, dojde ke vzniku elektrického výboje.

Přivedená energie způsobí urychlení nabitých částic. Urychlené částice se srazí s neutrálními částicemi a následně se rozpadnou na ionty a elektrony. Dochází k ionizaci prostředí tedy ke splnění základní podmínky vedení elektrického proudu v plynu. Rozeznáváme několik druhů ionizace: nárazová ionizace, fotoionizace, tepelná ionizace a povrchová ionizace (2) (3).

1.1.1 Nárazová ionizace

Nárazová ionizace je způsobená nárazem elektronu do neutrální částice (*Obrázek 1*). Neutrální částice je tvořena stejným počtem elektronů a protonů, po nárazu dojde k odštěpení elektronu z neutrální částice. Tím se z neutrální částice stává kladně nabitá částice, v níž se nachází více protonů než elektronů. Stává se z ní kladný iont. Molekula i atom se mohou nacházet v tzv. základním stavu. V tomto stavu má nejmenší energii. K převedení molekuly ze základního stavu do vyššího je třeba dodat určitou energii W_i . Pokud tato energie bude dostatečně velká, dojde k ionizaci. V tomto případě nebude zachována celková kinetická energie obou částic, ale část energie bude přeměněna na ionizaci. Zvýší se tak vnitřní energie obou částic, které se vzájemně srazily. Zvýšení vnitřní energie molekuly lze matematicky vyjádřit pomocí zachování energie a hybnosti pro srážku dvou prvků takto (4):

$$\Delta W_{in} = m_2 \cdot v_{01} \cdot v_2 - \frac{m_1 + m_2}{m_1} \cdot \frac{m_2 \cdot v_2^2}{2} \quad (1.1)$$

Kde: ΔW_{in} – veličina charakterizující zvýšení vnitřní energie molekuly,

v_{01} – rychlost narážející částice,

v_2 – rychlost druhé částice po srážce,

m_1 – hmotnost narážející částice,

m_2 – hmotnost druhé částice.

Dále je možné nalézt maximální možný přírůstek vnitřní energie ΔW_{in} . Přírůstek vnitřní energie závisí na rychlosti, se kterou se molekula pohybuje po rázu v_2 . Funkci je tedy nutné zderivovat podle rychlosti v_2 následně výraz položit roven nule. Odtud po vyjádření rychlosti v_2 a zpětném dosazení do vztahu (1.1) získáme (4):

$$\Delta W_{inmax} = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \cdot \frac{m_1 \cdot v_{01}^2}{2} \quad (1.2)$$

Kde: ΔW_{inmax} – veličina charakterizující maximální zvýšení vnitřní energie molekuly,

v_{01} – rychlost narážející částice,

v_2 – rychlost druhé částice po srážce,

m_1 – hmotnost narážející částice,

m_2 – hmotnost druhé částice.

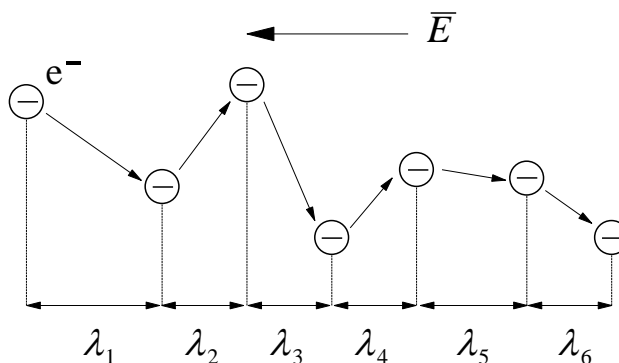
V případě předpokladu, že dopadající částice bude o hodně lehčí, než ta částice, se kterou dojde ke srážce ($\frac{m_1}{m_2} \ll 1$), pak část vztahu (1.2) lze zjednodušit $\frac{m_1 \cdot v_{01}^2}{2} \sim 1$. V tu chvíli elektron představující lehkou částici předá téměř celou svou energii molekule představující těžkou částici. Tyto vztahy jsou definovány pro zvýšení vnitřní energie molekuly. V případě ionizace by byly vztahy složitější o vznik třetího prvku. Možnost spotřebování veškeré energie elektronu při ionizaci je dle tohoto vztahu platný (4).

Energie získaná mezi kolizemi elektronů s ostatními částicemi musí být vyšší než ionizační napětí U_i . Lze uplatnit následující matematický zápis (2) (5):

$$E \lambda_E < U_i \quad (1.3)$$

Kde: λ_E – střední volná dráha,

U_i – ionizační napětí.



Obrázek 1: Princip nárazové ionizace převzato z (5)

1.1.2 Fotoionizace

Při výbojích v plynech se jedná o sekundární proces. Vybuzený atom plynu vyzáří energii ve formě fotonů. Foton následně může ionizovat jiný atom. Energie vzniká působením záření, tu pohltí částice ať již atom nebo molekula, v níž dojde k překročení hranice energie odpovídající ionizačnímu napětí a tedy k excitaci volných nosičů náboje (6) (5) (2).

Podmínka fotoionizace:

$$h \cdot f \geq W_i \quad (1.4)$$

Kde: h - je Planckova konstanta $6,625 \cdot 10^{-34} Js$,

f - je frekvence $f = \frac{c}{\lambda}$ (c = rychlost světla, λ = vlnová délka),

W_i - kinetická energie fotonů.

1.1.3 Tepelná ionizace

Elektrický proud vede pouze ionizovaný plyn. Vysoká teplota řádově 10 000 K uděluje částicím (atomy a molekuly) velmi vysokou kinetickou rychlost, tím opět dochází k uvolňování volných nosičů náboje tedy ionizaci. Při hoření oblouku přebírá tepelná ionizace hlavní úlohu zisku volných nosičů náboje (6) (5) (2).

1.1.4 Povrchová ionizace

Povrchová ionizace je způsobená excitací elektronů z elektrody vlivem záření nebo teplotním nárůstem. Teplotní nárůst nebo záření o malé vlnové délce ostřelující povrch elektrody za působení vnějšího elektrického pole způsobí vznik dostatečné energie k vyražení volných nosičů náboje z elektrody (6) (5) (2).

1.2 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost je veličina, která charakterizuje schopnost izolantu oddělit prostory o různém elektrickém potenciálu. Po překročení kritické meze této veličině dochází k velmi rychlému nárůstu volných nosičů náboje. Skrz izolant začne protékat proud, který postupně narůstá až do té doby, než vznikne v izolantu dokonale vodivý kanál. Podle druhu izolantu respektive jeho skupenství se rozlišují dva základní pojmy v elektrické pevnosti:

- průraz
- a přeskok.

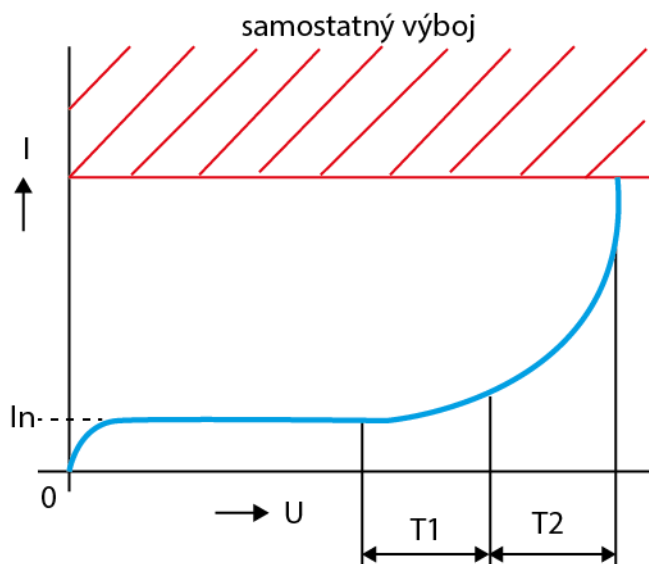
O *přeskoku* lze hovořit v případě plyných nebo kapalných izolantech. Při přeskoku dochází mezi elektrodami ke snížení napětí a nárůstu proudu, které je ovšem dočasného charakteru. Po uhasnutí oblouku dojde vlivem samoregeneračních schopností těchto typů izolantů k obnovení elektrické pevnosti. Vlivem hoření oblouku ovšem dochází k určité degradaci izolačního media.

Naopak *průraz*, který vzniká u pevného skupenství izolantu, je trvalého charakteru a pokud k němu dojde, je tokový izolant nevratně poškozen.

Hodnota elektrické pevnosti závisí i na rozložení elektrického pole. To je dáno tvarem elektrod a použitými materiály (6).

1.3 Townsendův mechanismus vzniku výboje v nehomogenním poli

Townsendovy výboje lze rozdělit na dvě oblasti (T_1 , T_2). T_1 , kde se zvyšováním napětí proud pomalu vzrůstá, a volné elektrony v plynu získávají dostatek energie, aby mohly nárazově ionizovat a T_2 , kde proud vzrůstá rychleji a to vzhledem ke kladným iontům bombardujícím katodu, které vyrazí další elektrony. Oblasti znázorňuje *Obrázek 2*. Výboj přechází z nesamostatného (to je takový výboj, který potřebuje ke svému působení vnější ionizační činidlo) k samostatnému. Samostatný výboj je pak považován za přeskok či průraz (6) (5).



Obrázek 2: Oblasti Townsendovo výboje (4)

Pokud dojde ke splnění podmínek pro vznik ionizace, je spuštěn lavinový proces. V průběhu lavinového procesu dochází ke vzniku nových elektronů na dráze mezi elektrodami. Počet nově vzniklých elektronů je dán vztahem (6):

$$d_n = \alpha n(x) dx \quad (1.5)$$

Kde: α – koeficient objemové ionizace (Townsendův první ionizační činitel),
 n – počet nových elektronů,
 x – dráha.

Koeficient objemové ionizace α lze definovat jako počet dvojic nosičů náboje vytvořených elektronem na dané dráze ve směru elektrického pole. Pro n_0 hlavních počátečních elektronů je vytvořena lavina o $n(x)$ elektronech. V případě nehomogenního pole je počet nově vzniklých elektronů dán vztahem (6):

$$n(x) = n_0 e^{\int_0^x \alpha dx} \quad (1.6)$$

Kde: α – koeficient objemové ionizace (Townsendův první ionizační činitel),
 n_0 – počet primárních elektronů,
 x – dráha.

Proudová hustota na anodě v nehomogenním poli je pak dána (4):

$$J_a = J_0 \cdot e^{\int_0^x \alpha dx} \quad (1.7)$$

Kde: J_0 – proudová hustota daná emisí elektronů z katody,

α - koeficient objemové ionizace (Townsendův první ionizační činitel),

x - dráha.

Při průchodu elektronů jsou za nimi zanechány kladné ionty dopadající na katodu. Vztah (1.7) je platný pouze pro malý proud tedy oblast T1 znázorňující *Obrázek 2*. Deformace elektrického pole pomocí prostorového náboje kladných iontů je malá.

Ve chvíli, kdy elektrony dorazí k anodě, samostatný lavinový proces je považován za skončený. Pro vznik přeskočků je zapotřebí konstantní dodávky elektronů. Toho je docíleno několika sekundárními zákonitostmi. Townsendův předpoklad nárůstu proudu v oblasti T2 znázorňující *Obrázek 2* pomocí povrchové ionizace a nárazovou ionizací kladnými ionty se ukázal jako chybný. Ionizace kladnými ionty je zanedbatelná. Probíhají zde i další procesy emitující elektrony (fotoionizace, tepelná ionizace).

Vybuzené částice mohou v lavinách způsobit fotoionizaci, současně vysoká teplota v plazmě kanálu způsobuje tepelnou ionizaci. Elektrony vzniklé těmito sekundárními procesy jsou definovány pomocí sekundárního ionizačního koeficientu γ , který byl zjištěn experimentálně. Proudovou hustotu na anodě lze po zahrnutí koeficientu γ matematicky vyjádřit v případě nehomogenního pole takto (4):

$$J_a = \frac{J_0 \cdot e^{\int_0^x \alpha dx}}{1 - \gamma(e^{\int_0^x \alpha dx} - 1)} \quad (1.8)$$

Kde: J_0 – proudová hustota daná emisí elektronů z katody,

α - koeficient objemové ionizace (Townsendův první ionizační činitel),

x - dráha,

γ - sekundární ionizační činitel (Townsendův druhý ionizační činitel).

Ze vztahu (1.8) je vidět, že výboj ještě stále v případě $J_0 = 0$ zanikne a není tedy samostatný. Při určité velikosti elektrického pole nastane přechod od nesamostatného výboje na samostatný.

Konečnou podmínku pro vznik přeskočků v nehomogenním poli mezi elektrodami podle Townseda lze formulovat takto (6):

$$\gamma \left[\exp \left(\int_0^d \bar{\alpha} dx \right) - 1 \right] = 1 \quad (1.9)$$

Kde: α - ionizační koeficient elektronů (Townsendův první ionizační činitel),

γ - sekundární ionizační činitel (Townsendův druhý ionizační činitel),

d - vzdálenost elektrod.

Pro vznik přeskočku musí být počet elektronů vytvořených sekundárními procesy větší než počet prvotních elektronů. Od tohoto okamžiku, kdy je splněna podmínka dle vztahu (1.9), přestává platit vztah (1.8) a vzniká samostatný výboj (6).

Townsendova teorie se ovšem za určitých podmínek dostávala do rozporů s provedenými experimenty. V průběhu experimentů v homogenním elektrickém poli, kdy elektrody od sebe byly vzdáleny více než řádově 10^{-2} m, docházelo ke vzniku přeskočku podle experimentálních výsledků mezi 10^{-6} až 10^{-7} sekund, rychlost tvorby výboje je pak $10^5 m \cdot s^{-1}$. Tento fakt vedl k fyzikálním rozporům Townsendovy teorie, podle níž vzhledem ke skutečnosti, že ionty jsou schopné pohybovat se rychlostí $10^3 (m \cdot s^{-1})$, nemůže takto rychle dojít k výstavbě výboje. Townsendův mechanismus byl proto doplněn o kanálovou neboli streamerovou teorii (6).

1.4 Kanálová (strimérová) teorie vzniku elektrického výboje v nehomogenním poli

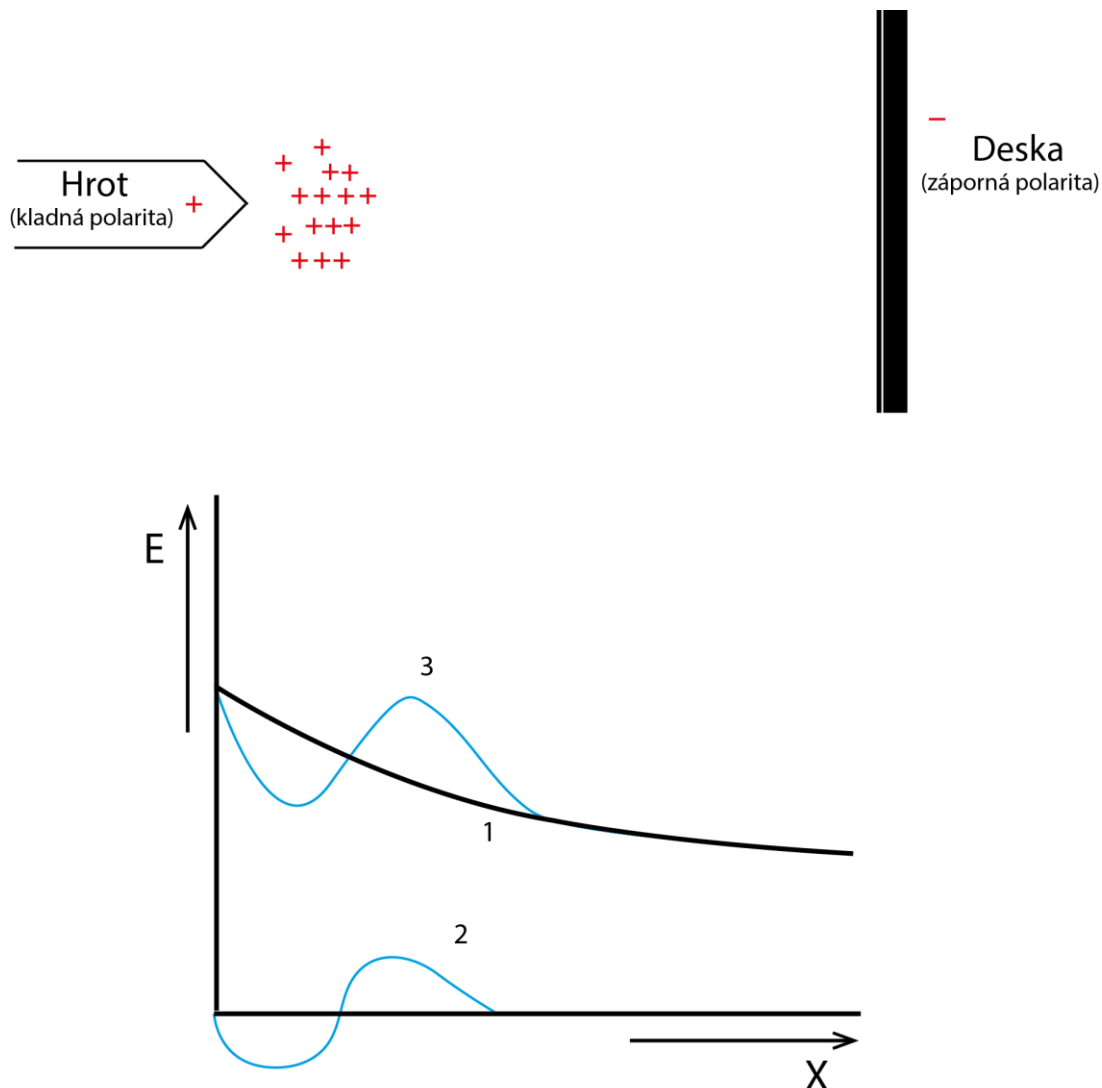
Vznik výbojů, které nelze objasnit pomocí Townsendova mechanismu, lze vysvětlit pomocí kanálové teorie. Zde jsou zahrnuty prostorové náboje vzniklé lavinami a fotoionizačními procesy. Kanálová teorie je založena na principu vzniku elektronové laviny, která po vytvoření dostatečného prostorového náboje přechází v kanálový výboj, který se dále šíří velkou rychlostí k oběma elektrodám. Náboj v čele laviny narůstá dle $e^{\alpha x}$ kde, x je vzdálenost od katody k místu výskytu prvního elektronu. Elektronová lavina je tvořena rychlými elektrony a pomalými ionty nabývá tedy kapkovitého charakteru. V čele jsou elektrony následované ionty, tímto dochází k poklesu elektrické intenzity uvnitř laviny. Naopak mimo hlavní lavinu je intenzita pole větší. Vlivem fotoionizace dochází k dalšímu uvolnění elektronů mimo hlavní lavinu, kde je v tu chvíli větší intenzita pole a dochází k vytvoření nových samostatných lavin, které vlivem větší intenzity nabývají

mnohem rychleji svou velikost. Prostor mezi jednotlivými lavinami je vyplněn elektrony z první vlny a ionty z druhé vlny. Takto je překlenut celý prostor mezi anodou a katodou a vznikne vodivý kanál skrz celý prostor. Ve chvíli, kdy dojde k nahromadění dostatečného prostorového náboje v čele hlavní laviny, vyrazí ve směru elektrického pole kanál, který se šíří zhruba $10\times$ rychleji než samotná lavina. Takto vzniklý kanál je nazýván strimérem a šíří se rychlostí (10^8 až 10^9 cm/s). Pokud lavina přejde ve strimér není již za potřebí vnějšího ionizačního činidla. Zároveň je vznik striméru podmínkou pro samostatný výboj.

Jako příklad lze uvést výboj mezi hrotem a deskou. V tomto seskupení dojde při daném tedy počátečním napětí v bezprostřední blízkosti hrotu, kde je největší intenzita elektrického pole, ke vzniku výboje. Výbojové laviny zde zanechávají kladné ionty. Tyto ionty vytvářejí zónu kladného prostorového náboje v bezprostřední blízkosti hrotu. V závislosti na polaritě hrotu má systém tendenci chovat se odlišně (7).

1.4.1 Případ kladného hrotu

V případě, kdy má hrot kladnou polaritu, působí kladný prostorový náboj jako pomyslné prodloužení hrotu. Před tímto prostorovým nábojem ve směru katody vznikne pásmo značně zvýšené intenzity elektrického pole. Podmínky pro lavinové pochody jsou příznivé a při dalším navýšení napětí vedou k přechodu ve striméry (7).



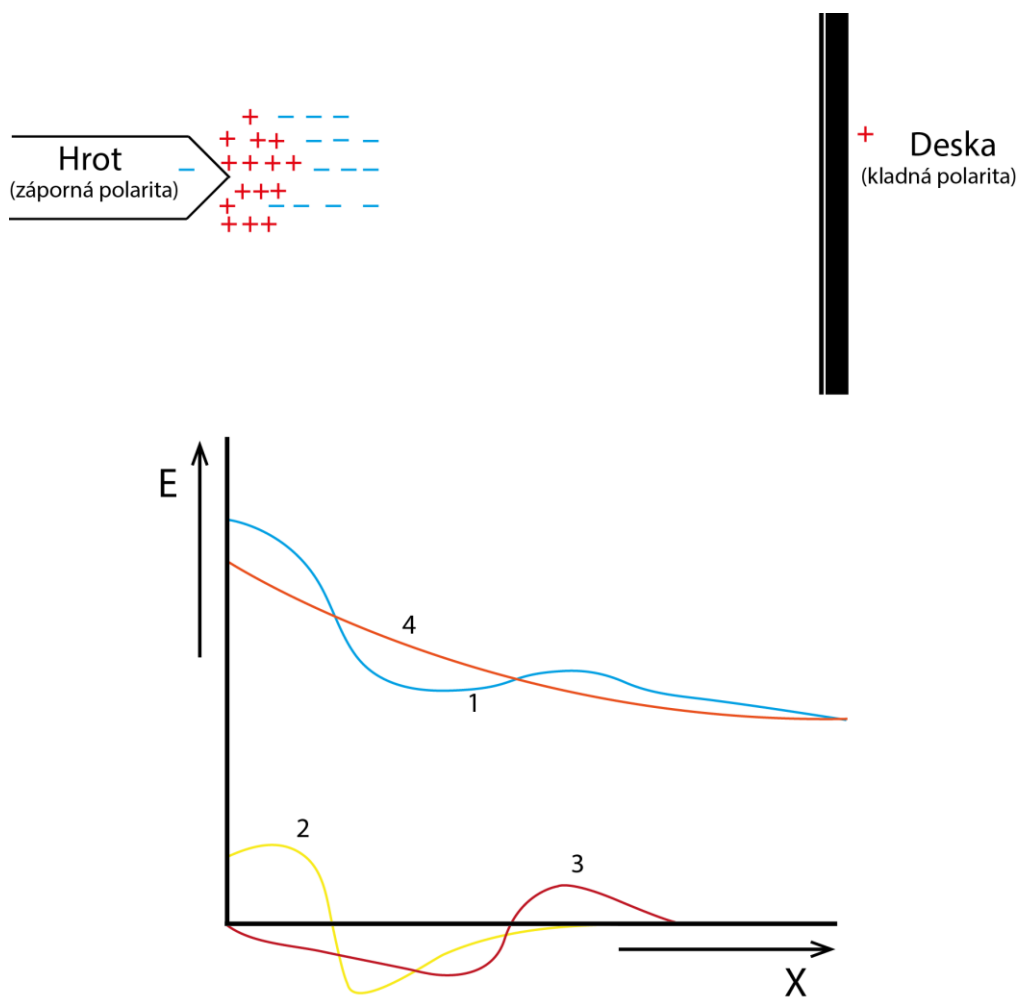
Obrázek 3: Rozložení intenzity elektrického pole systému kladný hrot – záporná deska (7)

Obrázek 3 schematicky zobrazuje tento případ. V blízkosti hrotu vlivem přivedeného napětí vznikne taková intenzita pole, která je dostatečná k vytvoření nárazové ionizace. Po vzniku volných nosičů náboje dojde k vytvoření několika lavin elektronů, které se rychle pohybují směrem k hrotu. V prostoru mezi hrotem a deskou vlivem excitace elektronů vzniknou kladné ionty. Ty jsou těžké, a proto se pohybují velmi pomalu směrem k desce. Tím dojde v blízkosti hrotu ke vzniku kladného objemového náboje. Obrázek 3 znázorňuje rozložení intenzity elektrického pole mezi elektrodami (1 způsobené vnějším zdrojem, 2 objemovým nábojem, 3 výsledné rozložení intenzity elektrického pole). V okolí hrotu objemový náboj zmenšuje intenzitu elektrického pole, ale naopak zvyšuje intenzitu ve zbytku prostoru mezi elektrodami. Pokud dojde ke snížení intenzity elektrického pole v okolí hrotu, výboj má tendenci uhasínat. Ve chvíli, kdy se kladné ionty vzdálí od hrotu směrem k desce, je možný znovu zápal výboje. V uspořádání kladný hrot záporná deska je

charakter korónového výboje pulzní (2).

1.4.2 Příklad záporného hrotu

Má-li hrot zápornou polaritu, dochází k efektu, při kterém kladný prostorový náboj zmenší intenzitu elektrického pole v oblasti hrotu. Podmínky pro vznik lavin jsou v této oblasti zhoršeny a výboj má tendenci uhasínat. Ve chvíli, kdy dojde v oblasti hrotu k rozptýlení prostorového náboje, může výboj znovu zapálit. K vývoji strimérů může docházet při značně vyšším napětí, než je napětí počáteční (7).



Obrázek 4: Rozložení intenzity elektrického pole systému záporný hrot – kladná deska (7)

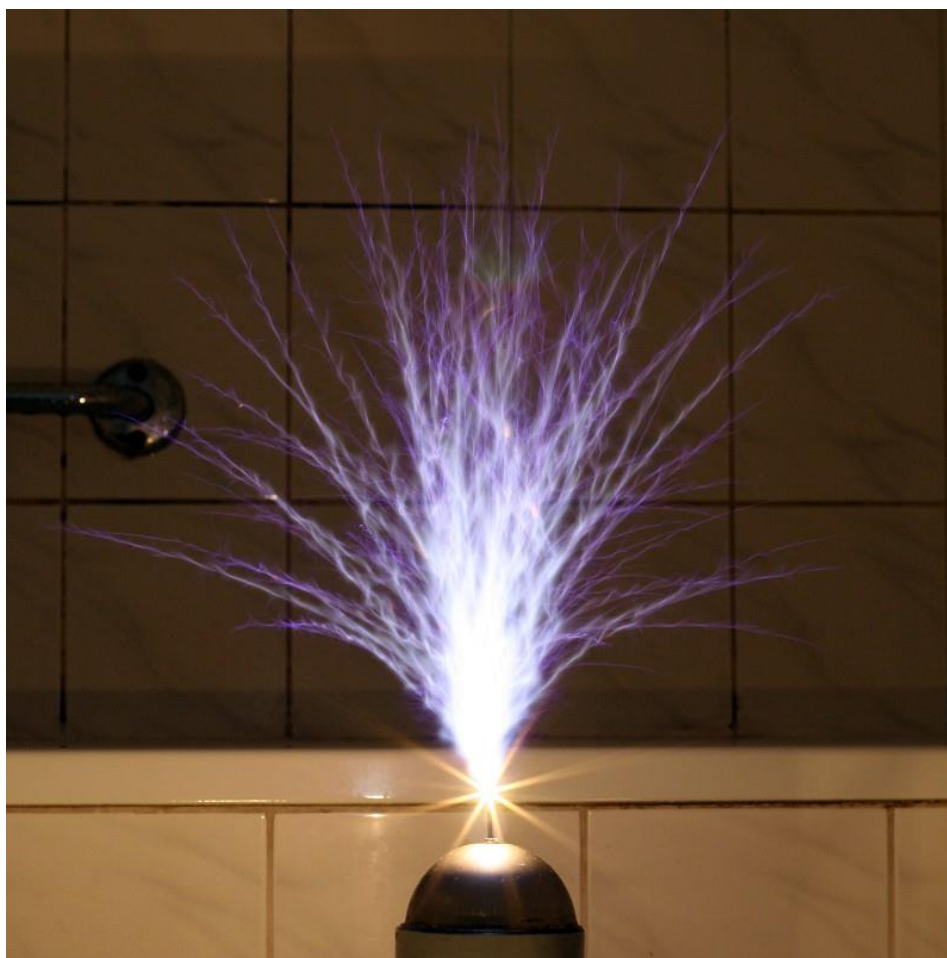
Detailně zobrazuje situaci v případě záporného hrotu a kladné desky Obrázek 4. Až do chvíle startu ionizace se rozložení intenzity elektrického pole neliší od předchozího seskupení. V oblasti hrotu vznikají laviny elektronů, ty se díky své malé hmotnosti a velké intenzitě pole rychle přesunují směrem ke kladně nabitě desce. Atomy ochuzené o elektrony se stávají kladnými ionty, ty spolu tvoří kladný prostorový náboj. Kladné ionty

jsou výrazně těžší než samotné elektrony a díky tomu se pohybují velice pomalu směrem ke kladně nabitému hrotu. Rychlé elektrony postupem, jak se dostávají směrem od oblasti s velkou intenzitou pole, ztrácejí svou rychlost a jsou absorbovány neutrálními částicemi. Ve chvíli, kdy v neutrální částici dojde k narušení rovnováhy počtu protonů a elektronů, vznikne záporný iont vzhledem k tomu, že je větší počet elektronů než protonů. Tyto nově vzniklé záporné ionty vytvoří další prostorový náboj, který je záporného charakteru. Tento záporný prostorový náboj se nachází blíže směrem k desce. Výchozí objemový náboj je tedy složitější než v případě kladného hrotu a záporné desky. Intenzita v blízkosti hrotu je značně navýšena díky vzniku kladného prostorového náboje. Vlivem velkého počtu volných nosičů náboje dochází k vytvoření koróny, ale díky zápornému prostorovému náboji jsou korónové výboje utlumeny. Až za určitý časový úsek, kdy se záporný prostorový náboj dostatečně vzdálí od hrotu, jsou obnoveny podmínky ionizace. Z toho vyplývá, že i v uspořádání záporného hrotu a kladné desky má korónový výboj pulzní charakter. *Obrázek 4* dále znázorňuje snižující intenzitu pole směrem k desce vlivem prostorového náboje. Oproti seskupení elektrod s kladně nabitým hrotem a záporně nabitou deskou je přeskokové napětí vyšší díky nižší intenzitě pole směrem k desce (7).

1.4.3 Koróna

Koróna je jev, který vzniká u elektrod, z nichž je alespoň jedna zakřivená, tedy v místech s nehomogenním rozložením pole. A to díky tomu, že podmínky pro vznik výboje v nehomogenním poli nejsou na celé vzdálenosti elektrod stejné. Jedná se o samostatný neúplný výboj. V případě dosažení tzv. zapalovacího napětí koróny dojde k obalení elektrody svítící vrstvou. Část korónového výboje je viditelná, zatímco druhá část se nalézá ve spektru ultrafialového záření, není ji možné vidět lidským okem. Příklad korónového výboje ukazuje *Obrázek 5*.

Velký vliv na definování začátku vzniku koróny mají samotné elektrody, respektive záleží na dokonalosti jejich provedení. Nerovnosti na elektrodách se stávají místy se vznikem malých nestabilních výbojů. Průchozí proudy jsou však velmi malé a pulzního charakteru. Určit za takových podmínek počáteční napětí koróny je značně problematické. Měřit počáteční napětí koróny má smysl pouze u naprosto hladkých a neznečištěných elektrod. V tu chvíli se za počáteční napětí stanoví takové napětí, při kterém proud ve výboji dosáhne měřitelné hodnoty. Samotnou korónu je možné v technické praxi využít například pro odlučování tuhých a kapalných částic ze vzduchu (8) (2).



Obrázek 5: Viditelné spektrum koróny (9)

2 Faktory ovlivňující chování izolačního média při impulzním namáhání

2.1 Koeficient nehomogenity

Koeficient nehomogenity jinak označovaný jako Schwaigerův koeficient η je velice důležitý faktor, určující o jak silně nehomogenní pole se jedná. Mezi dvěma elektrodami nabývá koeficient nehomogenity hodnot 0 až 1. Přitom pokud hovoříme o ideálně homogenním poli $\eta = 1$. Fyzikálně je koeficient nehomogenity ovlivněn rozložením elektrického pole v dielektriku (3). Za homogenní pole lze považovat takové pole, jehož elektrická intenzita má v každém bodě stejný směr a velikost (10). Schwaigerův koeficient lze matematicky popsat (3):

$$\eta = \frac{E_{mean}}{E_{max}} = \frac{U}{d} \cdot \frac{1}{E_{max}} \quad (2.1)$$

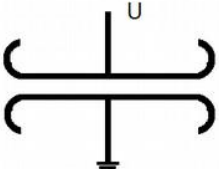
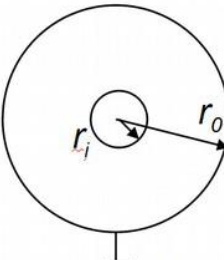
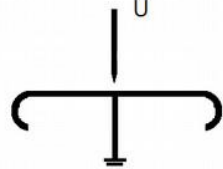
Kde: E_{mean} - střední hodnota intenzity elektrického pole (V/m),

E_{max} - hodnota maximální intenzity elektrického pole (V/m),

U – hodnota napětí na elektrodách (V),

d – vzdálenost mezi elektrodami (m).

Typ pole výrazně ovlivňuje, jak velikost přeskokového napětí mezi elektrodami, tak typ vzniklých výbojů. V praktické části této práce je možné změnu homogenity pole simulovat použitím různých tvarů elektrod. Od přechodu z čistě homogenního pole $\eta = 1$, k silně nehomogennímu $\eta \ll 0,01$, kde se objevují rozvinuté korónové výboje. O slabě nehomogenním poli lze mluvit v případě, že napětí, při kterém dojde k rozvinutí částečného výboje, se rovná průraznému napětí. Schwaigerův koeficient je v tomto případě $\eta \leq 0,25$. Od okamžiku, kdy částečné výboje vznikají již při nižším napětí než je průrazné, označuje se pole za velmi nehomogenní. *Obrázek 6* ukazuje rozdělení polí dle koeficientu nehomogenity (6).

typ pole	homogenní	slabě nehomogenní	silně nehomogenní
uspořádání elektrod			
	rovnoběžné deskové elektrody	soustředné válce $r_i = 0,25 \cdot r_o$	hrot, desková elektroda
η	1	$\leq 0,25$	$\ll 0,01$

Obrázek 6: Rozdělení typů polí dle stupně homogenity převzato z (2)

2.2 Tvar a velikost impulzního namáhání

Chování izolačního média je závislé na tvaru a velikosti impulzního namáhání. Praktická část diplomové práce probíhala pomocí normou definovaných pravidel pro atmosférický impulz, detailně zpracované normativní předpisy jsou uvedeny v této kapitole.

2.2.1 Atmosférický impulz

Atmosférický impulz je elektrický výboj vznikající volně v přírodě. Nejčastěji je vyvolán nahromaděním náboje a následnou polarizací v daném místě. Samotný elektrický výboj je pak často viditelný ve formě blesku a může vzniknout mezi mrakem a zemí, mezi dvěma mraky, nebo v rámci jednoho mraku. Vysokonapětové zkušebnictví se zajímá nejvíce o případ výboje mezi mrakem a zemí. Nejčastěji dochází k výskytu uspořádání záporný mrak a zem, kde těžké části ledu ve spodní části mraku představují záporný náboj a zem je polarizována kladně. Mrak v tu chvíli představuje zápornou elektrodu a zem kladnou. Rozložení pole mezi elektrodami je silně nehomogenní. Ve chvíli dosažení mezní hodnoty intenzity elektrického pole, řádově se tato hodnota blíží stovkám kV/m, dojde ke vzniku atmosférického impulzu. Amplituda napětí nabývá hodnot v řádu 1000 kV při průchodu proudu až 100 kA (2).

Vysokonapětové zkušebnictví se v oblasti zkoušek impulzním napětím zabývá zkouškami na dimenzování pomocí tzv. normalizovaného atmosférického impulzu. Elektrické zařízení je v praxi vystaveno impulzům buďto vlivem atmosférického nebo

spínacího přepětí.

2.2.2 Normalizovaný atmosférický impulz

Normalizovaný atmosférický impulz je dle normy definován jako atmosférické impulzní napětí. Je definovaný tak, aby zkoušky jím prováděné co nejvíce napodobovaly namáhání atmosférickým impulzem. Časový průběh impulzního napětí je složen z doby nárůstu napětí do amplitudy (čela) a doby, kdy napětí klesne z amplitudy na nulu (týlu). Atmosférické impulzní napětí lze rozdělit na dva druhy (11):

- Plný napěťový impulz
- Useknutý napěťový impulz

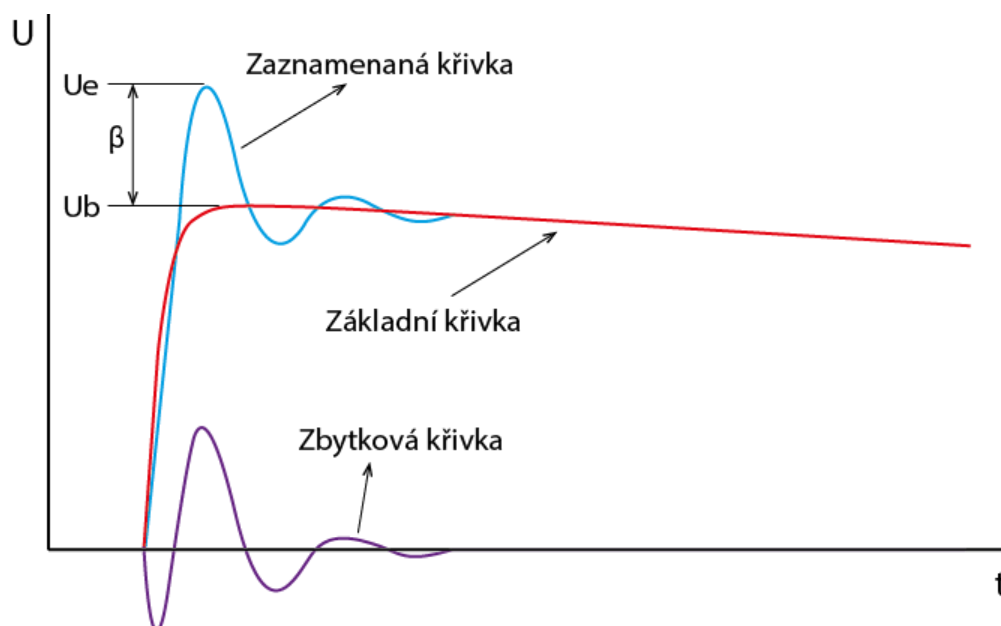
Normou stanovený atmosférický impulz je velice těžké naprosto přesně vygenerovat. Technická konstrukce rázového generátoru a vlastnosti obvodu zapojení zavádí do generování impulzu zkreslení průběhu impulzní vlny. Odchylka, která zkreslí velikost požadované amplitudy, se nazývá překmit. Překmit je způsoben indukčností obvodu v rozmezí 0,1 – 2 MHz, v mnoha případech nelze prakticky odstranit z důvodu charakteru zkoušených obvodů (obvody s velkou indukčností, rozměrné obvody). Překmit je charakterizován dvěma parametry (11):

- Velikost překmitu β (V)
- Relativní velikost překmitu β' (%)

Velikost překmitu lze určit pomocí rozdílu krajních amplitud napětí.

Dle normy (11) jsou pro stanovený normalizovaný impulz dány mezní odchylky tvaru rázové vlny:

- Doba čela T_1 : ± 30 %
- Doba půltýlu T_2 : ± 30 %
- Relativní velikost překmitu $\beta' \leq 10$ %



Obrázek 7: Záznam časového průběhu základní, zaznamenané a zbytkové křivky s překmitem (11)

Velikost překmitu znázorňuje Obrázek 7. Matematicky je pak dán:

$$\beta = U_e - U_b \quad (2.2)$$

Kde: β - velikost překmitu (V),

U_b - maximální hodnota základní křivky (V),

U_e - maximální hodnota zaznamenané křivky (V).

Relativní velikost překmitu je pak dána vztahem:

$$\beta' = \frac{U_e - U_b}{U_e} \cdot 100 \quad (2.3)$$

Kde: β' - relativní velikost překmitu (%),

U_b - maximální hodnota základní křivky (V),

U_e - maximální hodnota zaznamenané křivky (V).

Pro některé druhy zkoušeného zařízení nemusí být možné realizovat přesně rázový impulz dle normovaných požadavků, pak je normou umožněno upravit atmosférický impulz způsobem, kdy dojde k prodloužení čela vlny T_1 nebo ke zvětšení překmitu β . Hodnota napětí, která je přiložena na zkoušený objekt s překmitem β , je U_t . Graficky je

pak časový průběh znázorněn na *Obrázek 8*.



Obrázek 8: Křivka zkušebního napětí (11)

Amplitudu přiloženého napětí lze matematicky vyjádřit:

$$U_t = U_b + k(f) \cdot (U_e - U_b) \quad (2.4)$$

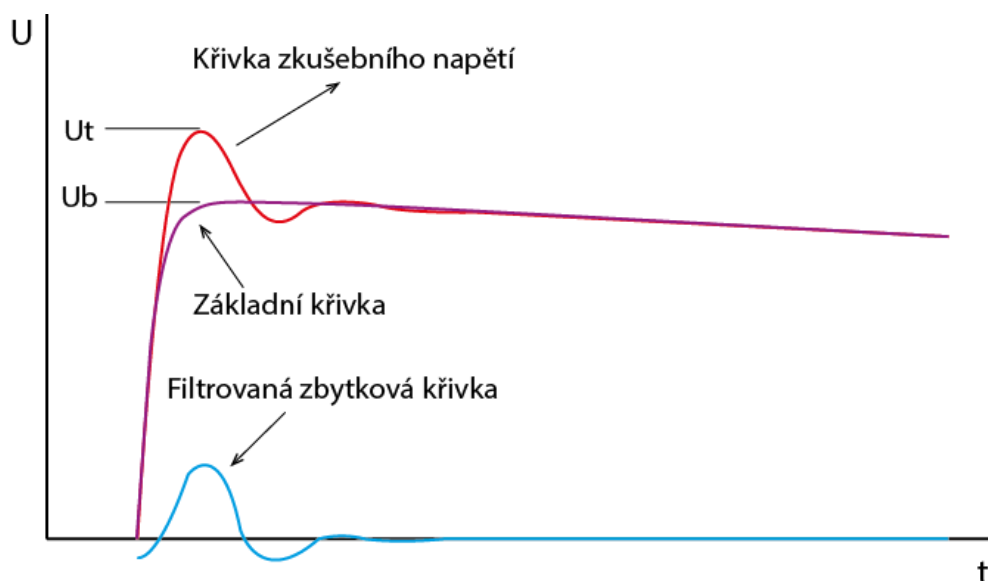
Kde: U_t - Amplituda přiloženého napětí (V),

U_b - maximální hodnota základní křivky (V),

U_e - maximální hodnota zaznamenané křivky (V),

$k(f)$ - funkce zkušebního napětí.

Funkce $k(f)$ představuje interpretaci odezvy impulzů na izolaci s překmitem. Lze ji využít k výpočtu hodnoty zkušebního napětí U_t . Funkci $k(f)$ lze uplatnit jako filtr na zbytkovou křivku napětí, pak součet základní a filtrované křivky představuje výslednou křivku zkušebního napětí U_t . Graficky je součet znázorněn pomocí *Obrázek 9 (11)*.



Obrázek 9 : křivka zkušebního napětí jakožto součtu základní a filtrované křivky (11)

2.2.3 Plný a useknutý atmosférický impulz

Plný normalizovaný atmosférický impulz

Norma ČSN EN 60060 – 1 definuje atmosférický impulz takto:

“Normalizovaný atmosférický impulz napětí je hladký plný atmosférický impulz napětí, který má dobu čela $1,2 \mu\text{s}$ a dobu půltýlu $50 \mu\text{s}$. je popsán jako impulz $1.2/50$.“

Grafické znázornění časového průběhu plného atmosférického impulzu ukazuje *Obrázek 10*. Časový průběh rázové vlny protínají tři charakteristické body: **A** dán hodnotou $0,3 U_t$, **B** $0,9 U_t$ a **C** $0,5 U_t$. Body **A** a **B** jsou protnuty křivkou, která dále protíná osu x a tím určuje zdánlivý počátek O_1 . Doba čela T_1 je časový úsek, za který rázová vlna dosáhne maximální velikosti amplitudy, a je definována vztahem (11):

$$T_1 = \frac{T}{0,6} \quad (2.5)$$

Kde: T_1 - doba čela (s),

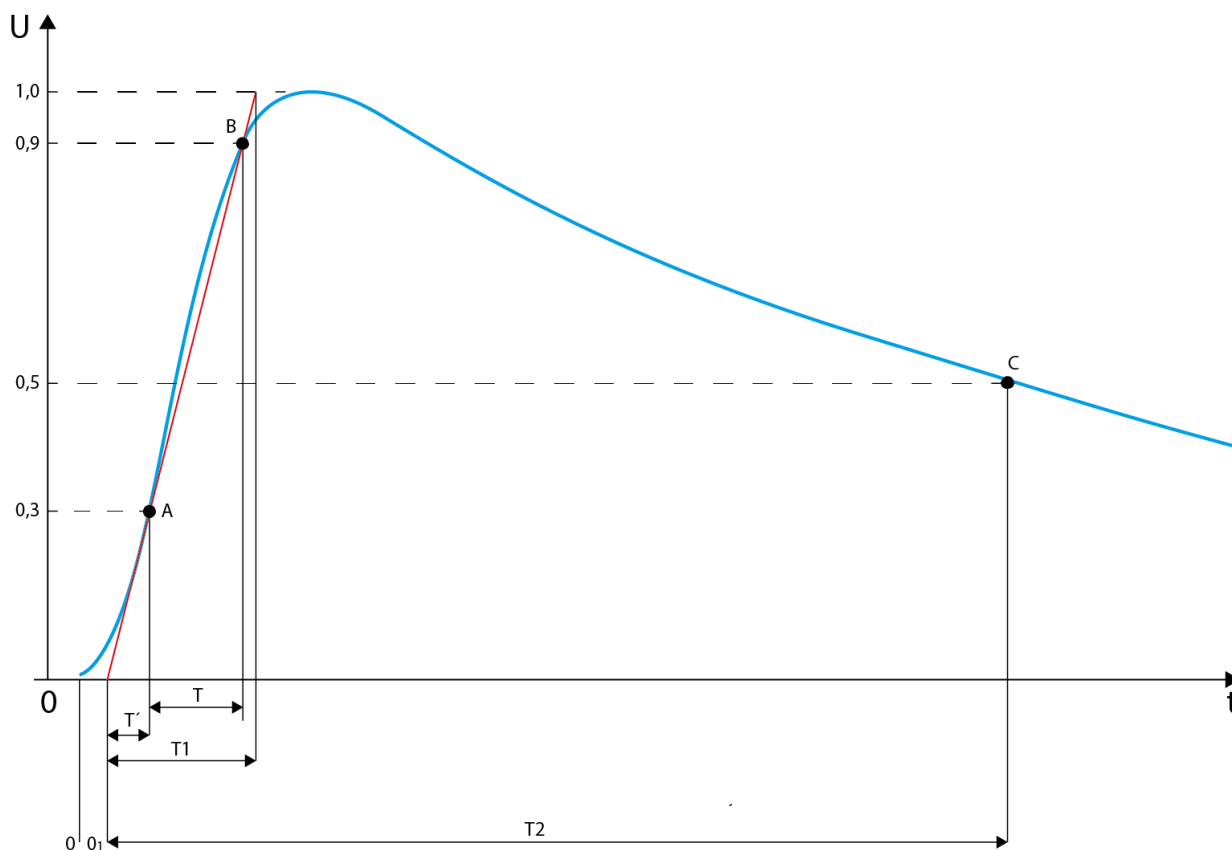
T - doba vytyčená charakteristickými body **A**, **B** (s).

Doba půltýlu T_2 určuje časovou vzdálenost, za kterou dojde ze zdánlivého počátku

O_1 k poklesu napětí po odeznění čela na hodnotu $0,5 U_t$.

Pokud při generování rázové vlny dochází k nežádoucím oscilacím či šumu je nutné do vyhodnocení započítat pouze první bod, který v krajních mezích napětí dosáhl po poslední přechodu hladiny $0,3 U_t$ a poslední bod před $0,9 U_t$. Průměrná strmost pak udává sklon z naměřených hodnot mezi body **A**, **B** (11).

Dále je možné definovat dobu do vrcholu T_e : je to doba, za kterou dosáhne rázový impuls své amplitudy. Matematicky ji lze vyjádřit jako podíl maximální hodnoty napětí U_e a průměrné strmosti (11).



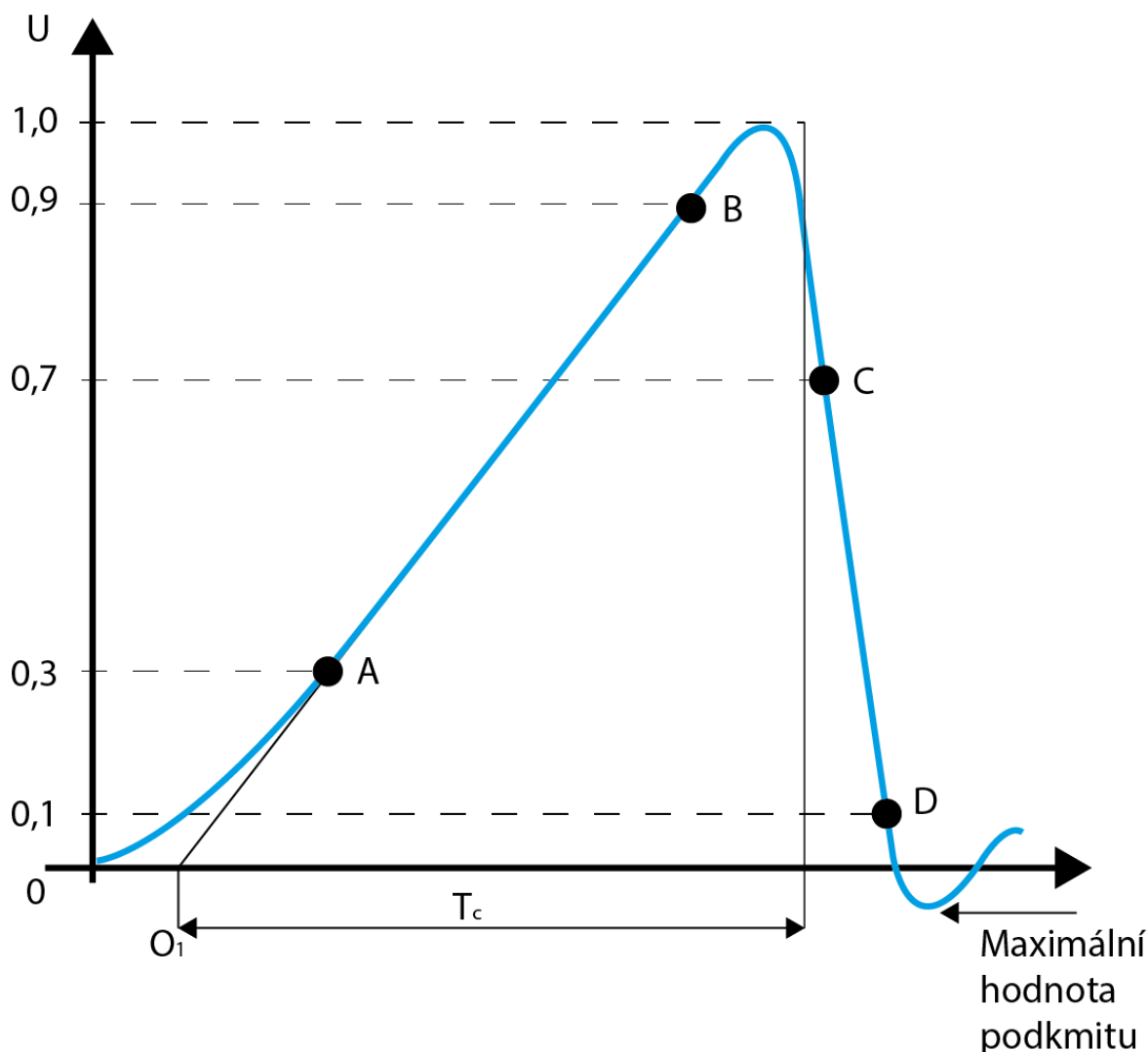
Obrázek 10: Plný atmosférický impuls stanovený normou ČSN EN 60060 – 1 (11)

Usekнутý normalizovaný atmosférický impuls

V případě useknutých rázových impulsů se lze zabývat dvěma základními druhy useknutí z pohledu zkušebnictví a to:

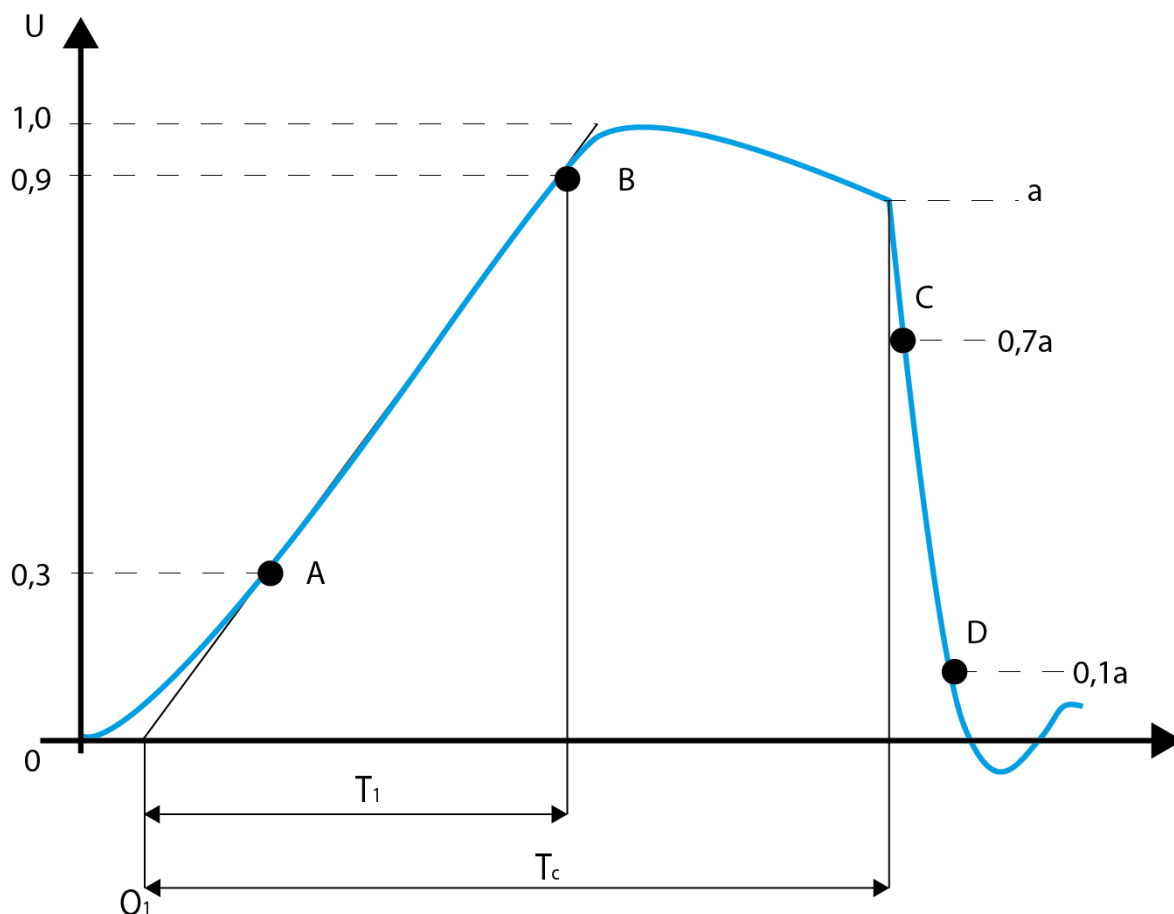
- Cílené useknutí impulsu (způsobené usekávacím jiskřištěm),
- Useknutí impulsu vlivem přeskočů nebo průrazů na zkoušeném zařízení.

Za useknutý impulz stanovený normou lze považovat takový, který je useknut v čase po $2 \mu\text{s}$ až $5 \mu\text{s}$ v době týlu a to vnějším usekávacím jiskřištěm. Doba poklesu napětí z hodnoty v počátku zhroucení do nulové hodnoty bývá z pravidla mnohem kratší než doba trvání týlu. V některých případech může docházet před úplným zhroucením napětí k lokálním průchodům proudu, které se projevují vytvořením sedel v časovém průběhu napětí rázové vlny.



Obrázek 11: Atmosférický impulz useknutý v čele (11)

Na *Obrázek 11* *Obrázek 10* je impulz useknutý v čele. Strmost a rychlost poklesu napětí charakterizují body **C** a **D**. Bod **C** je umístěn v $0,7 U_t$ a **D** $0,1 U_t$. Body jsou určeny pouze ke schématickému popisu probíhajícího děje z důvodu velmi složitého měření standardní měřicí technikou. *Obrázek 11* naznačuje také tzv. podkmit, který nastává, díky strmému zhroucení napětí na testovaném objektu se dočasně po krátkou dobu objeví záporná polarita napětí.



Obrázek 12: Atmosférický impulz useknutý v týlu (11)

Obrázek 12 znázorňuje atmosférický impulz useknutý v týlu. V tomto případě je celý tvar čela impulsu zachován a ke strmému zhroucení napětí dochází až v bodu *a*.

Přesný čas useknutí je dán extrapolovanou přímkou mezi body daného průběhu. Celková doba do useknutí je pak T_c . A je dána zdánlivým počátkem O_1 a okamžikem useknutí, který znázorňuje Obrázek 12 jako bod *a*.

2.3 Vliv vzdálenosti elektrod a tlaku na chování izolačního média

Přeskokové napětí v homogenním a velmi mírně nehomogenním poli je možné matematicky vyjádřit následující podmínkou, která je odvozená z podmínky samostatného výboje (4):

$$A \cdot p \cdot d \cdot e^{-\frac{Bpd}{U}} = \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad (2.6)$$

Kde: A, B – konstanty závislé na druhu plynu a teplotě,

p – tlak,

d – vzdálenost elektrod,

U – napětí,

γ – ionizační číslo.

Z tohoto vztahu je dále možné vyvodit matematický vztah pro přeskokové napětí (4):

$$U_p = \frac{Bpd}{\ln \frac{Apd}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}} \quad (2.7)$$

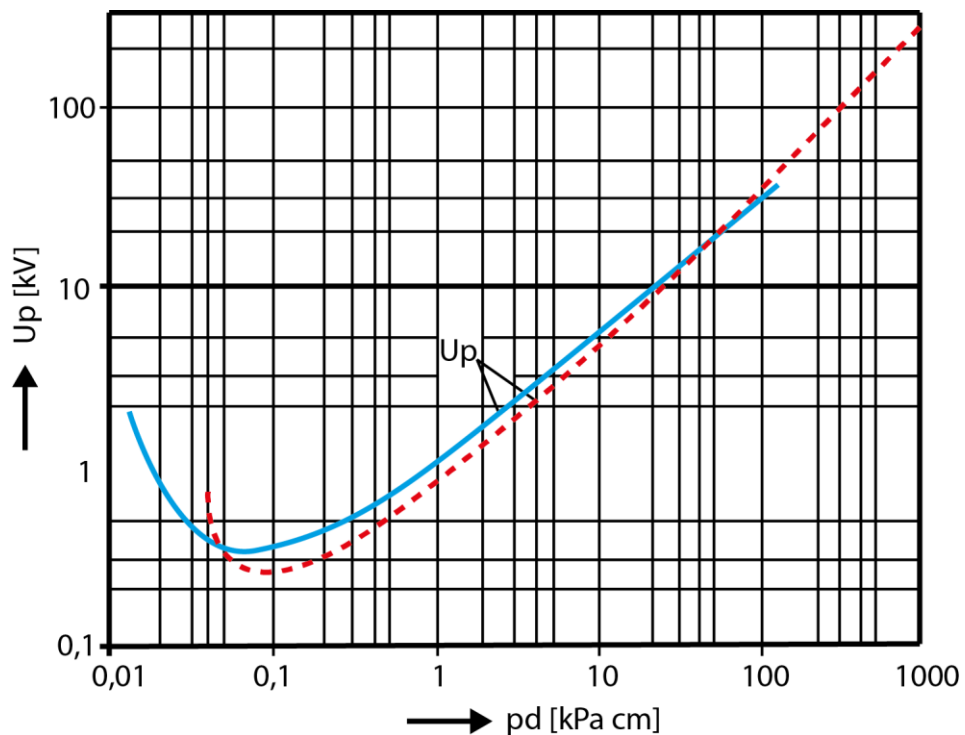
Kde: A, B – konstanty závislé na druhu plynu a teplotě,

p – tlak,

d – vzdálenost elektrod,

U_p – přeskokové napětí,

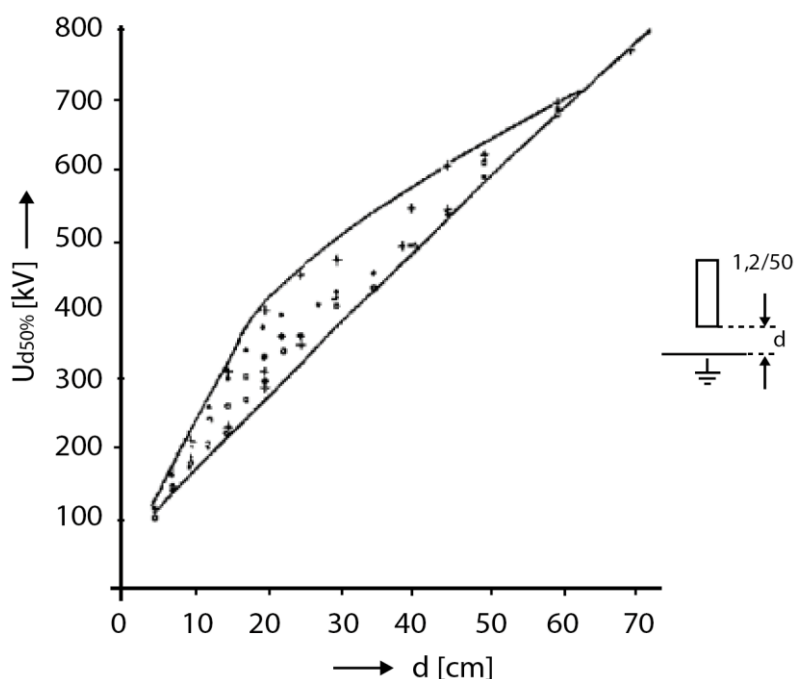
γ – ionizační číslo.



Obrázek 13: Experimentálně zjištěná (modrá) a vypočítaná (červená) závislost přeskokového napětí U_p v homogenním poli pro vzduch (Paschenova křivka) (4)

Červená křivka na *Obrázek 13* je vypočtená závislost dle vztahu (2.7) a odpovídá konstantám $A = 109,5 \frac{1}{\text{cm kPa}}$, a $B = 2738 \frac{\text{V}}{\text{cm kPa}}$, počity byly měděné elektrody. Modrá křivka ukazuje při stejném seskupení prvků experimentálně zjištěnou závislost. Odchyłka v malých součinech tlaku a vzdálenosti elektrod je částečně způsobena tím, že ionizační číslo γ bylo pro vypočtenou křivku uvažováno konstantní. V této oblasti však roste energie kladných iontů a tím i ionizační číslo. V případě malých tlaků většinová část elektronů neionizuje, a proto je nutné k zachování výboje velké napětí. V případě vysokých tlaků ke srážkám elektronů dochází příliš brzy a ty nejsou schopny získat dostatečnou kinetickou energii k ionizaci (4).

V nehomogenním poli je situace obtížněji reprodukovatelná. A to vzhledem k tomu, že do problematiky vstupují další faktory jako vliv tvaru elektrod. Pro každé seskupení elektrod by pak mělo být možné sestojit v závislosti na tlaku a vzdálenosti vlastní závislost určující přeskokové napětí. V některých případech seskupení elektrod a vzdáleností není dosud možné jasně interpretovat hodnotu přeskokového napětí. Experimentálním výzkumem z tohoto hlediska se v minulosti zabýval Kurt Feser. V jednom ze svých článků uvádí rozpory v měření prováděných na vzdálenostech elektrod od 5 do 55 cm. Výzkum byl proveden na seskupení elektrod hrot deska za atmosférických podmínek, přikládáno bylo několik druhů napětí a to jak střídavé, stejnosměrné tak atmosférická a spínací přepětí. Hodnoceno pak bylo U_{50} (12).



Obrázek 14: Experimentální výsledky 50% napětí v závislosti na vzdálenosti elektrod provedené Kurtem Fesrem (12)

Obrázek 14 ukazuje výsledek výzkumu prováděného pomocí normalizovaného atmosférického impulzu a zachycuje oblast vzdálenosti elektrod, ve které je nutné použít smíšené rozdělení pro velikost U_{50} . Oblast smíšeného rozdělení pak zasahuje vzdálenosti elektrod od 5 cm do 100 cm při větších vzdálenostech, již při experimentech vycházelo normální rozdělení. Rozptyl závisí tedy na nějakém dalším faktoru. Vznik korónových výbojů může mít v průběhu zkoušky rozdílný charakter vlivem nestejného rozložení prostorového náboje (12) (4). Výzkum dále potvrdil přítomnost anomálního chování u zkoušek provedených všemi druhy napětí (*střídavé, stejnosměrné, atmosférická a spínací přepětí*).

3 Zkušební systém pro zkoušky impulzním napětím

3.1 Rázový generátor

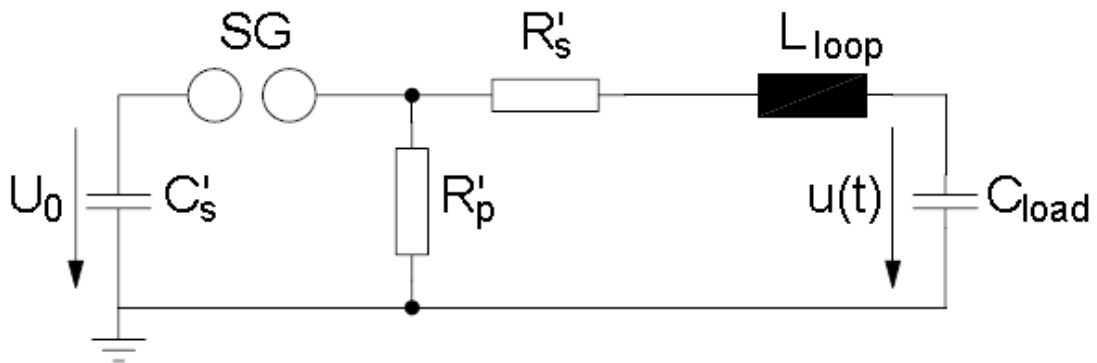
Rázový generátor je přístroj ke generování impulzního napětí. V praxi se z důvodů dosažení vysokonapěťových impulzů používá vícestupňové zapojení. Schématické zapojení ukazuje *Obrázek 16*. Schéma obsahuje identické impulzní kondenzátory, které jsou v průběhu nabíjení zapojeny paralelně a následně spuštěny v sériovém zapojení. Tomuto zapojení rázového generátoru se říká Marxův generátor. Byl vynalezen roku 1924 Erwinem Marxem (6).

Obrázek 16 znázorňuje základní princip funkce vícestupňového rázového generátoru. Všechny kondenzátory jsou v první fázi nabity DC napětím U_{ch} přes nabíjecí usměrňovač. V tu chvíli jsou kondenzátory spojeny paralelně přes nabíjecí odpory R_{ch} na jedné straně a na druhé přes čelní odpory R_s a týlní odpory R_p . Nabíjecí napětí je měřeno v samotném usměrňovači a je předáváno do řídicího systému. Nabíjení se řídí pomocí funkce, která je závislá na zvoleném nabíjecím napětí a impulzním intervalu. Velikost amplitudy napětí a impulzní interval lze zvolit pomocí automatického triggeru. Zapojení dále obsahuje pomocnou elektrodu, která je umístěna v prvním stupni rázového generátoru. Spouštěcí impuls z řídicího systému je zesílen v zesilovači triggeru pulzů na napětí o velikosti 12kV a dojde k přeskoku na pomocnou elektrodu. Tím je snížena hladina přeskokového napětí na jiskřišti prvního stupně a dojde k přeskoku. Kaskádově jsou pak sepnuty všechny stupně rázového generátoru. Impulzní tvar rázové vlny je dán čelními odpory R_s a týlními odpory R_p . Moderní rázové generátory obsahují tzv. *trigger range*, který automaticky pro zvolené nabíjecí napětí zvolí potřebnou vzduchovou mezeru jiskřiště (2) (13).

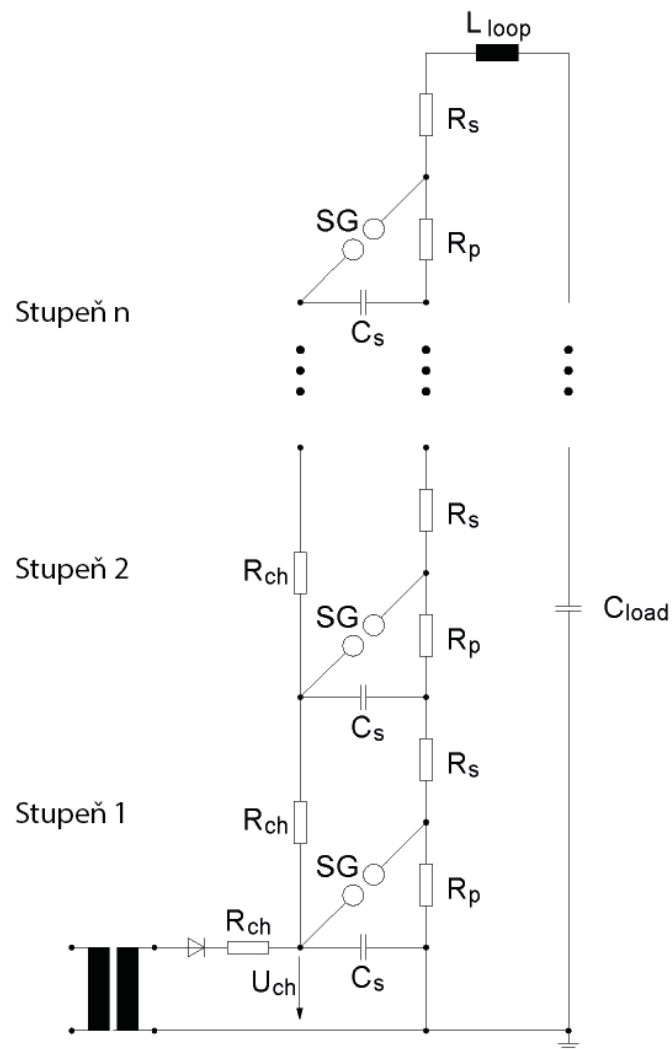
Tabulka 1 : Vysvětlivky k obecnému schématu vícestupňového rázového generátoru (13)

C_s	Impulsní kapacita
R_s	Čelní odpor
R_p	Týlní odpor
R_{ch}	Nabíjecí odpor
C_{load}	Nabíjecí kapacita
L_{loop}	Indukčnost zkoušeného obvodu
SG	Jiskřiště

Stanovení požadovaných hodnot týlních a čelních odporů v závislosti na kapacitě testovaného objektu lze stanovit ze zjednodušeného schématu. (13)



Obrázek 15: Zjednodušené schéma zapojení rázového generátoru převzato z (13)



Obrázek 16: Obecné schéma rázového generátoru s více stupni převzato z (13)

Pokud dojde ke zjednodušení schématu dle *Obrázek 15* je pak možné ekvivalentní parametry C'_s - impulzní kapacita, R'_s - čelní odpor, R'_p - týlní odpor spočítat dle matematických vztahů (13):

$$C'_s = \frac{C_s}{n} \quad (3.1)$$

Kde: C'_s - celková impulzní kapacita,
 C_s - impulzní kapacita,
 n - počet stupňů rázového generátoru.

$$R'_s = R_s \cdot n \quad (3.2)$$

Kde: R'_s - čelní (sériový) odpor,
 R_s - čelní odpor jednoho stupně,
 n - počet stupňů rázového generátoru.

$$R'_p = R_p \cdot n \quad (3.3)$$

Kde: R'_p týlní (paralelní) odpor,
 R_p čelní odpor jednoho stupně,
 n počet stupňů rázového generátoru.

Hodnoty prvků v náhradním schématu určují tvar křivky impulzního napětí, přičemž indukčnost obvodu L_{loop} je nejprve zanedbána. Impulzní napětí je pak dáno rozdílem dvou exponenciálních funkcí s časovými konstantami τ_1 a τ_2 . Matematický zápis pak:

$$U(t) = \frac{U_0}{R'_s \cdot C_{load}} \cdot \frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_2 - \tau_1} \cdot \left[e^{\frac{-t}{\tau_2}} - e^{\frac{-t}{\tau_1}} \right] \quad (3.4)$$

Kde: $U(t)$ - funkce impulzního napětí na zkoušeném objektu,
 U_0 - nabíjecí napětí,

R'_s - tlumící odpor,
 τ_1, τ_2 - časové konstanty.

Pokud budeme předpokládat:

$$R'_p \cdot C'_s \gg R'_s \cdot C_{load} \quad (3.5)$$

Pak lze časové konstanty vyjádřit:

$$\tau_1 \approx R'_s \cdot \frac{C'_s \cdot C_{load}}{C'_s + C_{load}} \quad (3.6)$$

$$\tau_2 \approx R'_p \cdot (C'_s + C_{load}) \quad (3.7)$$

Kde: C_{load} - nabíjecí kapacita,
 C'_s - celková impulzní kapacita,
 R'_s - tlumící odpor,
 R'_p - týlní (paralelní) odpor,
 τ_1, τ_2 - časové konstanty.

Norma přesně definuje časovou závislost průběhu impulzní a spínací rázové vlny. Korelace mezi τ_1 a τ_2 lze pak matematicky vyjádřit:

$$T_1 = K_1 \cdot \tau_1 \quad (3.8)$$

$$T_2 = K_2 \cdot \tau_2 \quad (3.9)$$

Kde: K_1, K_2 - udává *Tabulka 2*,
 τ_1, τ_2 - časové konstanty,
 T_1, T_2 - časový tvar impulzu.

Tabulka 2: Číselné vyjádření konstant K_1 a K_2

	1,2/50μs	250/2500μs
K_1	2,96	2,41
K_2	0,73	0,87

Indukčnost zkoušeného objektu, v náhradním schématu reprezentovatelnou indukčností L_{loop} , způsobuje negativní oscilace v průběhu impulzní vlny. Negativně může ovlivnit například i velikost amplitudy impulzu díky oscilacím. Do obvodu se z tohoto důvodu zařazuje sériově zapojený odpor R'_s . Ten má za úkol oscilace tlumit a jeho velikost lze vyjádřit:

$$R'_s \geq 2 \cdot \sqrt{L_{loop} \cdot \frac{C'_s + C_{load}}{C'_s \cdot C_{load}}} \quad (3.10)$$

Kde: R'_s - tlumicí odpor,

C'_s - celková impulzní kapacita,

C_{load} - nabíjecí kapacita,

L_{loop} - indukčnost zkoušeného objektu.

Faktor účinnosti η je poměr mezi špičkovou hodnotou impulzního napětí U_{peak} a celkovým nabíjecím napětím $U_L = n \cdot U_0$ impulzního generátoru. Přibližně lze tuto hodnotu určit takto:

$$\eta \approx \frac{C'_s}{C'_s + C_{load}} \quad (3.11)$$

Kde: η - faktor účinnosti,

C'_s - celková impulzní kapacita,

C_{load} - nabíjecí kapacita.

3.1.1 Rázový generátor HAEFELY řady SGS

Reálné provedení rázového generátoru, které je zároveň použito pro praktické testování v druhé části diplomové práce ukazuje *Obrázek 17* a *Tabulka 3* uvádí jeho parametry. Jedná se o produkt firmy HAEFELY z řady SGS. Tento systém je vhodný ke generování impulzních napětí simulující blesky a spínací přepětí (13).



Obrázek 17: 4 stupňový rázový generátor HAFELY převzato z (13)

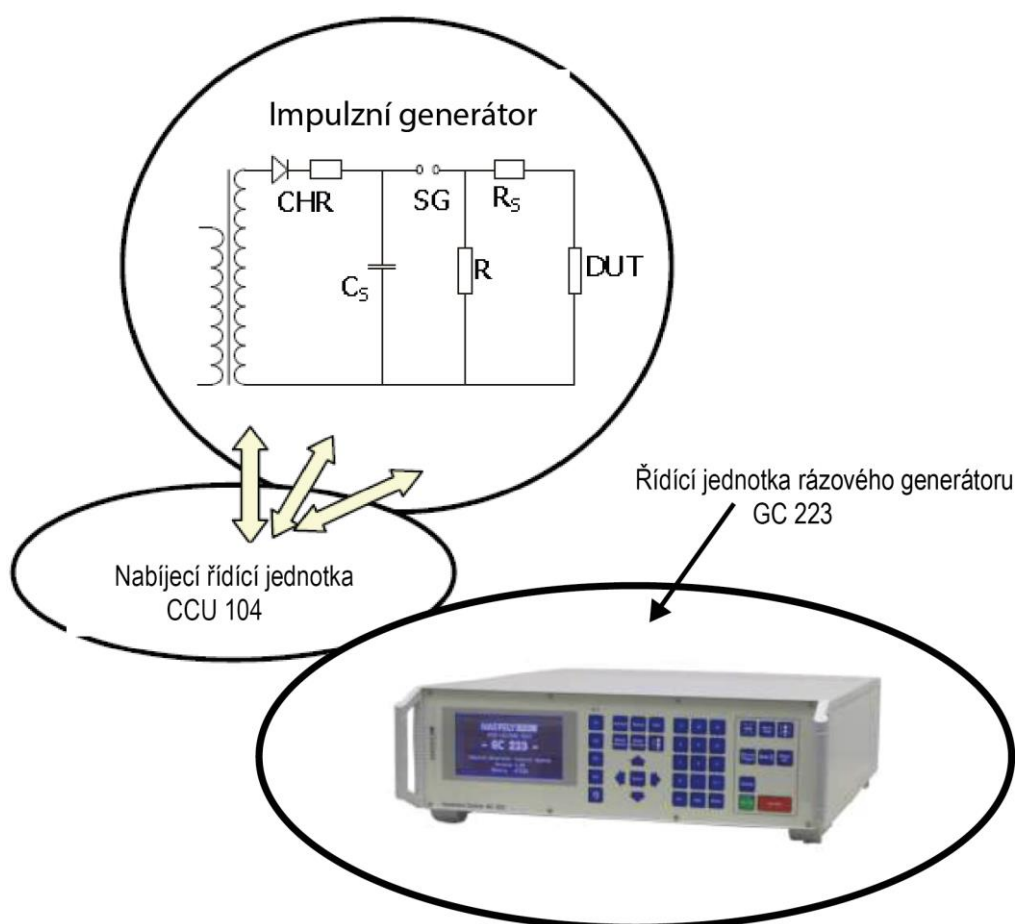
Tabulka 3: Parametry rázového generátoru umístěného ve školní laboratoři

Počet stupňů v sérii	3
Počet stupňů paralelně	1
Nabíjecí kondenzátory C_1'	330 nF
Vnitřní čelní odpor na stupeň R_{si}	12 Ω
Vnější čelní odpor R_{se}	250 Ω
Týlní odpor na stupeň R_{pi}	68 Ω
Zatěžovací kapacita (testovaný objekt, dělič, rozptylová kapacita) C_{tot}	1000 pF

3.2 Ovládací systém impulsního generátoru GC 223

Laboratoř vysokého napětí je vybavena řídicím systémem rázového generátoru od společnosti HAEFELY a to typového označení GC 223. Zobrazované informace jsou získávány z nabíjecí řídicí jednotky rázového generátoru CCU 104, která shromažďuje veškeré informace z měření. Ovládací systém je dále možné dovybavit impulzním měřicím zařízením. Současně je možné nastavit parametry požadované impulzní vlny vysokého napětí. V případě prováděných zkoušek v praktické části byla velmi užitečná funkce sekvence, pomocí které bylo možné zvolit počet požadovaných impulzů, velikost

amplitudy napětí, a požadovanou časovou prodlevu mezi jednotlivými napěťovými impulzy. Díky automatickému triggeru je celý proces měření časové závislosti zpřesněn z důvodů eliminace chyby manuálního ovládání. Dále je možné pomocí nastavení, a to buď automaticky, nebo manuálně nastavovat vzdálenost mezi jiskřišti. Systém je možné pomocí rozhraní RS 232 plně dálkově ovládat (*Obrázek 18*) (13).



Obrázek 18: Blokové znázornění modulárního uspořádání měřícího zařízení HAEFELY (13)

3.3 Vysokonapěťový impulzní analyzátor HAEFELY řady HIAS 743

HIAS 743 je přesný multikanálový impulzní analyzátor. Umožňuje vyhodnotit a analyzovat impulzní napětí, proudy podle všech příslušných norem. K vyhodnocení impulzních tvarů lze využít buďto automatického režimu nebo manuálního. Systém umožňuje zobrazení přesného tvaru impulzní vlny a tím lze získat jasný obraz o situaci na zkoušeném objektu. Následně je možné zhotovit z naměřených dat výstupní protokol, který je dostupný automaticky a to v několika možných formátech a grafických rozložení. Skutečný tvar přístroje znázorňuje *Obrázek 19* (13).



Obrázek 19: Vysokonapěťový impulzní analyzátor HAEFELY řady HIAS 743 převzato z (13)

4 Zkoušky impulzním namáháním

Přístroje pro zkušební postupy jsou definované normou **ČSN EN 60060-2**. Tvar impulzu musí být kontrolován u každého testovaného prvku. V případě, že se testují shodné prvky, tvar impulzu lze ověřit pouze jednou. V případě impulzního namáhání norma definuje zkušební postupy tzv. výdržným napětím (11).

Výdržným napětím se rozumí vrcholová hodnota impulzního napětí určitého tvaru a polarity přiváděného impulzu. Přitom zkoušený objekt musí vyhovět normou předepsaným pravidlům. V závislosti na charakteru testovaného prvku zkušební komise zvolí jeden ze čtyř možných postupů zkoušek. Zkoušky jsou značeny A, B, C, D. Přitom u zkoušek A, B, C je na zkoušený prvek přiložena pouze výdržná hodnota, u metody D je nutné použít více napěťových hladin (11).

4.1 Zkoušky pomocí postupu A

Na testovaný objekt jsou přivedeny tři impulzy, které mají tvar a polaritu určenou předepsanou normou. Zkouška je provedena na dané napěťové hladině výdržného napětí. Technická komise určí metody indikace poruchy zkoušeného prvku. V případě, že nedojde k poruše, je možné zkoušený objekt označit za vyhovující. Následující postup je vhodné uplatnit u izolace, která nemá samoobnovující efekt nebo je degradovatelná (11).

4.2 Zkoušky pomocí postupu B

Testovaný prvek je zatížen patnácti impulzy o dané hladině výdržného napětí. Impulzy mají opět stanovený tvar a polaritu. Prvek lze označit za vyhovující v případě samočinně se obnovující izolace, nedojde-li k více než dvěma průrazným výbojům. V případě samočinně se neobnovující izolace nesmí být zjištěna porucha na testovaném objektu. Metody zjištění poruch stanovuje technická komise (11).

4.3 Zkoušky pomocí postupu C

V tomto případě jsou na testovaný objekt přiloženy tři impulzy daného tvaru a polarity při určené hladině výdržného napětí. Pokud k průrazu nedojde, zkoušený objekt uspěl v dané zkoušce. U izolace, u které dochází k obnově izolačních vlastností po průrazu, v případě jednoho průrazného výboje je aplikováno dalších devět impulzů a pokud opět nedojde v žádném z nich k průraznému výboji, testovaný objekt lze považovat za vyhovující. U samočinně se neobnovující izolace nesmí dojít k žádné poruše, aby mohl být

prvek označen za vyhovující (11).

4.4 Zkoušky pomocí postupu D

V případě izolace, která se samočinně obnovuje, lze hodnotit 10% napětí průrazného výboje použitím některé z metod popsanych v kapitole 5. Pomocí těchto metod lze buď přímo vyhodnotit 10%, 50% napětí průrazného výboje nebo v druhém případě 10% napětí průrazného výboje lze dopočítat dle vztahu (11):

$$U_{10} = U_{50} \cdot (1 - 1,3s) \quad (4.1)$$

Kde: U_{10} - 10% napětí průrazného výboje,

U_{50} - 50% napětí průrazného výboje,

s - směrodatná odchylka určena zkušební komisí.

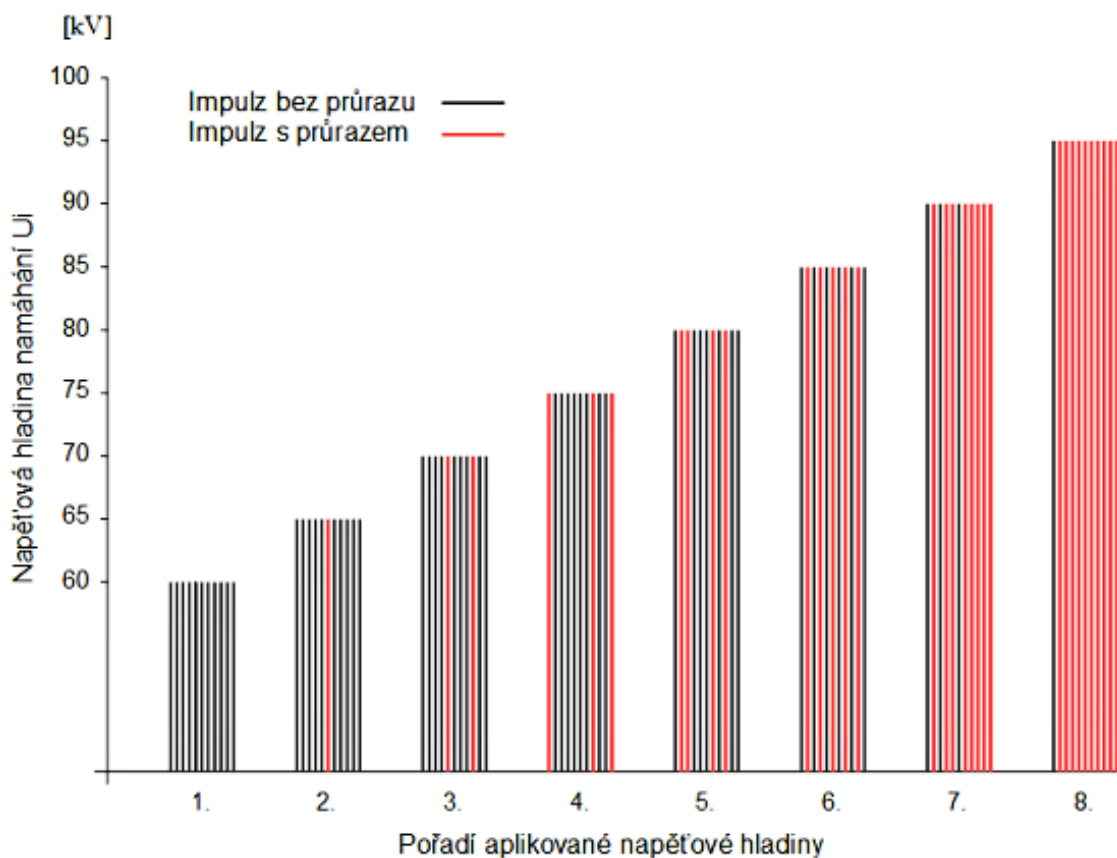
Zkoušený prvek lze hodnotit jako vyhovující, pokud není 10% napětí průrazného výboje menší než dané výdržné napětí (11).

5 Statistické hodnocení zkoušek impulzním namáháním

Za účelem statistického vyhodnocení lze zkoušky průrazným výbojem rozčlenit do tří základních tříd. Tyto třídy jsou určeny zkušební normou ČSN EN 60060-1 (11).

5.1 Třída 1: Zkoušky s více hladinami

Zkoušky třídy 1 se provádějí následujícím způsobem. Na zkoušený objekt je přiloženo n_i zkušebních napětí, které vyvolají $k_i \leq n_i$ průrazných výbojů. Zkouška je složena z m napěťových hladin. K ukončení zkoušky dochází ve chvíli, kdy dojde ke $k = n - 1$ průrazů respektive přeskoků. Rozdíl mezi kroky sousedních hladin je volen $\Delta U = U_{i+1} - U_i$ ($i = 1, 2 \dots m - 1$). Postup zkoušky znázorňují *Graf 1*, kde jsou uvedeny výsledky zkušebního postupu. Tento způsob zkoušek je použit zejména pro impulzní napětí. Popsaný zkušební postup je, ale také možné použít pro zkoušky střídavým a stejnosměrným napětím s předepsanou dobou namáhání (11).



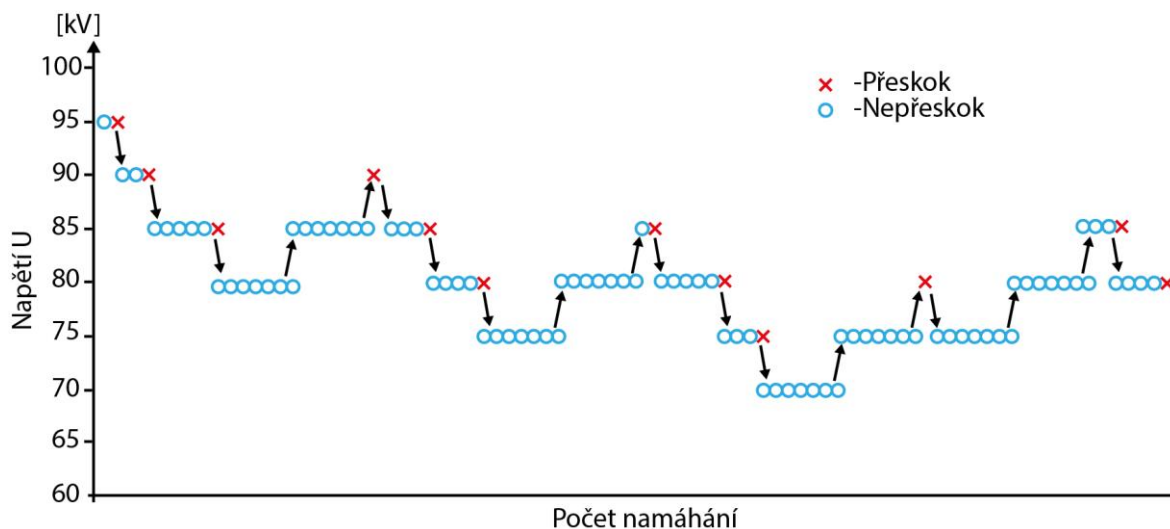
Graf 1: Postup zkoušky třídy 1. převzato z (11)

5.2 Třída 2: zkoušky metodou nahoru dolů

Pro zkoušky metodou nahoru dolů lze použít dvě základní metodiky. První z nich je výdržný postup (*Graf 2*), pro který je stěžejní hledání takových napěťových hladin, u kterých je nízká pravděpodobnost průrazného výboje. Naopak druhá metodika se zabývá hledáním napěťových hladin, u kterých je očekávána vysoká pravděpodobnost průrazného napětí. Tento postup je nazýván výbojový (*Graf 3*) (11).

5.2.1 Výdržný postup namáhání

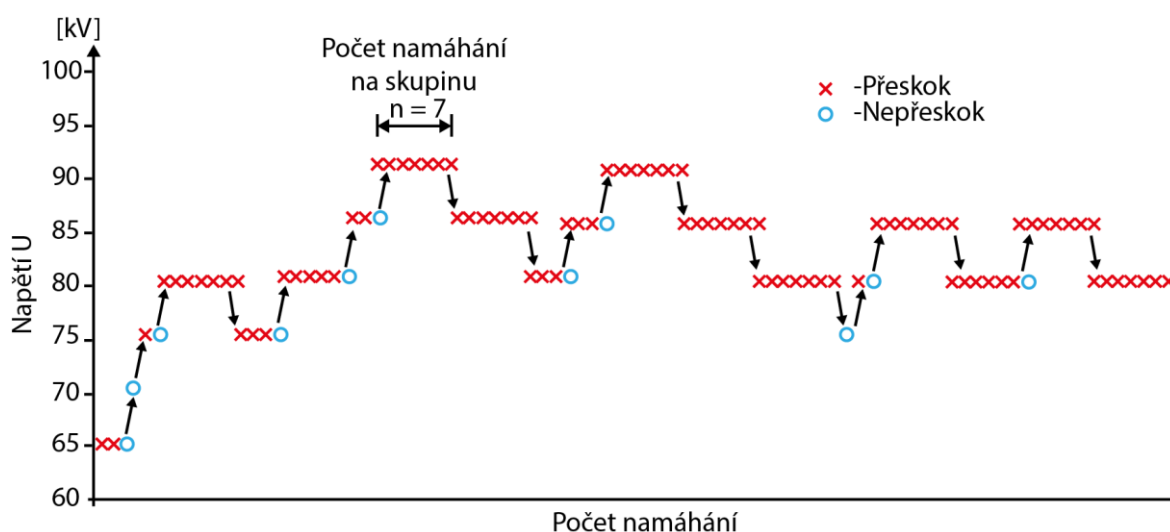
Výdržný postup namáhání schematicky znázorňuje (*Graf 2*). Metodiku charakterizuje malý počet průrazných výbojů. Princip této metody spočívá v postupném snižování a zvyšování napěťových hladin v závislosti na průrazném výboji. Napěťová hladina se zvyšuje o ΔU , pokud ve skupině n přivedených napětí nedošlo k žádnému průraznému výboji. Naopak pokud ve skupině n přivedených napětí došlo alespoň k jednomu výboji, tak se napěťová hladina sníží o ΔU . Metoda je aplikována od vyšší napěťové hladiny k nižší (11).



Graf 2: Výdržný postup namáhání (11)

5.2.2 Výbojový postup namáhání

Schématický postup namáhání zobrazuje *Graf 3*. Tato metoda na rozdíl od výdržného postupu je charakterizována velkým počtem průrazných výbojů. Začíná se od nízké napětěové hladiny, a dokud nedojde ve skupině n přivedených napětí k n průrazům, tak je napětěová hladina stále zvyšována o hodnotu ΔU . Ve chvíli, kdy dojde k n průrazům, se napětěová hladina snižuje o ΔU (11).



Graf 3: Výbojový postup namáhání (11)

5.2.3 Vyhodnocení postupů namáhání

Při hodnocení postupů namáhání je rozhodující zvolené n tedy počet namáhání na skupinu. Pro $n = 1$ je možné jak výdržným tak výbojovým postupem nalézt hodnotu napětí, při které je 50% možnost průrazného výboje tedy U_{50} .

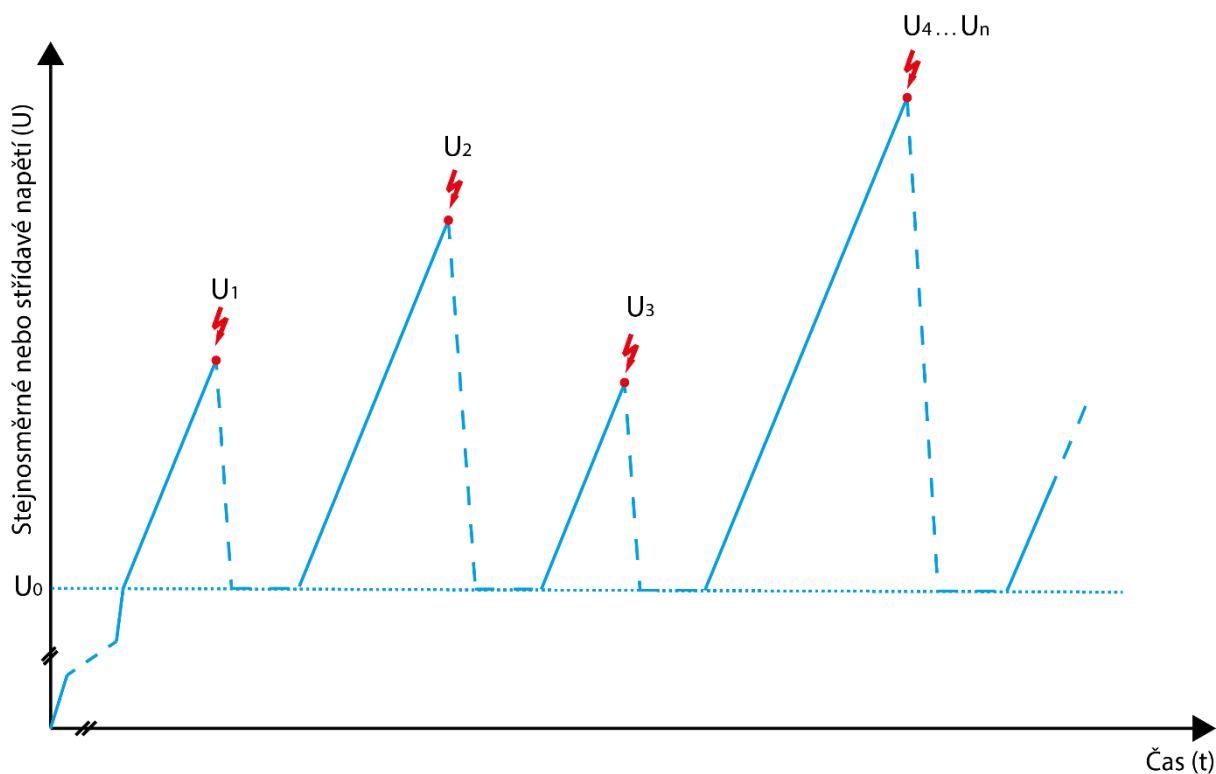
Pokud není hodnota $n = 1$, lze určit různou pravděpodobnost průrazného výboje. Například zkoušky s $n = 7$ určují 10% a 90% příležitost průrazného výboje. Pro zkoušku norma doporučuje tento napětěový krok $\Delta U = (0,01 \text{ až } 0,03) U_{50}$.

Výsledkem jsou počty skupin k_i namáhání použitých na napětěových hladinách U_i . První hladinu, kterou lze brát v úvahu, je hladina, na níž se aplikovaly nejméně dvě skupiny namáhání. Pro platné skupiny tedy platí: $m = \sum_{i=1}^l k_i$ na napětěových hladinách $i=1 \dots l$. (11)

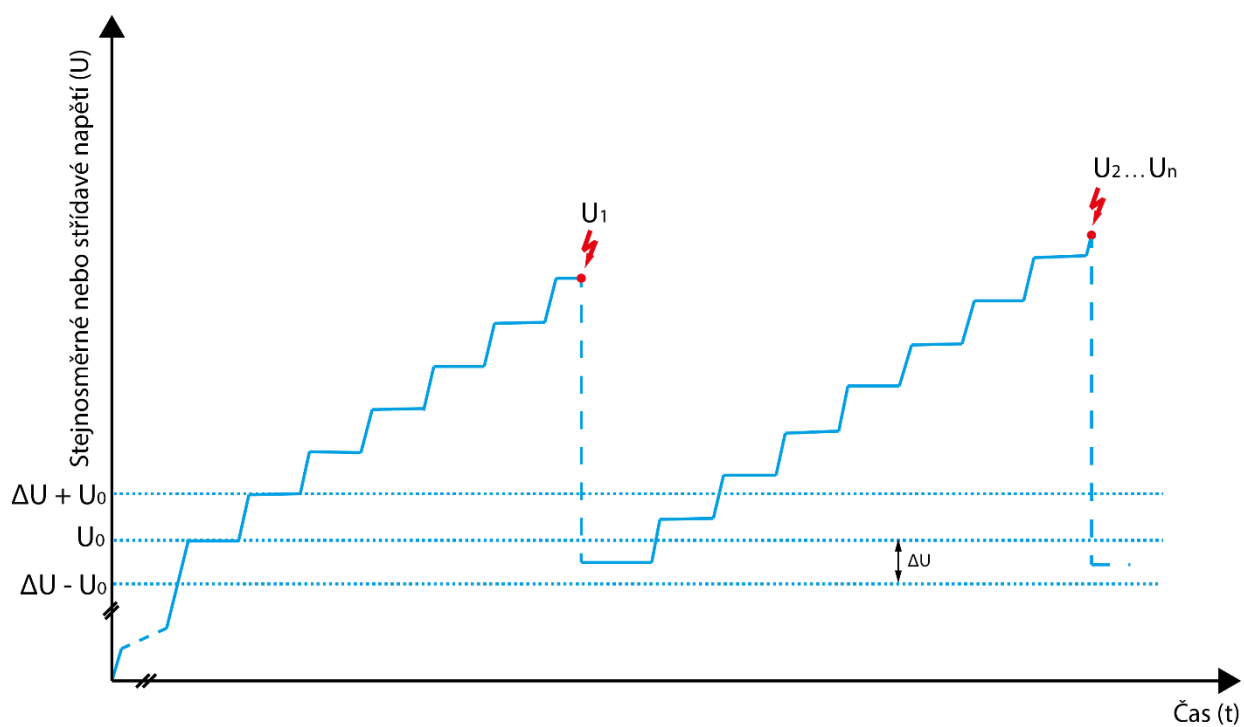
5.3 Třída 3: Zkoušky postupným namáháním

U typu zkoušek označených jako třída 3 je volen postup, při kterém dochází vždy k výboji na zkoušeném prvku. Test se provádí n – krát. Zkušební napětí je možné navyšovat plynule nebo po určitých krocích až do chvíle, ve které nastane průrazný výboj. Průrazný výboj nastává při napětí U_i . Nebo je na zkoušený objekt přiložena konstantní napěťová hladina a je zaznamenáván čas t_i , za který došlo k průraznému výboji. Výsledkem je n hodnot napětí U_i nebo času t_i , ve kterém nastal průrazný výboj ($n \geq 10$) (11).

Tyto zkoušky je možné provádět pozvolným nebo stupňovitým zvyšováním střídavého nebo stejnosměrného napětí. Dále lze zkoušky provádět plynulým zvyšováním impulzního napětí. Zkoušky, u kterých dojde k průraznému výboji v čele impulzu, spadají taktéž do této skupiny. Grafické znázornění postupu takto prováděných zkoušek uvádí *Graf 4* a *Graf 5* (11).



Graf 4: Souvislé zvyšování napětí (11)



Graf 5: Postupné zvyšování napětí (11)

6 Použité statistické metody k vyhodnocení experimentálních dat

Každý vědní obor včetně všech technických disciplín v současné době využívá k vyhodnocení získaných dat statistické metody. Soubor naměřených dat je nutné zpracovat tak, aby vynikly jeho charakteristické rysy a zákonitosti. Naměřený soubor experimentálních dat byl roztríděn do tabulek a byly zároveň zjištěny relativní četnosti vzniku přeskočků při daných amplitudách a při splnění dalších níže uvedených předpokladů. Tyto relativní četnosti zároveň představují statistickou pravděpodobnost vzniku přeskočků. Statistické pravděpodobnosti byly znázorněny prostřednictvím krabicového grafu, který zachycuje kvartily případně extrémní hodnoty. Kvartily jsou hodnoty, které rozdělují soubor hodnot tj. zjištěné statistické pravděpodobnosti na čtyři části. Kvartily jsou celkem tři, dolní kvartil \tilde{x}_{25} odděluje čtvrtinu nejnižších hodnot znaku. Prostřední kvartil je medián a rozděluje obor hodnot statistické pravděpodobnosti na dvě stejné části, z nichž každá obsahuje 50 % jednotek. Horní kvartil \tilde{x}_{75} odděluje 75 % nejnižších hodnot znaku statistické pravděpodobnosti vzniku přeskočků od zbývajících 25 % hodnot znaku. Medián je jednou z měr střední hodnoty, je tedy mírou polohy (úrovně) při popisu experimentálních dat. Kromě měr polohy jsou velmi důležité i míry variability, které charakterizují měnlivost hodnot statistické pravděpodobnosti vzniku přeskočků. Pomocí nich lze zkoumat intenzitu odlišností údajů a lze analyzovat význam faktorů, které tyto odlišnosti způsobují. Jednou z nejdůležitějších měr variability je rozptyl (s_x^2), který měří vzájemné odchylky hodnot znaku (x_i). Je definován jako průměr čtverců odchylek jednotlivých hodnot znaku od jejich aritmetického průměru (\bar{x}), tj. (14) (15) (1)

$$s_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (6.1)$$

Nevýhodou rozptylu z interpretačního hlediska je, že se vyjadřuje ve čtvercích, a proto se často variabilita popisuje prostřednictvím kladně vzaté odmocniny z rozptylu, která se nazývá směrodatná odchylka. Na základě výběrového souboru experimentálních dat lze odhadnout také směrodatnou chybu odhadu. Tu je možné interpretovat jako průměrnou velikost chyb odhadů provedených při mnohokrát opakovaných výběrech. Je-li směrodatná chyba odhadu jen velmi malá, pak je málo pravděpodobné, že bychom se mohli dopustit nepříjemně velké chyby. Odhad směrodatné chyby odhadu $s(\bar{x})$ dostaneme (14) (15) (1)

$$s(\bar{x}) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (6.2)$$

Kde s - je výběrová směrodatná odchylka,

n - je počet pozorování (1).

Odhady se často doplňují intervalovými odhady, k nimž se připojuje pravděpodobnost, s níž lze očekávat, že je odhad správný (označuje se $1-\alpha$ a nazývá se spolehlivostí odhadu). V této práci je zvolena obvyklá hodnota, a to 95% spolehlivost, tzn., $1-\alpha = 0,95$. Tento odhad je reprezentován odhadem (G_d, G_h) , který s pravděpodobností 95 % bude obsahovat skutečnou hodnotu odhadované charakteristiky základního souboru. Při konstrukci intervalu spolehlivosti se vychází z toho, že výběrový průměr má přibližně normální rozdělení. Pro interval spolehlivosti pak platí (14) (15) (1).

$$P(G_d < G < G_h) = 1 - \alpha \quad (6.3)$$

Statistické metody, které umožňují testovat vliv více faktorů na proměnnou veličinu, se označují souhrnným názvem **analýza rozptylu (ANOVA – Analysis of Variance)**. Analýza rozptylu představuje účinný statistický nástroj pro zkoumání vztahu mezi vysvětlovanými a vysvětlujícími proměnnými a používá se zejména při vyhodnocování experimentálních dat. Vysvětlované proměnné jsou vždy kvantitativní, vysvětlující proměnné jsou označovány jako faktory. Zkoumáme-li více faktorů působících na vysvětlovanou proměnnou, jde o vícefaktorovou analýzu rozptylu. V této diplomové práci je vysvětlující proměnná statistická pravděpodobnost vzniku přeskočků respektive relativní četnost přeskočků a vysvětlující proměnné tj. faktory, které mají vliv na hodnoty statistické pravděpodobnosti: úroveň amplitudy, dny měření, použitý plyn a typ měření (nové, staré), rozstupy mezi napěťovými impulzy (14) (15) (1).

Analýza rozptylu je založena na hodnocení vztahů mezi rozptyly porovnávaných výběrových souborů (testování shody středních hodnot se převádí na testování shody dvou rozptylů (F -test)). Základní statistikou počítanou v analýze rozptylu je obecně testovací kritérium F , pomocí něhož se testuje hypotéza, zda průměry ve skupinách určených

působícím faktorem (příp. faktory) se od sebe liší více než na základě působení přirozené variability (náhodného kolísání) (14) (15) (1).

Předpoklady pro validní použití metody analýzy rozptylu pro testování rozdílu více středních hodnot jsou:

- *nezávislost* měření (uvnitř skupin i mezi skupinami),
- *normalita* dat v každé skupině,
- *homogenita rozptylů* uvnitř skupin (alespoň přibližná shoda rozptylů uvnitř skupin).

Základním úkolem je porovnat úroveň měřené statistické pravděpodobnosti vzniku přeskočků v různých skupinách tj. dle úrovně amplitudy, dle dnů opakovaných měření, dle použitého plynu a dle typu měření (staré, nové). Je třeba zjistit, zda pozorovaná variabilita proměnné statistická pravděpodobnost vzniku přeskočků odpovídá pouze náhodnému kolísání, nebo zda se v ní projevuje také odlišná úroveň hodnot v jednotlivých skupinách. Testování se provádí na základě analýzy vztahů mezi rozptyly v jednotlivých skupinách (14) (15) (1).

7 Experimentální výzkum interpretace zkoušek impulzního napětí

Dosud byla provedena rozsáhlá série experimentů v rámci projektu, který se zabývá experimentálním ověřením vzniku přeskoků v hermeticky uzavřené nádobě s plynovou náplní, a to v závislosti na typu elektrod, tlaku plynu, vzdálenosti elektrod a typu plynové náplně. Cílem projektu je implementace experimentálních výsledků do softwaru, s jehož pomocí by bylo možné korigovat návrhy elektrických zařízení vybaveného zhášecím médiem daného typu. Plynová náplň v rámci projektu byla svým složením volena jako možná náhrada za dnes vytlačovaný plyn SF₆. Byly použity dva druhy plynu. První z nich obsahoval 95 % dusíku, 5 % kyslíku a druhý byl složen z 80 % dusíku, 20% kyslíku. Uspořádání elektrod charakterizuje stupeň nehomogenity elektrického pole. V rámci experimentálních výsledků docházelo v některých konfiguracích uspořádání testovaného objektu k výsledkům, které nelze jednoznačně interpretovat.

Jedním z cílů diplomové práce bylo na základě provedených experimentálních zkoušek ověřit nejednoznačné výsledky pomocí statistických charakteristik a analýz. Impulzní zkoušky byly prováděny jak s automaticky pracujícím systémem tak manuálním. Veškeré zkoušky byly provedeny normalizovaným atmosférickým impulzem 1.2/50 popsáným v kapitole 2 této práce. Přístrojové vybavení laboratoře vysokého napětí je pak popsáno v kapitole 4. Při experimentálním měření byly testovány postupně hypotézy ověřující vliv zkoumaných faktorů. Statistické hypotézy ověřovaly shodu respektive rozdílnost vzniku přeskoků v jednotlivých experimentálních měřeních. Byla testována vždy hypotéza o shodě průměrného vzniku přeskoků při jednotlivých amplitudách za působení rozdílných faktorů (použitý plyn, vzdálenost, typ elektrod, tlak plynu) proti alternativní hypotéze (neexistence shody vzniku přeskoků). Ověřované hypotézy:

1. Rozdílné rázové generátory mohou mít vliv na počet přeskoků na napěťových hladinách.
2. Opakování identických zkoušek za stejných podmínek v jednotlivých dnech měření nemá vliv na počet přeskoků na napěťových hladinách.
3. Rozdílná plynová náplň při stejném seskupení elektrod může mít vliv na počet přeskoků na jednotlivých hladinách.

4. Prodloužení časového intervalu mezi jednotlivými impulzy by nemělo ovlivnit počet přeskoků.

7.1 Průběh testování

Všechny provedené testy probíhaly v univerzitní laboratoři vysokého napětí. Při zkouškách bylo hodnoceno, ke kolika přeskokům dojde v hermeticky uzavřené nádobě při daném impulzním namáhání s danou amplitudou. V hermeticky uzavřené nádobě byly umístěny dvě elektrody nestejného průměru, které zaručovaly nehomogenitu pole. Z hlediska anomálního chování byly zvoleny elektrody s označením R4B, které vykazovaly nejspornější výsledky. Toto seskupení elektrod se skládá ze dvou elektrod, z nichž jedna je vybavena hrotem o poloměru 4 mm a druhá je kulového typu o průměru 150 mm. Prostor mezi elektrodami byl vyplněn plynem. Jednalo se o dva druhy, a to plyn s obsahem 95% dusíku a 5% kyslíku a plyn s obsahem 80% dusíku a 20% kyslíku. Na daném uskupení byly následně vykonány normalizované zkoušky více hladinami. Rozstup mezi jednotlivými napěťovými hladinami byl zvolen konstantně na 5kV. Zkoušky probíhaly na dvou odlišných zdrojích vysokého napětí jednak na zdroji HAEFELY SGS s automatickým ovládním a dále pak na manuálně ovládaném rázovém generátoru (manuálně ovládaný generátor byl použit pro ověření průkaznosti automatického rázového generátoru). Každý ze zdrojů pak disponoval jinou energií impulzu.

7.2 Neprokazatelné testy

Při daném uspořádání elektrod, kdy bude zvyšována velikost amplitudy přiváděného impulzu, by měl postupně přibývat počet přeskoků v závislosti na napětí. Vždy daná napěťová hladina je přivedena n krát, v tomto případě 25 krát. V sérii experimentů se vyskytují některé případy, kdy se systém chová odlišně. Odlišnost testů se projevila nejvíce v provedení elektrod R4B se vzdáleností elektrod od 40 mm do 60 mm v kombinaci s plynovou náplní o tlaku 1 bar až 1,5 bar. Neprokazatelnost výsledků je charakterizována smíšeným rozdělením pravděpodobností přeskoků nebo extrémním nárůstem pravděpodobností přeskoků mezi sousedními napěťovými hladinami. V neposlední řadě je potřeba zmínit se o odlišnosti výsledků při opakování měření.

7.3 Význam testování anomálií

V současné době není zcela objasněn fyzikální důvod, proč k odlišnostem v testech dochází. Ovšem je velmi důležité tyto jevy zkoumat z hlediska statistiky tj. pravděpodobnosti jejich vzniku a analýzy faktorů, které tyto odlišnosti ovlivňují. Pokud by bylo možné výrobcí podložit dostatkem experimentálních měření data s prokázáním jejich statistické významnosti, mohlo by to vést ke značnému zjednodušení návrhu vysokonapěťových součástek, ve kterých se objevuje problematika plynového izolačního média. Do návrhu by mohl být zakomponován alespoň experimentálně ověřený vliv prostorových nábojů. Tím by bylo možné zahrnout výsledky experimentů do softwaru, který by byl schopný korigovat návrh samotného zařízení. Z hlediska testování se proto nelze spoléhat pouze na šíři uskutečněných testů (kombinace změny tvaru elektrod, plynové náplně a vzdálenosti elektrod), ale je nutné se zabývat i shodností výsledků při opakování zkoušek. Na tuto problematiku jsou zaměřeny dále uvedené kapitoly v této práci.

7.4 Vybrané zkoušky impulzního napětí

Ze série experimentů byly vybrány dva, které svým chováním neodpovídaly teoretickým předpokladům (*Tabulka 4 a Tabulka 5*).

Tabulka 4: Zkouška více hladinami, test vykazující anomální chování

Interní označení:	LI 80		
Datum měření:	02. 06. 2014		
Složení plynu:	95% N2 + 5% O2	Tlak plynu:	1,0 bar
Typ elektrod:	R4B	Vzdálenost elektrod:	40 mm

U (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Poč. přeskoků	
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	1
70	0	X	0	X	X	X	0	X	0	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
75	0	X	0	0	0	X	X	X	X	0	X	0	0	0	X	0	X	X	X	0	0	0	0	0	X	0	11
80	0	0	0	0	0	0	X	0	0	X	X	0	X	0	0	0	0	0	0	0	X	X	X	X	X	0	9
85	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	X	X	X	X	X	0	X	X	X	X	0	0	0	0	20

Tabulka 5: Zkouška více hladinami, test vykazující anomální chování

Interní označení:	LI 81		
Datum měření:	02. 06. 2014		
Složení plynu:	95% N2 + 5% O2	Tlak plynu:	1,0 bar
Typ elektrod:	R4B	Vzdálenost elektrod:	60 mm

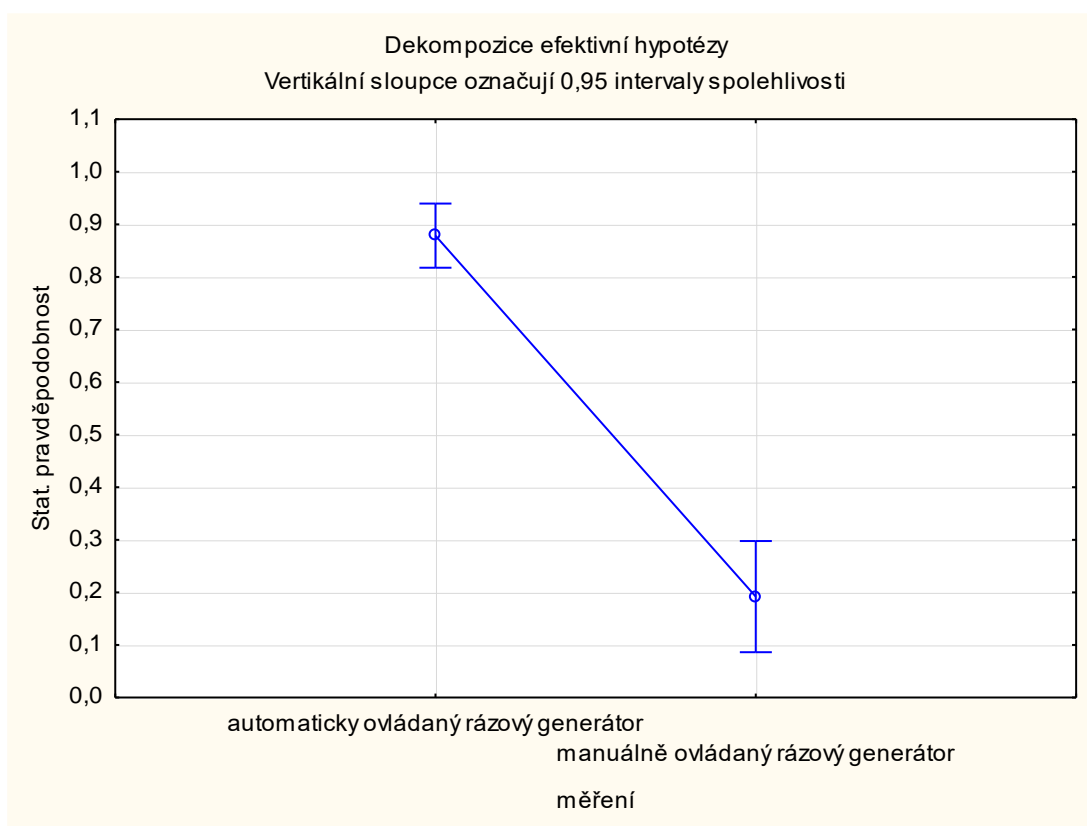
U (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Poč. přeskoků	
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	1
70	0	X	0	X	X	X	0	X	0	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
75	0	X	0	0	0	X	X	X	X	0	X	0	0	0	X	0	X	X	X	0	0	0	0	0	X	0	11
80	0	0	0	0	0	0	X	0	0	X	X	0	X	0	0	0	0	0	0	0	X	X	X	X	X	0	9
85	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	X	X	X	X	X	0	X	X	X	X	0	0	0	0	20

Tyto dva testy byly vyhodnoceny jako anomální. První sloupec ukazuje velikost amplitudy impulzního napětí, následující sloupce znázorňují, zda došlo na dané napěťové hladině k přeskoku (značeno X) nebo nikoliv (značeno 0). Z prvního uvedeného testu je podle celkového počtu přeskoků patrné, že dochází ke smíšenému rozdělení pravděpodobnosti přeskoků. Druhý test je charakterizován extrémním nárůstem počtu přeskoků mezi jednotlivými hladinami.

Další testování bylo zaměřeno na detailní prozkoumání těchto dvou testů. Nutno podotknout, že výše uvedené zkoušky probíhaly na odlišném rázovém generátoru s manuálním ovládáním a odlišným vyhodnocovacím zařízením. Vliv, který mohl zkreslit průkaznost měření mezi jednotlivými rázovými generátory, je odlišnost energie impulzů, který generuje rázový generátor. Zatímco energie manuálně ovládaného rázového generátoru je v závislosti na počtu použitých stupňů buď 8 kJ (v případě použití 4 stupňů) nebo 4 kJ (v případě použití 8 stupňů), automaticky ovládaný generátor HAEFELY SGS disponuje energií impulsu o velikosti 15 kJ při generování impulzního napětí všemi třemi stupni rázového generátoru. Určitý vliv při zkouškách pomocí manuálně ovládaného rázového generátoru mohl nastat vlivem samotného manuálního ovládání. I když velikost amplitudy byla kontrolována pomocí osciloskopu a nabíjecí napětí vrcholovým voltmetrem, mohlo k určité odchylce ve velikosti amplitudy dojít. V průběhu zkoušek je automaticky ovládaný rázový generátor přesnější díky automatickému triggeru, protože je podstatné mezi jednotlivými napěťovými impulzy zachovat stejnou časovou prodlevu, a

tím docílit stejného samoregeneračního efektu plynové náplně.

Výsledky testů, které byly za stejných podmínek provedené s časovým odstupem na automatickém rázovém generátoru HAEFELY SGS a vyhodnocovacím zařízením HAEFELY HIAS 743 byly odlišné oproti manuálně ovládanému generátoru v případě anomálních testů. Výsledky ze statistického vyhodnocení pomocí analýzy rozptylu charakterizuje *Graf 6*, ze kterého je zřejmá prokazatelná nehomogenita těchto měření. Detailní záznam provedených testů zobrazuje *příloha 1, 2, 3, 4, 6*.



Graf 6: Porovnání měření z roku 2014 s měřením z roku 2016

Pokud dojde k přímému porovnání jednotlivých sobě odpovídajících testů je zřejmé, že rozdíl u přeskovového napětí je téměř 20 kV. Hodnoceny byly ovšem nestandardně se chovající testy, které se chovají značně nehomogenně i v bezprostředně po sobě se opakujících zkouškách na stejném zařízení.

Následovaly další série testů, které se přiklonily k výsledkům prováděných na automaticky ovládaném rázovém generátoru. Toto podrobné testování vybraných zkoušek bylo provedeno tak, že manuálně ovládaný rázový generátor byl zapojen na automatické vyhodnocovací zařízení HAEFELY HIAS 743. Výsledky napěťových hladin, kde byly

očekávány přeskoky mezi elektrodami, ukazuje *Tabulka 6*. Výsledky manuálně ovládaného rázového generátoru se téměř překrývají s tím automaticky ovládaným. Z tohoto hlediska lze vyvrátit u provedených testů závislost na energii impulsu generovanou jednotlivými rázovými generátory.

Tabulka 6: Test (multi – level) zlomové napěťové hladiny použit starý rázový generátor a nové vyhodnocovací zařízení

Interní označení:	LI 80		
Datum měření:	25. 02. 2016		
Složení plynu:	95% N2 + 5% O2	Tlak plynu:	1,0 bar
Typ elektrod:	R4B	Vzdálenost elektrod:	40 mm

U (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Poč. přeskoků
40	0	0	0	0	0	0	X	0	0	X	X	X	0	0	0	0	X	X	0	0	X	0	0	X	0	8
45	X	X	X	X	0	0	X	X	X	X	0	X	0	X	X	X	0	0	0	X	X	0	X	X	0	16
50	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

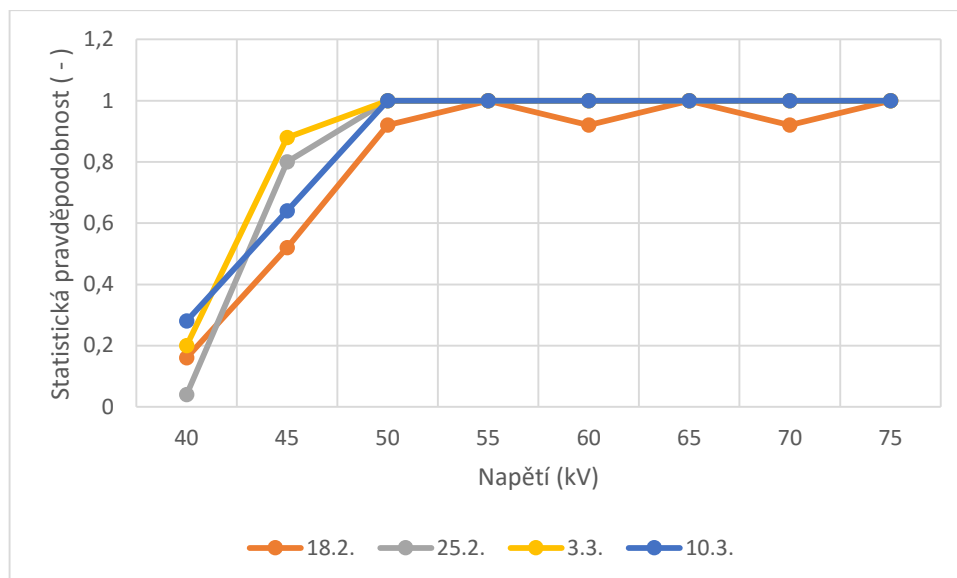
7.5 Statistické vyhodnocení výsledků testů

Statistické vyhodnocení výsledků testů bylo provedeno prostřednictvím popisných statistik a prostřednictvím analýzy rozptylu (ANOVA). Tyto metody byly použity při testování vlivu různých faktorů (vliv měření v jednotlivých dnech, vliv rozdílných amplitud, vliv použití různých plynů, vliv časového rozestupu mezi impulzními vlnami) na proměnnou statistická pravděpodobnost vzniku přeskoků.

7.5.1 Testy s elektrodovým systémem R4B o vzdálenosti 40mm

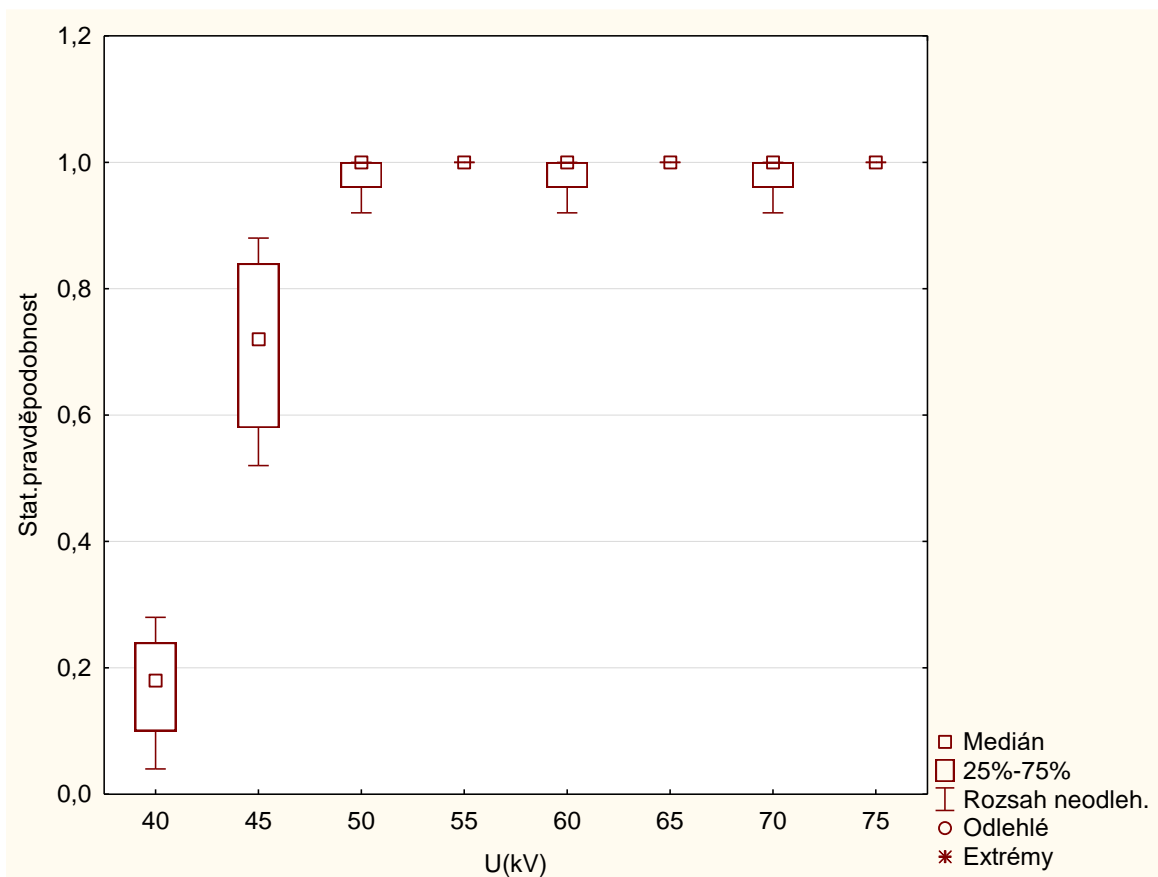
Pro jednotlivé impulzní napětí o dané amplitudě (40 kV – 75 kV) bylo provedeno vždy 25 rázových impulsů, a to ve čtyřech dnech (18. 2. 2016, 25. 2. 2016, 3. 3. 2016, 10. 3. 2016) detailní průběh testů je zaznamenán v *příloze 2, 3, 4, 6*. Dále byly zjištěny relativní četnosti respektive statistické pravděpodobnosti vzniku přeskoků (podíl absolutní četnosti přeskoků na celkovém počtu provedených rázových impulsů) při daných amplitudách.

Graf 7 znázorňuje vývoj těchto pravděpodobností v jednotlivých dnech pozorování.



Graf 7: Statistické pravděpodobnosti vzniku přeskoku v daných amplitudách v jednotlivých dnech pozorování

Souhrnné výsledky statistické pravděpodobnosti vzniku přeskoku uvádí Graf 8 ve kterém je znázorněn medián (prostřední hodnota) a horní a dolní kvartil experimentální dat sledovaných ve všech dnech.



Graf 8: Krabicový graf statistické pravděpodobnosti seskupený podle U(kV)

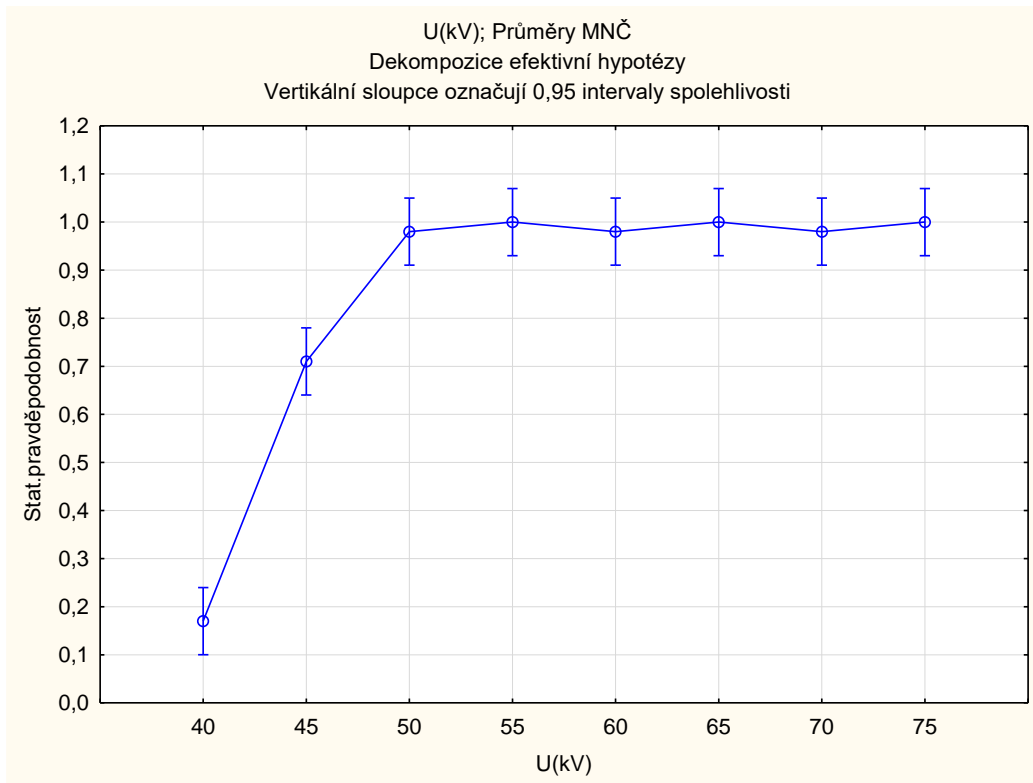
Je patrné, že při napětí 45kV jsou kvartily od sebe nejvíce vzdáleny, tj. při tomto napětí docházelo k největším rozdílům v četnosti přeskoků. Dále je zřejmé, že se zde nevyskytují žádná odlehlá pozorování a extrémní hodnoty.

Na podkladě testu ANOVA hlavních efektů provedené prostřednictvím statistického softwaru STATISTIKA byla dle očekávání prokázána statisticky významná rozdílnost při jednotlivých napětí zkoumaná v jednotlivých dnech (viz *Tabulka 7 a Graf 9*) Součástí výstupu ze softwaru je F test a hladina významnosti p. *Tabulka 7* umožňuje zároveň zjistit, jaká je pravděpodobnost vzniku přeskočů při daných amplitudách, například při napětí 40 kV je průměrná statistická pravděpodobnost vzniku přeskočů 17 %, dále je možné určit 95% interval spolehlivosti vzniku přeskočů tj. (10 %, 24 %) při tomto napětí. Obdobně je možné učinit tento závěr i při ostatních hodnotách napětí.

Tabulka 7: Statistické pravděpodobnosti vzniku přeskočů dekomponované pomocí testu ANOVA

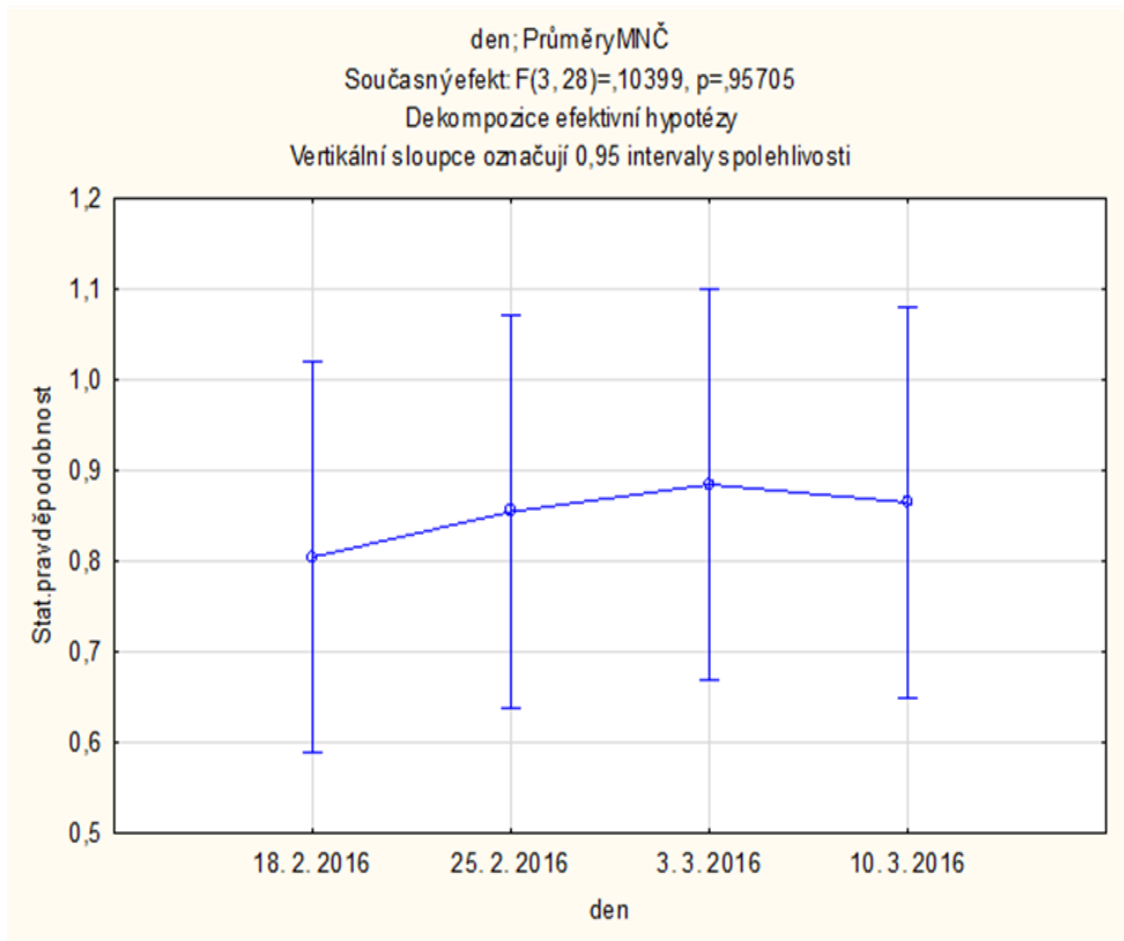
U(kV); Průměry MNČ, Současný efekt: F(7, 21)=76,129, p=0,000				
Dekompozice efektivní hypotézy				
U(kV)	Průměr	Směrodatná chyba	-95,00%	95,00%
40	0,170	0,034	0,100	0,240
45	0,710	0,034	0,640	0,780
50	0,980	0,034	0,910	1,050
55	1,000	0,034	0,930	1,070
60	0,980	0,034	0,910	1,050
65	1,000	0,034	0,930	1,070
70	0,980	0,034	0,910	1,050
75	1,000	0,034	0,930	1,070

Graf 9 zobrazuje průměrnou pravděpodobnost včetně 95% intervalů spolehlivosti a na první pohled je zřejmá odlišnost vzniku přeskočů při různých amplitudách.



Graf 9: Statistické pravděpodobnosti vzniku přeskoků dekomponované pomocí testu ANOVA (vliv napětí při jednotlivých dnech měření)

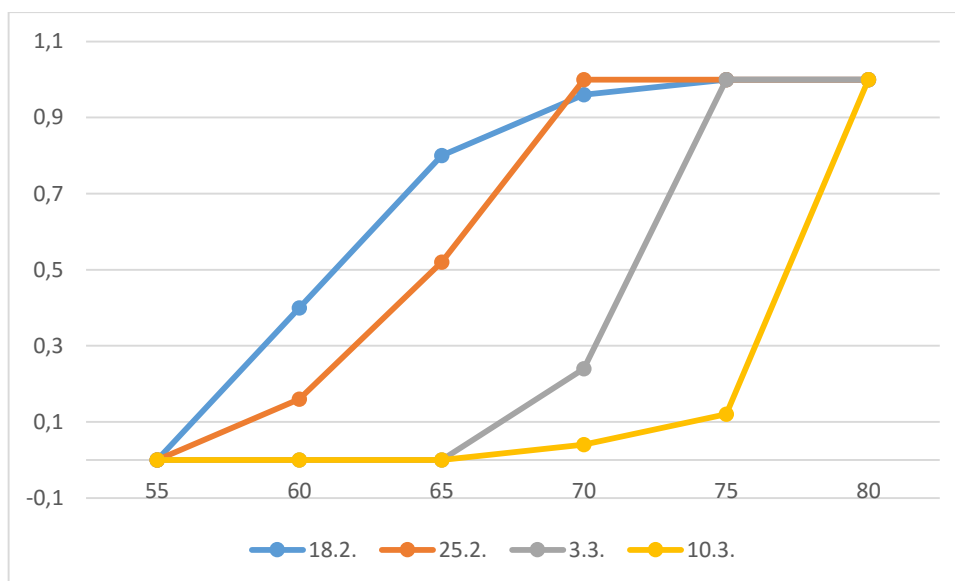
Prostřednictvím tohoto testu (ANOVA hlavních efektů) byla také testována rozdílnost statistické pravděpodobnosti vzniku přeskoků v jednotlivých dnech měření a při daných amplitudách. Na základě tohoto testu bylo prokázáno (Graf 10), že měření respektive statistická pravděpodobnost přeskoků přes jednotlivé dny je homogenní. Test prokázal statisticky nevýznamnou odlišnost v jednotlivých dnech měření ($p > 0,05$).



Graf 10: Statistické pravděpodobnosti vzniku přeskočů dekomponované pomocí testu ANOVA (vliv jednotlivých dnů měření při daných amplitudách)

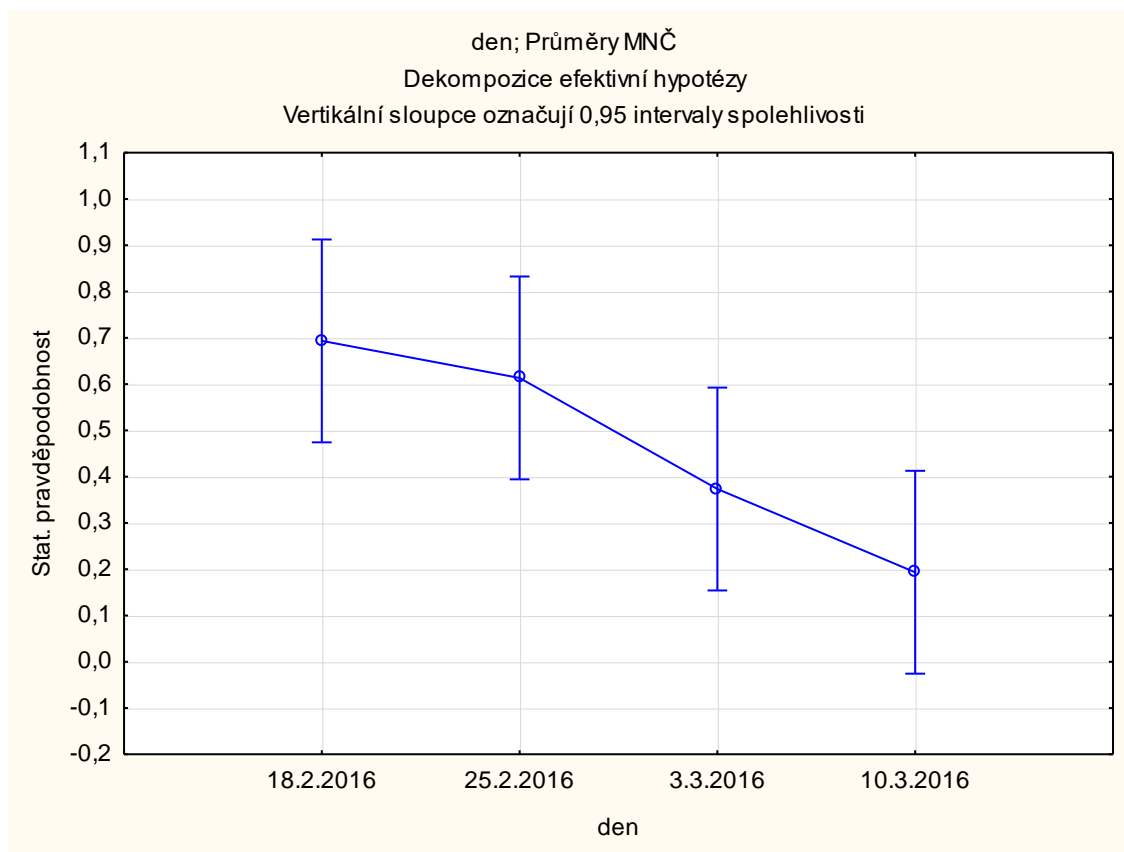
7.5.2 Testy s elektrodovým systémem R4B o vzdálenosti 60mm

Pro jednotlivé impulzní napětí o dané amplitudě (55 kV – 80 kV) bylo provedeno vždy 25 impulzů, a to opět ve čtyřech dnech měření (18. 2. 2016, 25. 2. 2016, 3. 3. 2016, 10. 3. 2016). Přesné průběhy testů jsou uvedeny v příloze 8, 10, 12, 13. Vypočtené relativní četnosti respektive statistické pravděpodobnosti vzniku přeskočů při daných amplitudách v jednotlivých dnech pozorování znázorňuje Graf 11.



Graf 11: Statistické pravděpodobnosti vzniku průrazu v daných amplitudách v jednotlivých dnech pozorování.

Z grafu 11 je patrné, že rozložení statistických pravděpodobností vzniku přeskočů je v jednotlivých dnech měření odlišné a tento závěr byl statisticky prokázán pomocí analýzy rozptylu (ANOVA hlavních efektů). Na základě tohoto testu bylo prokázáno (Graf 12), že měření respektive statistická pravděpodobnost přeskočů není přes jednotlivé dny homogenní. Test prokázal statisticky významnou odlišnost v jednotlivých dnech měření ($p < 0,05$).



Graf 12: Statistické pravděpodobnosti vzniku přeskočů v jednotlivých dnech dekomponované pomocí testu ANOVA

Tento fakt, z hlediska teoretických znalostí, není možné jednoznačně objasnit. Jako reálný závěr se jeví skutečnost, že elektroda o poloměru 4 mm je natolik oblá, že při elektrodové vzdálenosti 60 mm dochází vždy k různému rozložení elektrického pole. Objemový náboj, který vzniká v bezprostřední blízkosti záporného hrotu, se zřejmě vlivem oblé elektrody nechová pokaždé stejně a jeho nelineární rozložení může vést k neregulárnímu statistickému rozložení pravděpodobností v jednotlivých dnech měření.

Další vlivy jako teplota okolního prostředí, vlhkost a tlak nemohly mít na provedené experimentální měření prakticky žádný vliv a to z toho důvodu, že se testovaný objekt nacházel v hermeticky uzavřeném prostoru.

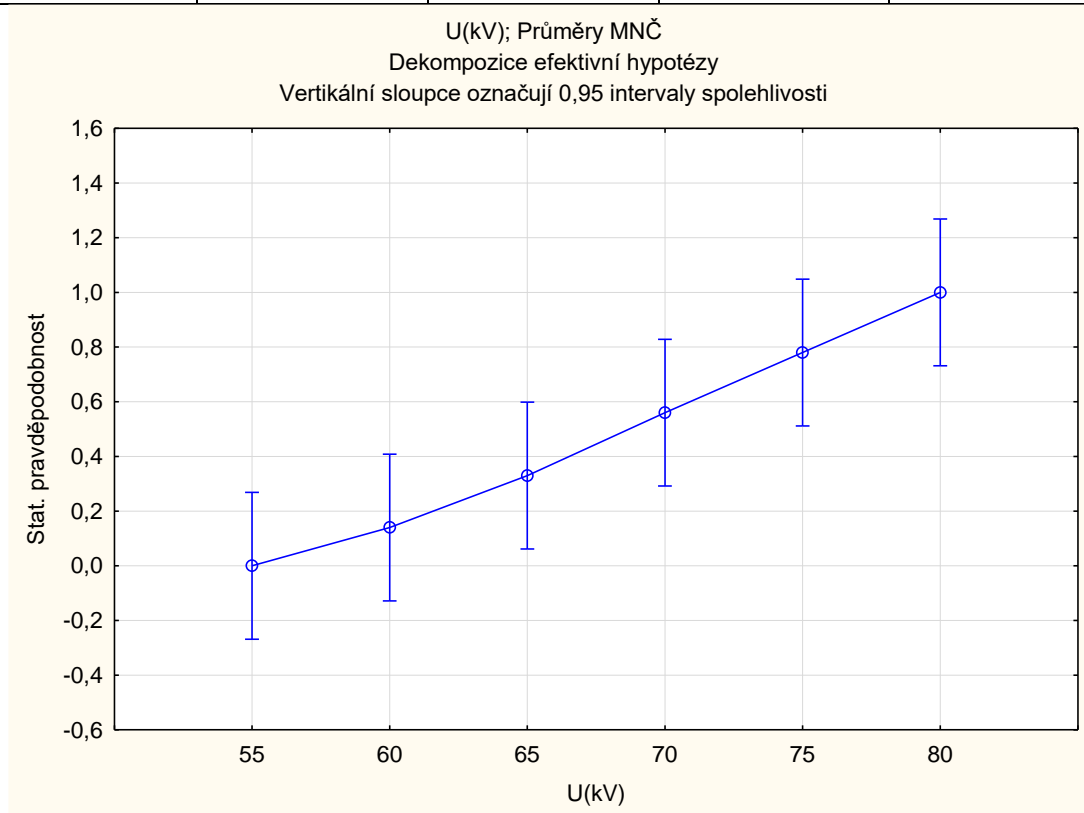
Jako další ovlivňující faktor by bylo možné uvést stáří plynové náplně respektive jeho degradace při množství provedených testů. Plynová náplň má jistou samoregenerační schopnost v závislosti na rychlosti rekombinace, ale v případě opakovaných přeskočů v mediu dochází k jisté nenávratné degradaci izolačního média. Tuto skutečnost nelze opět jednoznačně potvrdit, protože teoreticky by při větší degradaci plynu (starší náplni) mělo docházet k přeskočům na nižší napěťové hladině, ale to naprosto vylučuje test provedený 3. 3. 2016, který byl uskutečněn s plynem již značně zatíženým předchozím testováním.

Výsledky poukazují, že k přeskočení napětí dochází o dvě napěťové hladiny výše, než u plynu, který byl degradován méně (25. 2. 2016). Test prováděný (10. 3. 2016) byl uskutečněn s nově napuštěnou náplní a v porovnání s testem provedeným (3. 3. 2016) se napěťové hladiny, kdy dochází k přeskočení, opět posunuly výše. Vliv degradace izolační plynové náplně nelze potvrdit.

Reprodukovatelnost zkoušek je tedy s ohledem na provedené experimentální měření v tomto seskupení elektrod značně složitá a nelze jednoznačně stanovit určitý závěr.

Tabulka 8: Statistické pravděpodobnosti vzniku přeskočení dekomponované pomocí testu ANOVA

U(kV); Průměry MNČ (Tabulka1) Současný efekt: $F(5, 15)=9,2640$, $p=0,00035$ Dekompozice efektivní hypotézy				
U(kV)	Stat. pravděpodobnost Průměr	Stat. pravděpodobnost Sm.Ch.	Stat. pravděpodobnost -95,00%	Stat. pravděpodobnost 95,00%
55	0	0,126	-0,268	0,268
60	0,14	0,126	-0,128	0,408
65	0,33	0,126	0,062	0,598
70	0,56	0,126	0,292	0,828
75	0,78	0,126	0,512	1,048
80	1	0,126	0,732	1,268

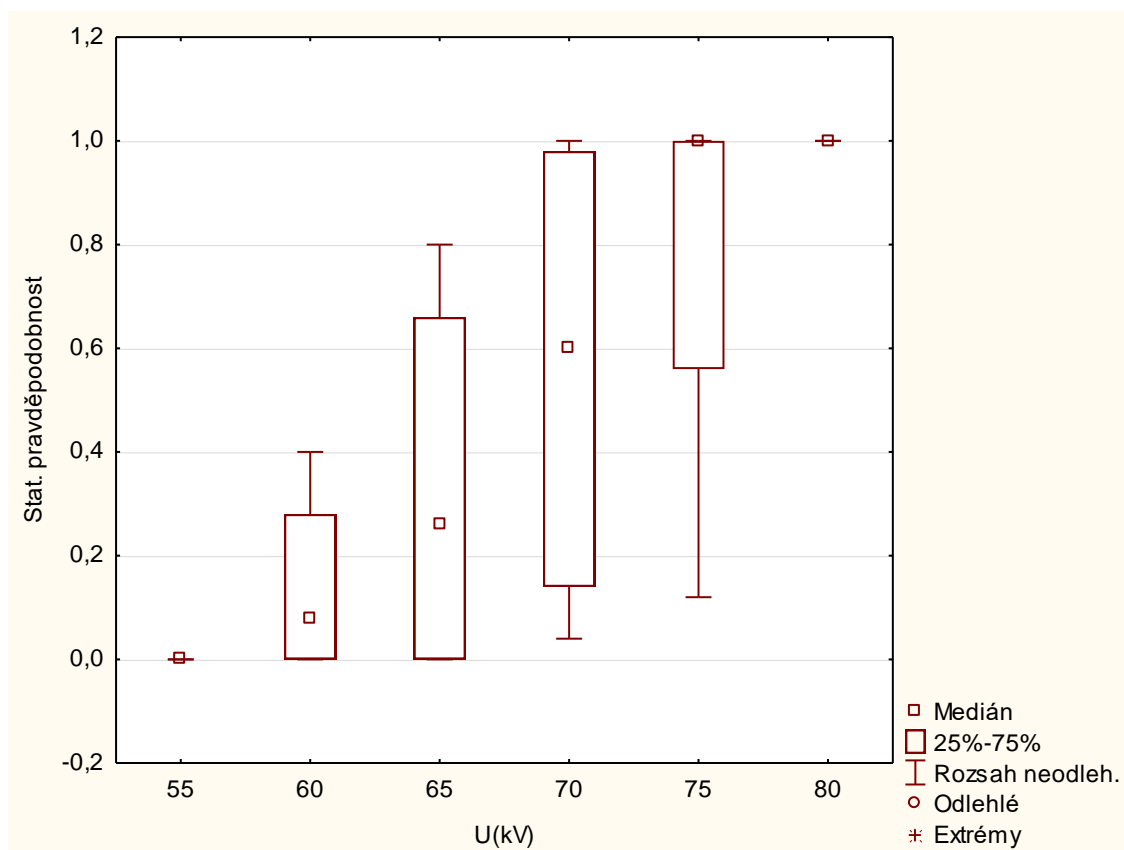


Graf 13: Statistická pravděpodobnost vzniku přeskočení na jednotlivých napěťových hladinách

Statistickou pravděpodobnost vzniku přeskočení na jednotlivých napěťových hladinách

zobrazuje *Tabulka 8 a Graf 13*.

Krabicový graf znázorňuje popisné charakteristiky experimentálních dat (*Graf 14*). Z tohoto grafu je patrné, že největší odchylky vzniku přeskoku jsou na napěťových hladinách 65 a 70 kV. V průběhu testování v jednotlivých dnech byly hladiny 65 a 75 kV nejvíce nespolehlivé v počtu uskutečněných přeskoců. Záznam provedených testů je přiložen v *příloze 8, 10, 12, 13*.

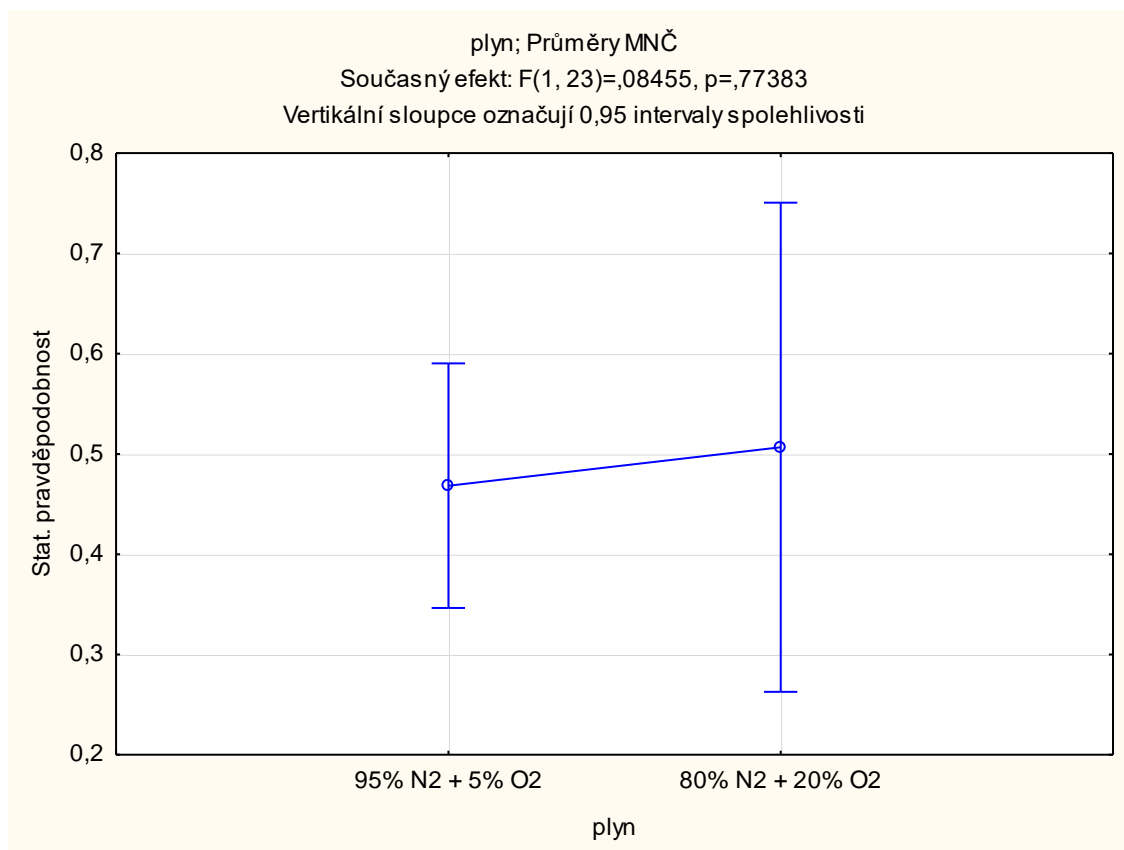


Graf 14: Rozdílnost pravděpodobnosti přeskoku zobrazené pomocí krabicového grafu

Dalším zkoumaným faktorem byl vliv rozdílnosti plynové náplně hermeticky uzavřené komory na přeskokové napětí. Provedený test ANOVA hlavních efektů ukazuje, že použití rozdílných plynů nevede ke statisticky významné odlišnosti vzniku průrazu ($p > 0,05$). Tento fakt znázorňuje *Tabulka 9 a Graf 15*.

Tabulka 9: Statistická pravděpodobnost vzniku přeskočků s rozdílnou plynovou náplní dekomponováno pomocí ANOVA testu

plyn; Průměry MNČ Současný efekt: $F(1, 23)=0,08455$, $p=0,77383$ Dekompozice efektivní hypotézy				
Plyn	Stat. pravděpodobnost Průměr	Stat. pravděpodobnost Sm.Ch.	Stat. pravděpodobnost -95%	Stat. pravděpodobnost 95%
95% N ₂ + 5% O ₂	0,468	0,059	0,346	0,590
80% N ₂ + 20% O ₂	0,507	0,118	0,263	0,751



Graf 15 Statistická pravděpodobnost vzniku přeskočků při odlišnosti plynové náplně

Vliv plynu má na přeskočkové napětí určitý vliv, ale z experimentálně provedených testů za použití plynů o stejném látkovém složení pouze za jiného poměru obsahu jednotlivého plynu nelze konstatovat statisticky významný vliv na přeskočkové napětí.

Vzhledem k četnosti testů, které byly provedeny, nelze brát tento fakt za naprosto jednoznačný. K naprosto jednoznačné interpretaci by bylo možné dospět až při vícenásobném opakování testu s plynem o obsahu 80% dusíku a 20% kyslíku, který byl proveden pouze jednou. Záznamy přesného průběhu testování ukazuje příloha 14.

7.5.3 Ověření časové závislosti

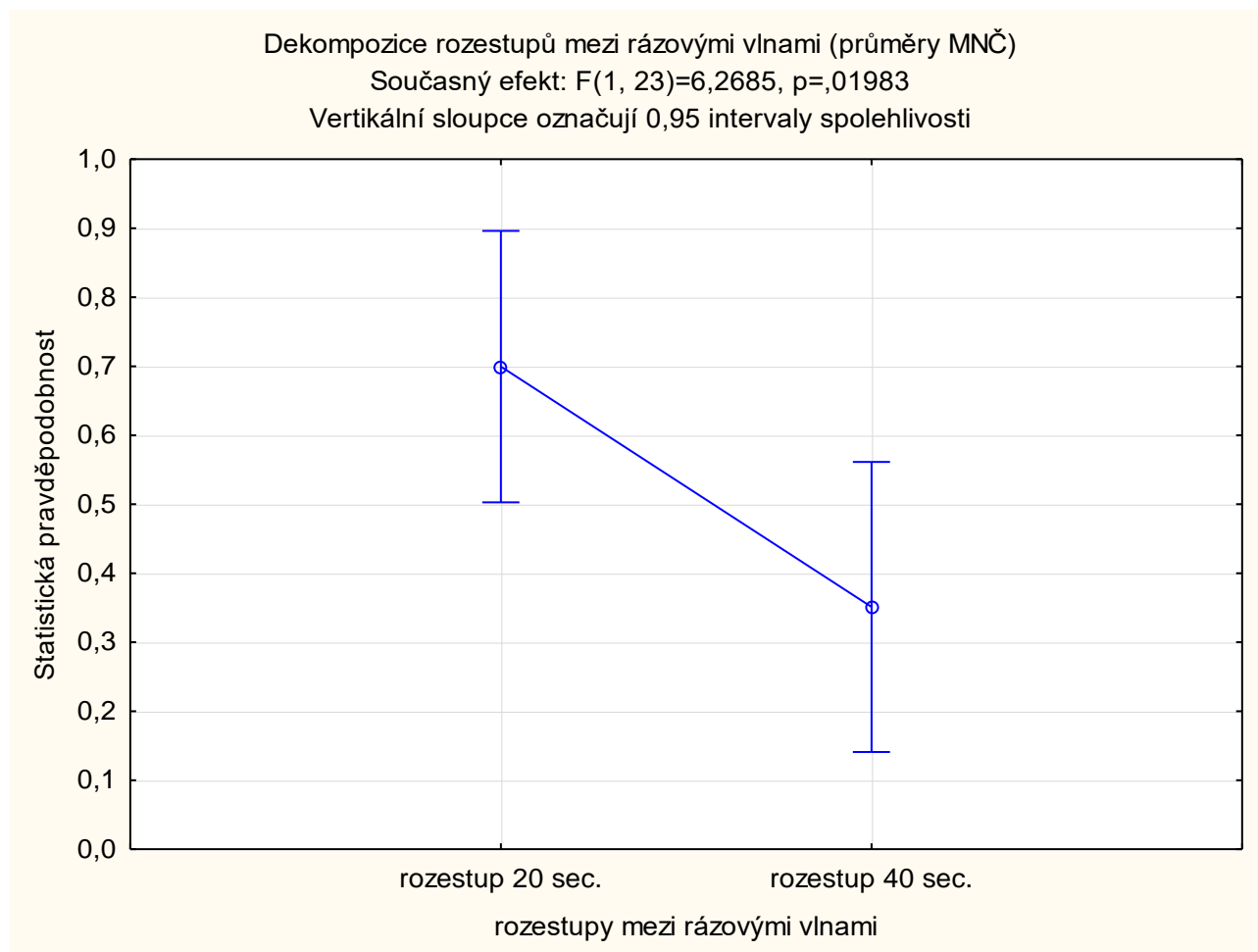
Dosud uvedené testy byly provedeny s 20 s časovým odstupem mezi jednotlivými rázovými vlnami. Průkaznost měření bylo vhodné ještě ověřit porovnáním s testem o delším časovém odstupu mezi rázovými výboji. Pro porovnání byl s ohledem na časovou náročnost prováděných testů vybrán test s 60 mm vzdáleností elektrod. Srovnání bylo provedeno tak, že ze všech uvedených testů provedených v roce 2016 v seskupení elektrod R4B a vzdáleností elektrod 60 mm s plynovou náplní obsahující 5% kyslíku a 95% dusíku byl proveden průměr, a ten byl porovnán s testem provedeným za stejných podmínek s časovým odstupem 40 s mezi jednotlivými výboji.

Tímto porovnáním by v ideálním případě mohl být vyloučen vliv zbytkového prostorového náboje mezi elektrodami v plynové náplni. Na druhou stranu je třeba říci, že pro jednoznačné rozhodnutí o časové závislosti by bylo potřeba provést test s větší časovou prodlevou vícekrát.

Tabulka 10: Statistická pravděpodobnost vzniku přeskočků s rozdílným časovým rozestupem mezi rázovými vlnami dekomponováno pomocí ANOVA testu

Dekompozice rozestupů mezi rázovými vlnami při různých amplitudách (Průměry MNČ) Současný efekt: $F(1, 23)=6,2685$, $p=,01983$					
Rozestupy mezi rázovými vlnami	Průměr	Směrodatná chyba	-95,00%	+95,00%	N
rozestup 20 sec.	0,699444	0,095042	0,502835	0,896054	24
rozestup 40 sec.	0,351111	0,101604	0,140927	0,561295	9

Na základě testu ANOVA hlavních efektů bylo prokázáno (*Tabulka 10, Graf 16*), že statistická pravděpodobnost vzniku přeskočků není homogenní při rozdílných rozestupech mezi impulzními vlnami. Test tedy prokázal statisticky významnou odlišnost při rozestupech mezi impulzními vlnami 20 s a 40 s ($p<0,05$).



Graf 16 Statistická pravděpodobnost vzniku průrazu s rozdílným časovým rozestupem mezi rázovými vlnami

Výsledky, kterých bylo dosaženo v této kapitole lze označit za neočekávané, a zcela průkazné z důvodu hodnocení zkoušeného prvku v uskupení, kde je sporná interpretovatelnost testů. Zbytkový náboj, jak výsledky napovídají, může mít určitý vliv na velikost amplitudy přeskokového napětí. Při prodloužení časového rozestupu mezi impulzními vlnami dochází k posunutí hranice přeskokového napětí na vyšší hladinu. Příloha 15 pak zachycuje přesný průběh zkoušky, kde byla hodnota, na které docházelo, ze všech přivedených impulzů k přeskokům 95 KV. To je znatelně více než při jakémkoliv z dříve provedených testů viz příloha 8, 10, 12, 13.

Závěr

Cílem práce bylo blíže specifikovat výsledky a ověřit reprodukovatelnost zkoušek impulzním napětím. Zkušební testy byly prováděny dle normou stanovených pravidel a pomocí atmosférického impulzního namáhání napětí vlnou 1,2/50.

Práce se nejprve zabývá fyzikálními pochody při výstavbě elektrického výboje v plynové náplni za předpokladu nehomogenního pole. Z této části diplomové práce vyplývá, že v potaz při hodnocení reprodukovatelnosti testů impulzním napětím musí být bráno několik na sobě nezávislých faktorů, a to stupeň nehomogenity elektrického pole, s nímž úzce souvisí tvar použitých elektrod, dále pak vzdálenost elektrod, tlak a složení atmosféry mezi elektrodami. Rozhodujícím faktorem je pak samotné napětí přikládáné na zkoušený prvek. Hodnotí se nejenom amplituda, ale i tvar impulzu. Teoretická část nadále obsahuje statistický náhled na hodnocení testů impulzním napětím. Statistický způsob hodnocení je výhodný zejména z důvodu ne zcela fyzikálně vysvětlitelným výsledkům v průběhu měření obsáhlé škály testů.

Na podkladech teoretické části bylo vybráno v rámci probíhajícího projektu měření impulzního napětí několik obtížně reprodukovatelných testů. Zkoušky byly provedené normou definovaným postupem, jednalo se o zkoušky více hladinami. Špatná reprodukovatelnost se projevila pouze v některých seskupení zkoušeného prvku. Zejména se jednalo o sestavení elektrod, z nichž jedna byla vybavena hrotem o poloměru 4 mm a druhá byla kulového typu o průměru 150 mm při elektrodové vzdálenosti 40 mm a 60 mm. Obtížná reprodukovatelnost se vyznačovala nehomogenitou opakovaných výsledků, dále pak smíšeným rozdělením pravděpodobnosti přeskoků a extrémním nárůstem počtu přeskoků na jednotlivých po sobě jdoucích napětíových hladin. Na základě teoreticky získaných znalostí byly definovány čtyři hypotézy, které byly následně detailně ověřovány.

První analyzovaná hypotéza byla: „**Rozdílné rázové generátory mohou mít vliv na počet přeskoků na napětíových hladinách**“. Rozdílnost generátorů byla hodnocena z hlediska energie impulzu. Výsledky z prováděných experimentálních zkoušek byly hodnoceny prostřednictvím statistických metod a prokázaly, že energie impulzu neměla z hlediska reprodukovatelnosti žádný významný vliv.

Nejzajímavějších poznatků bylo dosaženo v případě ověřování druhé hypotézy: „**Opakování identických zkoušek za stejných podmínek v jednotlivých dnech měření nemá vliv na počet přeskoků na napětíových hladinách**“. Na základě statistické analýzy

bylo prokázáno, že při elektrodové vzdálenosti 40 mm lze označit experimentální zkoušky za homogenní přes jednotlivé dny měření, ale v případě navýšení elektrodové vzdálenosti na 60 mm už nelze výsledky jednoznačně interpretovat. Při této vzdálenosti je statisticky potvrzena významná nehomogenita napěťových hladin, kdy docházelo k přeskokům v jednotlivých dnech měření.

Třetí hodnocená hypotéza byla: „**Rozdílná plynová náplň při stejném seskupení elektrod může mít vliv na počet přeskoků na jednotlivých hladinách**“. V úvahu byla brána i možnost, že plyn, na kterém se provádělo více zkoušek, mohl být trvale nebo dočasně degradovaný. Degradovaný plyn by se v tom případě musel projevit i v případě elektrodové vzdálenosti 40 mm, a to nebylo prokázáno. Rozhodující faktor pak musí být jiný. V seskupení elektrod může zřejmě mít významný vliv tvar hrotové elektrody, která je již natolik oblá, že může docházet k různému rozložení prostorového náboje, což může mít přímý vliv při určitých vzdálenostech na výstavbu výboje. Další směr experimentálního výzkumu by se měl zabírat určením kritického rozmezí vzdáleností, ve kterém není možné výsledky jednoznačně interpretovat a to jak v závislosti na stupni nehomogenity pole, tak tvaru elektrod. Samotná reprodukovatelnost pak může být ovlivněna i velmi rychlými pochody v případě impulzního namáhání.

V případě hodnocení vlivu rozdílné plynové náplně na interpretovatelnost zkoušek bylo dosaženo následujících zjištění. Statisticky nebyl prokázán zásadní vliv mezi plynem s obsahem 95% dusíku a 5% kyslíku a plynem s obsahem 80% dusíku a 20% kyslíku na počet přeskoků na testovaných napěťových hladinách. Experimentální výzkum by se měl v tomto směru dále zaměřit na testování vlivu použité atmosféry v případě uspořádání testovaného prvku, kde je interpretovatelnost jednoznačná.

Čtvrtá testovaná hypotéza byla stanovena takto: „**Prodloužení časového intervalu mezi jednotlivými impulzy by nemělo ovlivnit počet přeskoků**“.

V případě 60 mm elektrodové vzdálenosti byla zkoumána časová závislost prováděných testů. Statisticky zde byla prokázána neshoda výsledků prováděných s časovým rozestupem 20 s a 40 s mezi impulzními vlnami. V rámci zpracovávaného projektu byla časová závislost již hodnocena a výsledky neprokazovaly rozdílné chování při odlišných časových intervalech. Dalším výzkumu by bylo vhodné se zabývat hodnocením časové závislosti na seskupení testovaného objektu ještě s jinou elektrodovou vzdáleností.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] **Hindls, Richard, a Hronová Stanislava Novák Ilja.** *Analýza dat v manažerském rozhodování.* Praha : Grada Publishing, 1999. ISBN 80-7169-255-7.
- [2] **Veverka, Antonín.** *Technika vysokého napětí.* Praha : SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1978. ISBN 04-512-78.
- [3] **Olthoff, Loucas G. Christophorou and James K.** *Gaseous Dielectrics 9.* New York : Kluwer Academic, 2001. ISBN 0-306-46705-4.
- [4] **Rusňák, Karel.** *Plazma – 4. skupenství látky.* [Online] [Citace: 2. 3 2016.] http://home.zcu.cz/~rusnakk/AFY_v2.pdf
- [5] **Laurenc, Jiří.** *přednášky z předmětu Technika vysokého napětí.* Plzeň, 2010.
- [6] **Kuffel, E. Kuffel and W. S. Zaengl and J.** *High Voltage Engineering.* Madras : Butterworth-Heinemann, 1984. ISBN-0-7506-3634-3.
- [7] *Měření elektrické pevnosti vzduchu v silně nehomogenním poli Vliv polarity; vliv bariéry.* [Online] [Citace: 6. 3 2016.] https://courseware.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=18888.
- [8] **Whitehead, S.** *Dielectric Breakdown of solids.* Oxford : Clarendon Press, 1951. pokusy chytrák. [Online] [Citace: 15. 2 2016.] <http://www.pokusy.chytrak.cz/pokusy/VTTCIII.htm>.
- [9] *Pokusy chytrák.* [Online] [Citace: 15. 2 2016.] <http://www.pokusy.chytrak.cz/pokusy/VTTCIII.htm>
- [10] **Reichl Jaroslav, Všetečka Martin.** *Encyklopedie Fyziky.* [Online] [Citace: 1. 5 2016.] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/222-elektricke-pole-elektricka-intenzita>.
- [11] **ČSN EN, 60060-1.** *Technika zkoušek vysokým napětím: Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky.* Praha : Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, srpen 2011.
- [12] **Faser, Kurt.** *Influence of the Pre-Discharge on breakdown Behaviour of the Negative Rod-Plane Spark-Gap at Standard 1,2/50 Impulse Voltage.* [Online] 1971. [Citace: 12. 3 2016.] <http://www.haefely.com/pdf/scientific/e1-11.pdf>.
- [13] *Haefely-hipotronics.* [Online] Haefely. [Citace: 21. 3 2016.] <http://www.haefely-hipotronics.com/>.

- [14] **Hebák, Petr.** *Vicerozměrné statistické metody*. Praha : Professional Publishing, 2007. ISBN 978-80-7333-056-9.
- [15] **Hindls, Petr.** *Statistika pro ekonomii*. Praha : Professional Publishing, 2007. ISBN 978-80-86946-43-6.
- [16] *Analýza rozptylu (ANOVA)*. [Online] [Citace: 25. 3 2016.]
<http://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn3/ANOVA.htm>.
- [17] *Měření elektrické pevnosti vzduchu v silně nehomogenním poli. Vliv polarity; vliv bariéry*. [Online] [Citace: 7. 3 2016.]
https://courseware.zcu.cz/wps/PA_Courseware/DownloadDokumentu?id=18888.

Přílohy

<i>PŘÍLOHA 1: TEST (MULTI – LEVEL) PROVEDENÝ NA STARÉM RÁZOVÉM GENERÁTORU S PŮVODNÍM MĚŘÍCÍM ZAŘÍZENÍM, ČASOVÁ PRODLEVA MEZI IMPULZY 20 S</i>	<i>1</i>
<i>PŘÍLOHA 2: TEST (MULTI – LEVEL) PROVEDENÝ NA NOVÉM RÁZOVÉM GENERÁTORU S NOVÝM MĚŘÍCÍM ZAŘÍZENÍM, ČASOVÁ PRODLEVA MEZI IMPULZY 20 S</i>	<i>1</i>
<i>PŘÍLOHA 3: TEST (MULTI – LEVEL) PROVEDENÝ NA NOVÉM RÁZOVÉM GENERÁTORU S NOVÝM MĚŘÍCÍM ZAŘÍZENÍM, ČASOVÁ PRODLEVA MEZI IMPULZY 20 S</i>	<i>2</i>
<i>PŘÍLOHA 4: TEST (MULTI – LEVEL) PROVEDENÝ NA NOVÉM RÁZOVÉM GENERÁTORU S NOVÝM MĚŘÍCÍM ZAŘÍZENÍM, ČASOVÁ PRODLEVA MEZI IMPULZY 20 S, V KOMOŘE NAPUŠTĚN NOVÝ PLYN.....</i>	<i>2</i>
<i>PŘÍLOHA 5: TEST (MULTI – LEVEL) PROVEDENÝ NA NOVÉM RÁZOVÉM GENERÁTORU S NOVÝM MĚŘÍCÍM ZAŘÍZENÍM, ČASOVÁ PRODLEVA MEZI IMPULZY 20 S, OKAMŽITÉ OPAKOVÁNÍ PŘEDEŠLÉHO TESTU</i>	<i>3</i>
<i>PŘÍLOHA 6: TEST (MULTI – LEVEL) PROVEDENÝ NA NOVÉM RÁZOVÉM GENERÁTORU S NOVÝM MĚŘÍCÍM ZAŘÍZENÍM, ČASOVÁ PRODLEVA MEZI IMPULZY 20 S, V KOMOŘE NAPUŠTĚN NOVÝ PLYN.....</i>	<i>3</i>
<i>PŘÍLOHA 7: TEST (MULTI – LEVEL) PROVEDENÝ NA STARÉM RÁZOVÉM GENERÁTORU S PŮVODNÍM MĚŘÍCÍM ZAŘÍZENÍM, ČASOVÁ PRODLEVA MEZI IMPULZY 20 S</i>	<i>4</i>
<i>PŘÍLOHA 8: TEST (MULTI – LEVEL) PROVEDENÝ NA NOVÉM RÁZOVÉM GENERÁTORU S NOVÝM MĚŘÍCÍM ZAŘÍZENÍM, ČASOVÁ PRODLEVA MEZI IMPULZY 20 S</i>	<i>4</i>
<i>PŘÍLOHA 9: : TEST (MULTI – LEVEL) PROVEDENÝ NA STARÉM RÁZOVÉM GENERÁTORU S PŮVODNÍM MĚŘÍCÍM ZAŘÍZENÍM, ČASOVÁ PRODLEVA MEZI IMPULZY 20 S, OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI PŮVODNÍ INSTRUMENTACE</i>	<i>5</i>
<i>PŘÍLOHA 10: TEST (MULTI – LEVEL) PROVEDENÝ NA NOVÉM RÁZOVÉM GENERÁTORU S NOVÝM MĚŘÍCÍM ZAŘÍZENÍM, ČASOVÁ PRODLEVA MEZI IMPULZY 20 S</i>	<i>5</i>
<i>PŘÍLOHA 11: TEST (MULTI – LEVEL) PROVEDENÝ NA STARÉM RÁZOVÉM GENERÁTORU ZAPOJENÍ 8 STUPEŇŮ S NOVÝM MĚŘÍCÍM ZAŘÍZENÍM, ČASOVÁ PRODLEVA MEZI IMPULZY 20 S, OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI PŮVODNÍ INSTRUMENTACE</i>	<i>5</i>
<i>PŘÍLOHA 12: TEST (MULTI – LEVEL) PROVEDENÝ NA NOVÉM RÁZOVÉM GENERÁTORU S NOVÝM MĚŘÍCÍM ZAŘÍZENÍM, ČASOVÁ PRODLEVA MEZI IMPULZY 20 S, V KOMOŘE NAPUŠTĚN NOVÝ PLYN.....</i>	<i>6</i>
<i>PŘÍLOHA 13: TEST (MULTI – LEVEL) PROVEDENÝ NA NOVÉM RÁZOVÉM GENERÁTORU S NOVÝM MĚŘÍCÍM ZAŘÍZENÍM, ČASOVÁ PRODLEVA MEZI IMPULZY 20 S</i>	<i>6</i>
<i>PŘÍLOHA 14: TEST (MULTI – LEVEL) PROVEDENÝ NA NOVÉM RÁZOVÉM GENERÁTORU S NOVÝM MĚŘÍCÍM ZAŘÍZENÍM, ČASOVÁ PRODLEVA MEZI IMPULZY 20 S, ROZDÍLNÁ PLYNOVÁ NÁPLŇ</i>	<i>7</i>
<i>PŘÍLOHA 15: TEST (MULTI – LEVEL) PROVEDENÝ NA NOVÉM RÁZOVÉM GENERÁTORU S NOVÝM MĚŘÍCÍM ZAŘÍZENÍM, ČASOVÁ PRODLEVA MEZI IMPULZY 40 S, OVĚŘENÍ ČASOVÉ ZÁVISLOSTI .</i>	<i>7</i>
<i>PŘÍLOHA 16: PŘÍKLAD PROTOKOLŮ IMPULZNÍCH ZKOUŠEK VYHODNOCENÝCH POMOCÍ IMPULZNÍHO ANALYZÁTORU HIAS 743.....</i>	<i>8</i>

Přílohy

Testy s elektrodovým systémem R4B o vzdálenosti 40mm

Příloha 1: Test (multi – level) provedený na starém rázovém generátoru s původním měřicím zařízením, časová prodleva mezi impulzy 20 s

Interní označení:	LI 80		
Datum měření:	02. 06. 2014		
Složení plynu:	95% N2 + 5% O2	Tlak plynu:	1,0 bar
Typ elektrod:	R4B	Vzdálenost elektrod:	40 mm

U (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Poč. přeskoků
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	1
70	0	X	0	X	X	X	0	X	0	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
75	0	X	0	0	0	X	X	X	X	0	X	0	0	0	X	0	X	X	X	0	0	0	0	X	0	11
80	0	0	0	0	0	0	X	0	0	X	X	0	X	0	0	0	0	0	0	0	X	X	X	X	X	9
85	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	X	X	X	X	X	0	X	X	X	X	0	0	0	20

Příloha 2: Test (multi – level) provedený na novém rázovém generátoru s novým měřicím zařízením, časová prodleva mezi impulzy 20 s

Interní označení:	LI 80		
Datum měření:	25. 02. 2016		
Složení plynu:	95% N2 + 5% O2	Tlak plynu:	1,0 bar
Typ elektrod:	R4B	Vzdálenost elektrod:	40 mm

U (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Poč. přeskoků
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	1
45	X	X	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	X	X	X	0	X	X	0	X	0	X	20
50	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
55	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
60	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
65	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
70	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

Příloha 3: Test (multi – level) provedený na novém rázovém generátoru s novým měřicím zařízením, časová prodleva mezi impulzy 20 s

Interní označení:	LI 80		
Datum měření:	18. 02. 2016		
Složení plynu:	95% N2 + 5% O2	Tlak plynu:	1,0 bar
Typ elektrod:	R4B	Vzdálenost elektrod:	40 mm

U (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Poč. přeskoků	
40	X	0	0	0	0	X	X	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	
45	0	X	X	0	X	0	0	X	X	0	0	X	X	0	0	X	0	X	X	0	0	X	X	X	X	0	13
50	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	X	X	X	X	X	X	X	X	23
55	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	X	25
60	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	X	X	X	X	X	0	X	X	X	X	X	X	X	X	23
65	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	X	25
70	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	X	X	23
75	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	X	25

Příloha 4: Test (multi – level) provedený na novém rázovém generátoru s novým měřicím zařízením, časová prodleva mezi impulzy 20 s, v komoře napuštěn nový plyn

Interní označení:	LI 80		
Datum měření:	03. 03. 2016		
Složení plynu:	95% N2 + 5% O2	Tlak plynu:	1,0 bar
Typ elektrod:	R4B	Vzdálenost elektrod:	40 mm

U (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Poč. přeskoků	
40	0	X	0	0	0	X	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	X	0	0	0	5	
45	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	0	X	X	X	X	X	0	X	X	X	X	X	X	22
50	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	X	25
55	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	X	25
60	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	X	25

Příloha 5: Test (multi – level) provedený na novém rázovém generátoru s novým měřicím zařízením, časová prodleva mezi impulzy 20 s, okamžité opakování předešlého testu

Interní označení:	LI 80		
Datum měření:	03. 03. 2016		
Složení plynu:	95% N2 + 5% O2	Tlak plynu:	1,0 bar
Typ elektrod:	R4B	Vzdálenost elektrod:	40 mm

U (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Poč. přeskoků
40	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
45	X	X	X	0	X	X	0	X	X	0	X	X	X	0	X	0	X	X	X	0	0	X	0	X	X	17
50	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
55	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
60	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

Příloha 6: Test (multi – level) provedený na novém rázovém generátoru s novým měřicím zařízením, časová prodleva mezi impulzy 20 s, v komoře napuštěn nový plyn

Interní označení:	LI 80		
Datum měření:	10. 03. 2016		
Složení plynu:	95% N2 + 5% O2	Tlak plynu:	1,0 bar
Typ elektrod:	R4B	Vzdálenost elektrod:	40 mm

U (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Poč. přeskoků
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	X	0	0	X	0	0	0	0	0	0	X	X	X	0	X	7
45	X	X	X	0	0	X	X	X	0	X	X	X	X	X	0	X	0	X	X	X	X	0	0	0	0	16
50	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
55	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

Testy s elektrodovým systémem R4B o vzdálenosti 60mm

Příloha 7: Test (multi – level) provedený na starém rázovém generátoru s původním měřicím zařízením, časová prodleva mezi impulzy 20 s

Interní označení:	LI 81		
Datum měření:	02. 06. 2014		
Složení plynu:	95% N2 + 5% O2	Tlak plynu:	1,0 bar
Typ elektrod:	R4B	Vzdálenost elektrod:	60 mm

U (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Poč. přeskoků
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	1
70	0	X	0	X	X	X	0	X	0	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
75	0	X	0	0	0	X	X	X	X	0	X	0	0	0	X	0	X	X	X	0	0	0	0	X	0	11
80	0	0	0	0	0	0	X	0	0	X	X	0	X	0	0	0	0	0	0	0	X	X	X	X	X	9
85	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	X	X	X	X	X	0	X	X	X	X	0	0	0	20

Příloha 8: Test (multi – level) provedený na novém rázovém generátoru s novým měřicím zařízením, časová prodleva mezi impulzy 20 s

Interní označení:	LI 81		
Datum měření:	18. 02. 2016		
Složení plynu:	95% N2 + 5% O2	Tlak plynu:	1,0 bar
Typ elektrod:	R4B	Vzdálenost elektrod:	60 mm

U (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Poč. přeskoků
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	X	X	X	0	0	0	0	X	X	X	0	0	0	X	0	X	0	0	0	0	X	0	X	0	10
65	X	X	X	X	X	X	X	X	0	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	X	X	X	0	20
70	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	X	X	X	X	24

Příloha 9: : Test (multi – level) provedený na starém rázovém generátoru s původním měřicím zařízením, časová prodleva mezi impulzy 20 s, ověření funkčnosti původní instrumentace

Interní označení:	LI 81		
Datum měření:	18. 02. 2016		
Složení plynu:	95% N2 + 5% O2	Tlak plynu:	1,0 bar
Typ elektrod:	R4B	Vzdálenost elektrod:	60 mm

U (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Poč. přeskoků
60	0	X	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	4
75	0	X	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	23

Příloha 10: Test (multi – level) provedený na novém rázovém generátoru s novým měřicím zařízením, časová prodleva mezi impulzy 20 s

Interní označení:	LI 81		
Datum měření:	25. 02. 2016		
Složení plynu:	95% N2 + 5% O2	Tlak plynu:	1,0 bar
Typ elektrod:	R4B	Vzdálenost elektrod:	60 mm

U (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Poč. přeskoků
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X	X	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
65	0	0	X	X	X	0	X	0	X	0	X	0	X	X	0	0	X	X	X	X	X	0	0	0	0	13
70	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

Příloha 11: Test (multi – level) provedený na starém rázovém generátoru zapojení 8 stupeňů s novým měřicím zařízením, časová prodleva mezi impulzy 20 s, ověření funkčnosti původní instrumentace

Interní označení:	LI 81		
Datum měření:	25. 02. 2016		
Složení plynu:	95% N2 + 5% O2	Tlak plynu:	1,0 bar
Typ elektrod:	R4B	Vzdálenost elektrod:	60 mm

U (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Poč. přeskoků
60	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	X	X	0	0	0	X	X	0	0	0	X	7

Příloha 12: Test (multi – level) provedený na novém rázovém generátoru s novým měřicím zařízením, časová prodleva mezi impulzy 20 s, v komoře napuštěn nový plyn

Interní označení:	LI 81		
Datum měření:	03. 03. 2016		
Složení plynu:	95% N2 + 5% O2	Tlak plynu:	1,0 bar
Typ elektrod:	R4B	Vzdálenost elektrod:	60 mm

U (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Poč. přeskoků
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X	X	X	X	X	6
75	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
80	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

Příloha 13: Test (multi – level) provedený na novém rázovém generátoru s novým měřicím zařízením, časová prodleva mezi impulzy 20 s

Interní označení:	LI 81		
Datum měření:	10. 03. 2016		
Složení plynu:	95% N2 + 5% O2	Tlak plynu:	1,0 bar
Typ elektrod:	R4B	Vzdálenost elektrod:	60 mm

U (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Poč. přeskoků
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X	X	3
80	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

Příloha 14: Test (multi – level) provedený na novém rázovém generátoru s novým měřicím zařízením, časová prodleva mezi impulzy 20 s, rozdílná plynová náplň

Interní označení:	LI 81		
Datum měření:	23. 02. 2016		
Složení plynu:	80% N2 + 20% O2	Tlak plynu:	1,0 bar
Typ elektrod:	R4B	Vzdálenost elektrod:	60 mm

U (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Poč. přeskoků	
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
65	0	X	0	X	X	X	0	0	0	0	X	0	X	X	0	0	0	0	X	X	X	0	X	0	X	0	12
70	X	X	X	0	0	X	X	X	0	X	X	X	0	X	0	0	0	0	0	X	X	0	0	X	X	0	14
75	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	X	X	0	X	X	X	X	X	X	X	X	23

Příloha 15: Test (multi – level) provedený na novém rázovém generátoru s novým měřicím zařízením, časová prodleva mezi impulzy 40 s, ověření časové závislosti

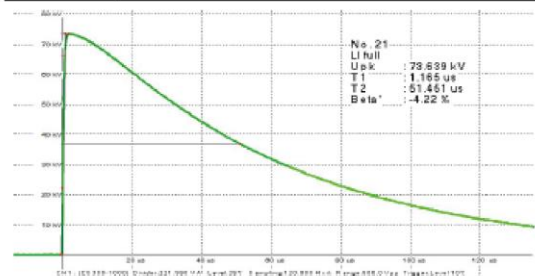
Interní označení:	LI 81		
Datum měření:	23. 02. 2016		
Složení plynu:	95% N2 + 5% O2	Tlak plynu:	1,0 bar
Typ elektrod:	R4B	Vzdálenost elektrod:	60 mm

U (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Poč. přeskoků	
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	X	X	X	3
80	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15
85	X	0	0	0	0	X	X	0	X	X	X	0	X	X	X	X	0	0	X	X	X	0	X	0	X	0	15
90	X	X	X	X	0	X	X	X	X	X	X	X	0	0	X	X	X	X	X	X	0	X	X	X	X	X	21
95	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	X	25

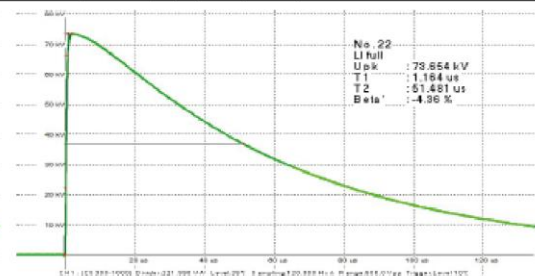
Příloha 16: Příklad protokolů impulzních zkoušek vyhodnocených pomocí impulzního analyzátoru HIAS 743

Test Report

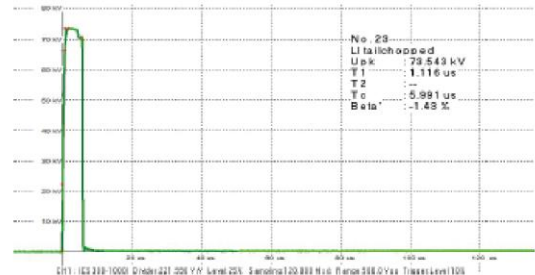
Impulse Analysing System by Haeefly Test AG **HAEFELY** HIGH VOLTAGE TEST



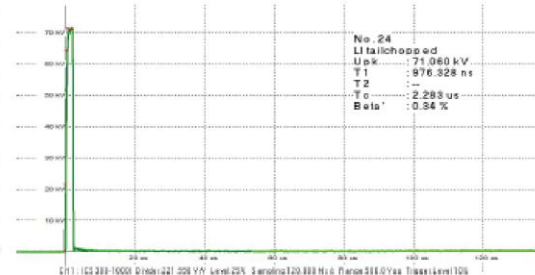
Group: R4B-1 BAR13
No. 21 Li full Upk: 73.839 kV T1: 1.165 us T2: 51.461 us Beta': -4.22 %



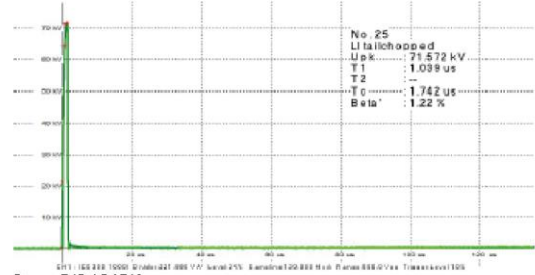
Group: R4B-1 BAR13
No. 22 Li full Upk: 73.854 kV T1: 1.164 us T2: 51.481 us Beta': -4.36 %



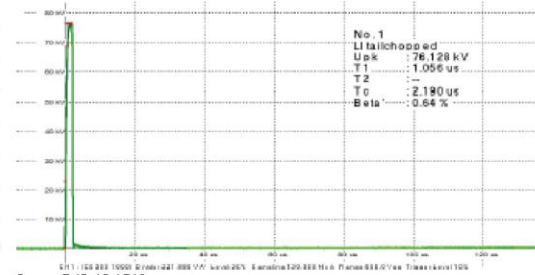
Group: R4B-1 BAR13
No. 23 Li tailchopped Upk: 73.543 kV T1: 1.116 us T2: -- Tc: 5.991 us Beta': -1.48 %



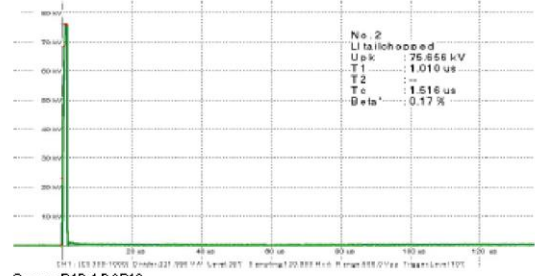
Group: R4B-1 BAR13
No. 24 Li tailchopped Upk: 71.060 kV T1: 976.328 ns T2: -- Tc: 2.283 us Beta': 0.84 %



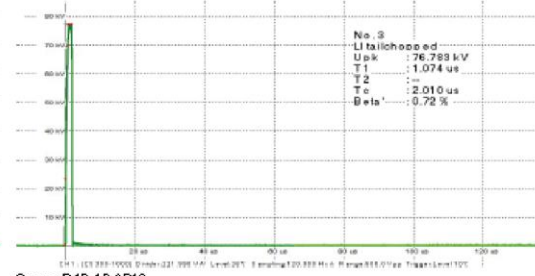
Group: R4B-1 BAR13
No. 25 Li tailchopped Upk: 71.572 kV T1: 1.039 us T2: -- Tc: 1.742 us Beta': 1.22 %



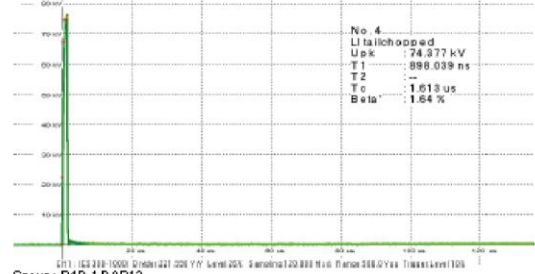
Group: R4B-1 BAR13
No. 1 Li tailchopped Upk: 76.128 kV T1: 1.056 us T2: -- Tc: 2.190 us Beta': 0.64 %



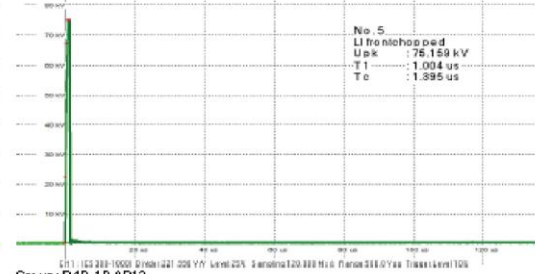
Group: R4B-1 BAR13
No. 2 Li tailchopped Upk: 76.656 kV T1: 1.010 us T2: -- Tc: 1.516 us Beta': -0.17 %



Group: R4B-1 BAR13
No. 3 Li tailchopped Upk: 76.783 kV T1: 1.074 us T2: -- Tc: 2.010 us Beta': -0.72 %



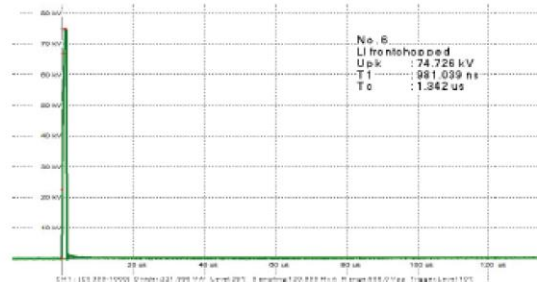
Group: R4B-1 BAR13
No. 4 Li tailchopped Upk: 74.377 kV T1: 898.039 ns T2: -- Tc: 1.613 us Beta': 1.64 %



Group: R4B-1 BAR13
No. 5 Li frontchopped Upk: 75.159 kV T1: 1.004 us Tc: 1.395 us

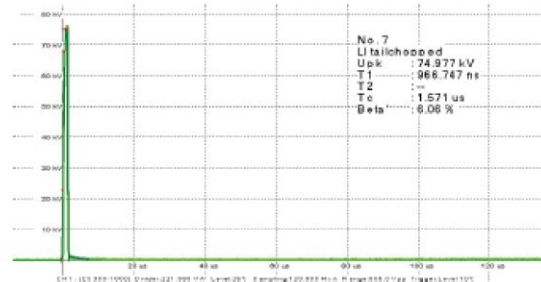
Test Report

Impulse Analysing System by Haeфель Test AG



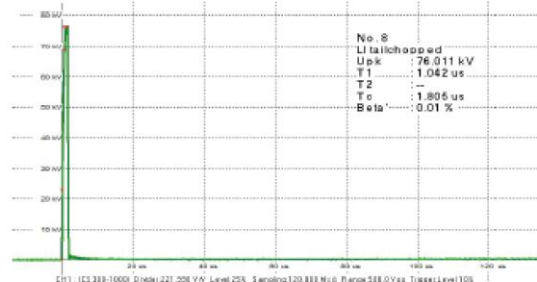
No. 6
LI frontchopped
Upk : 74.726 kV
T1 : 981.039 ns
Tc : 1.342 us

Group: R4B-1BAR13
No. 6 LI frontchopped Upk: 74.726 kV T1: 981.039 ns Tc: 1.342 us



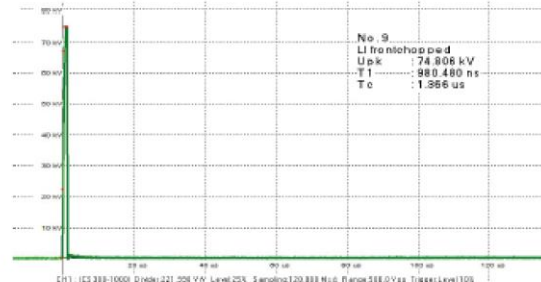
No. 7
LI tailchopped
Upk : 74.977 kV
T1 : 966.747 ns
T2 : --
Tc : 1.571 us
Beta : 8.06 %

Group: R4B-1BAR13
No. 7 LI tailchopped Upk: 74.977 kV T1: 966.747 ns T2: -- Tc: 1.571 us Beta: 8.06 %



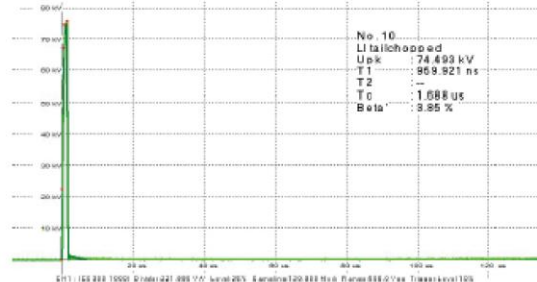
No. 8
LI tailchopped
Upk : 76.011 kV
T1 : 1.042 us
T2 : --
Tc : 1.805 us
Beta : 0.01 %

Group: R4B-1BAR13
No. 8 LI tailchopped Upk: 76.011 kV T1: 1.042 us T2: -- Tc: 1.805 us Beta: 0.01 %



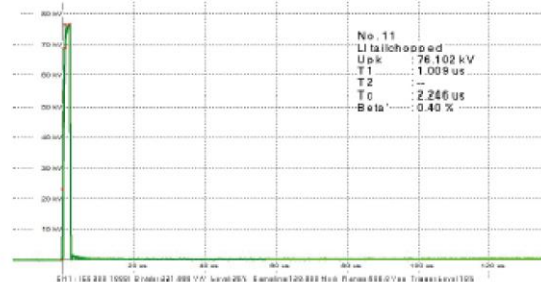
No. 9
LI frontchopped
Upk : 74.806 kV
T1 : 980.480 ns
Tc : 1.266 us

Group: R4B-1BAR13
No. 9 LI frontchopped Upk: 74.806 kV T1: 980.480 ns Tc: 1.266 us



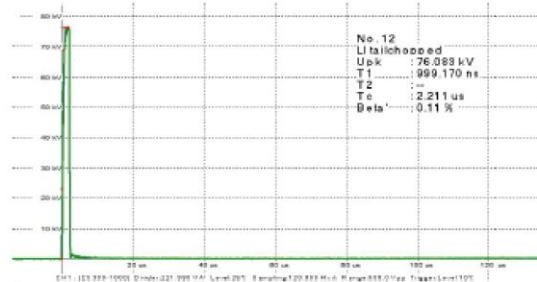
No. 10
LI tailchopped
Upk : 74.493 kV
T1 : 959.921 ns
T2 : --
Tc : 1.688 us
Beta : 3.85 %

Group: R4B-1BAR13
No. 10 LI tailchopped Upk: 74.493 kV T1: 959.921 ns T2: -- Tc: 1.688 us Beta: 3.85 %



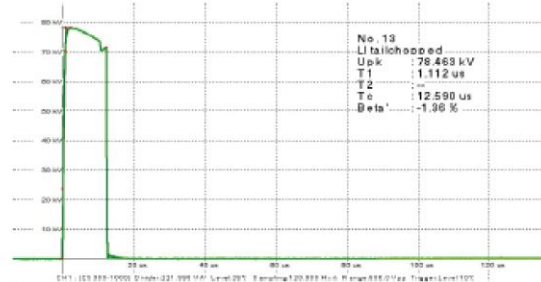
No. 11
LI tailchopped
Upk : 76.102 kV
T1 : 1.009 us
T2 : --
Tc : 2.246 us
Beta : 0.40 %

Group: R4B-1BAR13
No. 11 LI tailchopped Upk: 76.102 kV T1: 1.009 us T2: -- Tc: 2.246 us Beta: 0.40 %



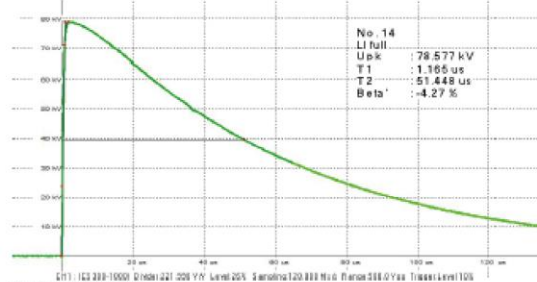
No. 12
LI tailchopped
Upk : 76.083 kV
T1 : 999.170 ns
T2 : --
Tc : 2.211 us
Beta : 0.11 %

Group: R4B-1BAR13
No. 12 LI tailchopped Upk: 76.083 kV T1: 999.170 ns T2: -- Tc: 2.211 us Beta: 0.11 %



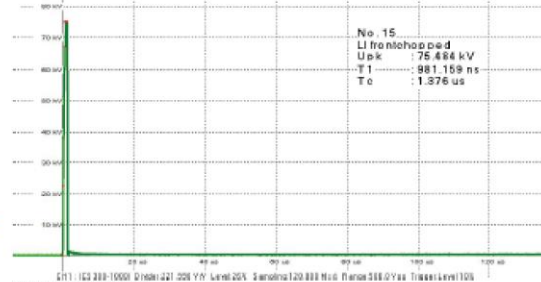
No. 13
LI tailchopped
Upk : 78.463 kV
T1 : 1.112 us
T2 : --
Tc : 12.590 us
Beta : -1.36 %

Group: R4B-1BAR13
No. 13 LI tailchopped Upk: 78.463 kV T1: 1.112 us T2: -- Tc: 12.590 us Beta: -1.36 %



No. 14
LI full
Upk : 78.577 kV
T1 : 1.165 us
T2 : 51.448 us
Beta : -4.27 %

Group: R4B-1BAR13
No. 14 LI full Upk: 78.577 kV T1: 1.165 us T2: 51.448 us Beta: -4.27 %

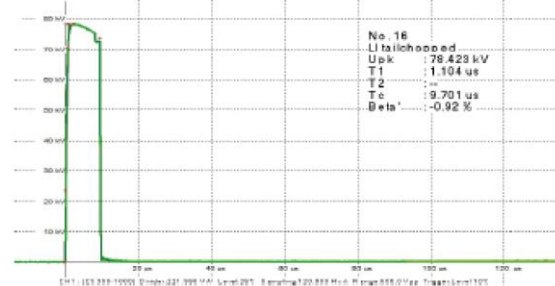


No. 15
LI frontchopped
Upk : 75.484 kV
T1 : 981.159 ns
Tc : 1.376 us

Group: R4B-1BAR13
No. 15 LI frontchopped Upk: 75.484 kV T1: 981.159 ns Tc: 1.376 us

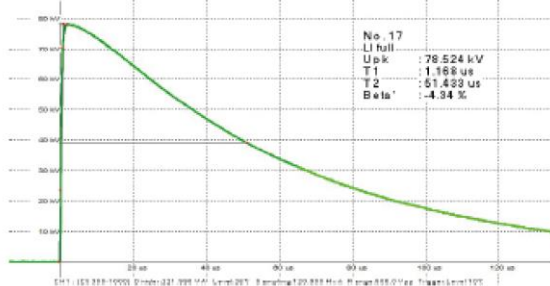
Test Report

Impulse Analysing System by Haeefly Test AG **HAEFELY** HIGH VOLTAGE TEST



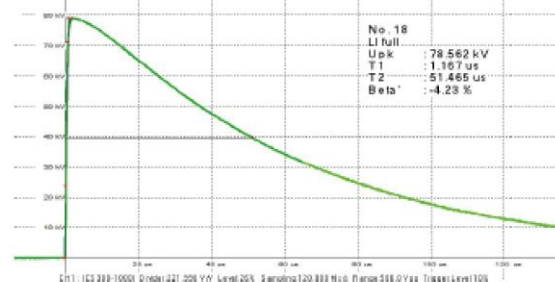
No. 16
LI tailchopped
Upk : 78.423 kV
T1 : 1.104 us
T2 : -
Tc : 9.701 us
Beta' : -0.92 %

Group: R4B-1 BAR13
No. 16 LI tailchopped Upk: 78.423 kV T1: 1.104 us T2: - Tc: 9.701 us Beta': -0



No. 17
LI full
Upk : 78.524 kV
T1 : 1.166 us
T2 : 51.433 us
Beta' : -4.34 %

Group: R4B-1 BAR13
No. 17 LI full Upk: 78.524 kV T1: 1.166 us T2: 51.433 us Beta': -4.34 %



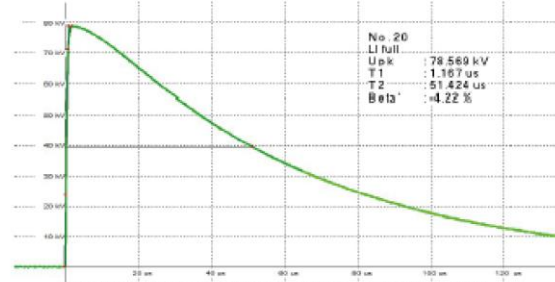
No. 18
LI full
Upk : 78.562 kV
T1 : 1.167 us
T2 : 51.465 us
Beta' : -4.23 %

Group: R4B-1 BAR13
No. 18 LI full Upk: 78.562 kV T1: 1.167 us T2: 51.465 us Beta': -4.23 %



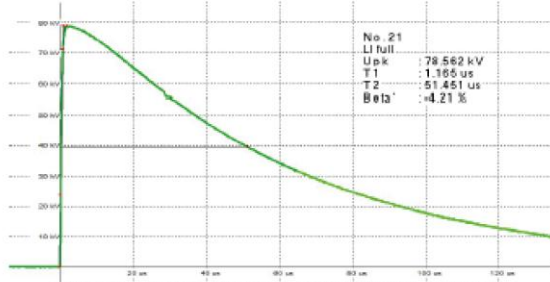
No. 19
LI full
Upk : 78.536 kV
T1 : 1.161 us
T2 : 51.429 us
Beta' : -4.06 %

Group: R4B-1 BAR13
No. 19 LI full Upk: 78.536 kV T1: 1.161 us T2: 51.429 us Beta': -4.06 %



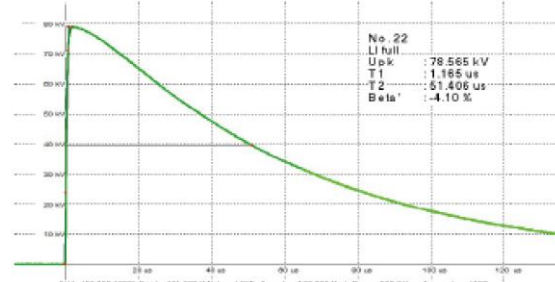
No. 20
LI full
Upk : 78.569 kV
T1 : 1.167 us
T2 : 51.424 us
Beta' : -4.22 %

Group: R4B-1 BAR13
No. 20 LI full Upk: 78.569 kV T1: 1.167 us T2: 51.424 us Beta': -4.22 %



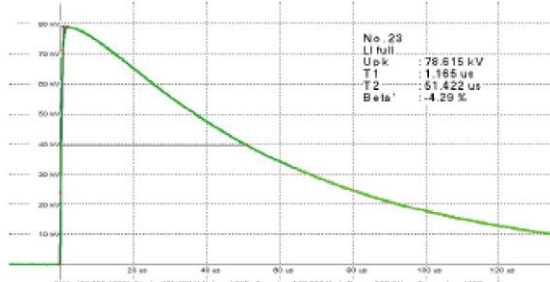
No. 21
LI full
Upk : 78.562 kV
T1 : 1.165 us
T2 : 51.451 us
Beta' : -4.21 %

Group: R4B-1 BAR13
No. 21 LI full Upk: 78.562 kV T1: 1.165 us T2: 51.451 us Beta': -4.21 %



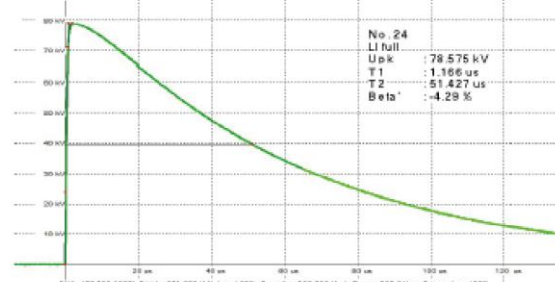
No. 22
LI full
Upk : 78.565 kV
T1 : 1.165 us
T2 : 51.406 us
Beta' : -4.10 %

Group: R4B-1 BAR13
No. 22 LI full Upk: 78.565 kV T1: 1.165 us T2: 51.406 us Beta': -4.10 %



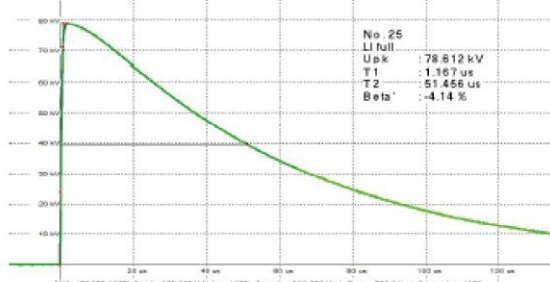
No. 23
LI full
Upk : 78.615 kV
T1 : 1.165 us
T2 : 51.422 us
Beta' : -4.29 %

Group: R4B-1 BAR13
No. 23 LI full Upk: 78.615 kV T1: 1.165 us T2: 51.422 us Beta': -4.29 %



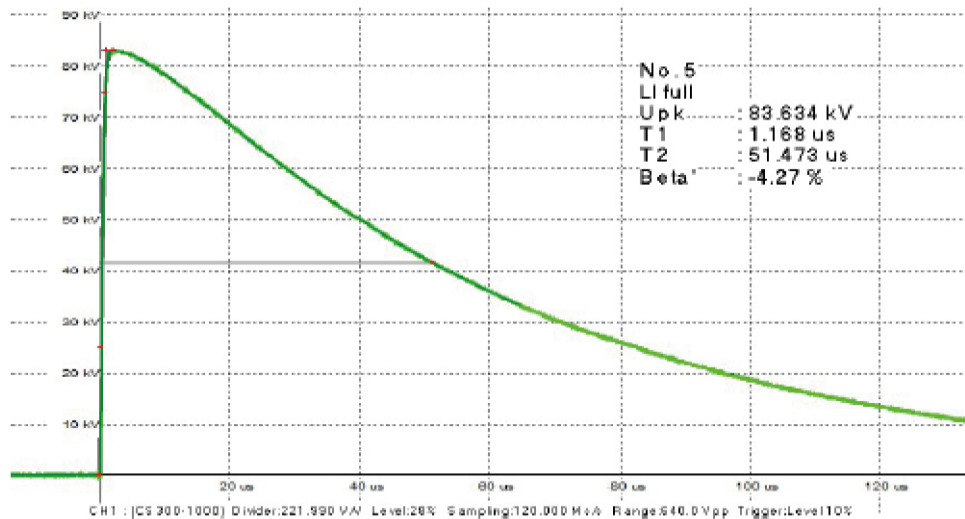
No. 24
LI full
Upk : 78.575 kV
T1 : 1.166 us
T2 : 51.427 us
Beta' : -4.29 %

Group: R4B-1 BAR13
No. 24 LI full Upk: 78.575 kV T1: 1.166 us T2: 51.427 us Beta': -4.29 %



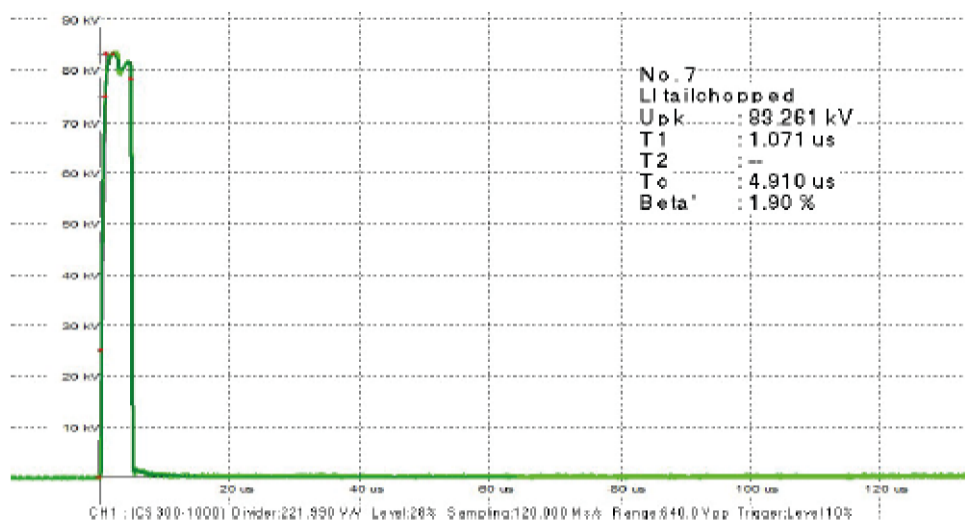
No. 25
LI full
Upk : 78.612 kV
T1 : 1.167 us
T2 : 51.456 us
Beta' : -4.14 %

Group: R4B-1 BAR13
No. 25 LI full Upk: 78.612 kV T1: 1.167 us T2: 51.456 us Beta': -4.14 %



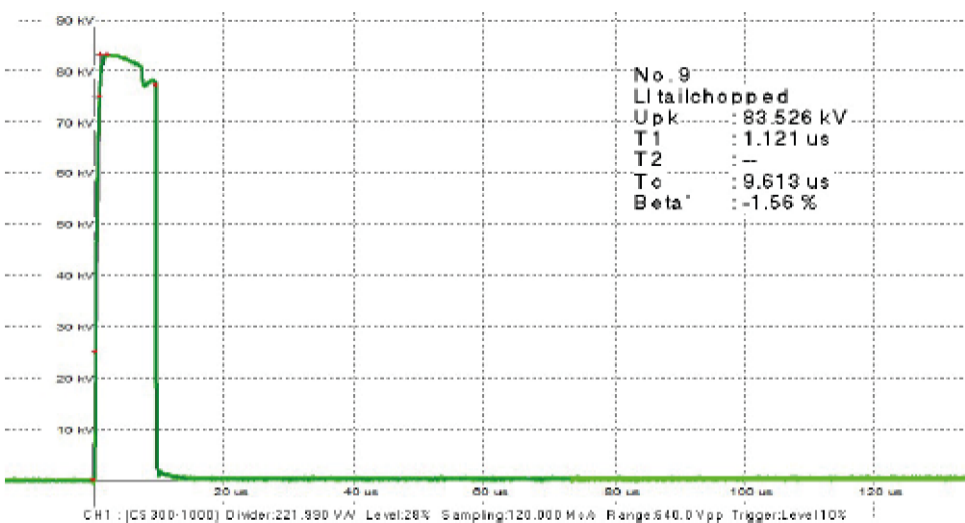
Group: R4B-1BAR13

No. 5 LI full Upk: 83.634 kV T1: 1.168 us T2: 51.473 us Beta': -4.27 %



Group: R4B-1BAR13

No. 7 LI tailchopped Upk: 83.261 kV T1: 1.071 us T2: -- Tc: 4.910 us Beta': 1.9



Group: R4B-1BAR13

No. 9 LI tailchopped Upk: 83.526 kV T1: 1.121 us T2: -- Tc: 9.613 us Beta': -1.