

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Statistické vyhodnocení normalizovaných zkušebních metod
v technice vysokého napětí

Autor práce:

Bc. Ondřej Blažek

Vedoucí práce:

doc. Ing. Eva Müllerová, Ph.D.

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej BLAŽEK**
Osobní číslo: **E21N0002P**
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**
Specializace: **Elektroenergetika**
Téma práce: **Statistické vyhodnocení normalizovaných zkušebních metod v technice vysokého napětí**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

1. Zpracujte přehled napěťových zkoušek uvedených v normě ČSN EN 60060-1 pro AC, DC, LI, SI napětí z hlediska možnosti jejich statistického vyhodnocení a diskutujte jejich použití pro koordinaci izolace.
2. Realizujte napěťové testy na uspořádání s plynou izolací pro různé parametry a metody testování.
3. Analyzujte výsledky testů s použitím statistických nástrojů a zabývejte se interpretací výsledků pro různé postupy zkoušky.


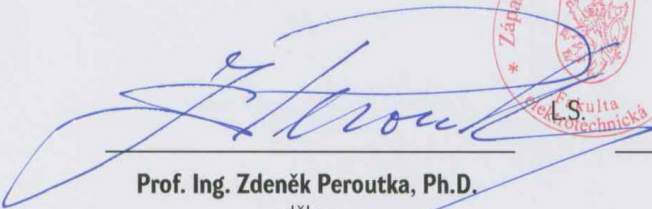
Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací:
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**


Seznam doporučené literatury:

1. Hauschildt, Wolfgang Mosch, Wolfgang Perkins, P.: Statistical techniques for high-voltage engineering/London: 1992. ISBN 978-0-86341-205-9
2. Hauschild, Wolfgang Lemke, Eberhard: High-voltage test and measuring techniques /Heidelberg: 2014. ISBN 978-3-642-45351-9
3. ČSN EN 60060-1, Technika zkoušek vysokým napětím –Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky
4. ČSN EN IEC 60071-2 ed. 2 Koordinace izolace –Část 2: Směrnice pro použití

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

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**



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


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

V Plzni dne 7. října 2022

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá statistickým vyhodnocením normalizovaných vysokonapěťových zkoušek. První část práce se zabývá stručným popisem různých druhů normalizovaných vysokonapěťových zkoušek s ohledem na jejich požadavky na tvar zkušebního napětí, generování zkušebního napětí a také samotnými zkušebními postupy. V další části se práce zaměřuje na statistická rozdělení využívaná pro vyhodnocení různých metod vysokonapěťových zkoušek a samotným postupem statistického vyhodnocení zkoušek. Třetí část popisuje provedené vysokonapěťové testy pro plynnou izolaci. A poslední část se věnuje samotnému statistickému vyhodnocení provedených zkoušek.

Klíčová slova

Statistika, technika vysokého napětí, impulzní zkoušky, atmosférický impulz, plynná izolace, syntetický vzduch, nehomogenní elektrické pole, metoda více hladinami, metoda postupným namáháním

Abstract

This master thesis is focused on statistical evaluation of standardized test methods in high voltage engineering. First part of the thesis briefly describes some of the standardized test methods with respect to their demands in terms of voltage shape, generating high voltage and also some of the test procedures. Next part is mainly focused on statistical distributions used in high voltage engineering for various test methods and it also describes the statistical evaluation process of these test methods. Third part describes completed high voltage tests for gas insulation. And the last part deals with overall statistical evaluation of the completed high voltage tests.

Key Words

Statistics, high voltage engineering, impulse test, atmospheric impulse, gaseous insulation, synthetic air, non-uniform electric field, multiple level method, progressive stress method

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí mé diplomové práce paní doc. Ing. Evě Müllerové, Ph.D. za cenné rady, profesionální přístup, asistenci při přípravě a realizaci měření a metodické vedení práce, které mi velice pomohlo při vypracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Petru Martínkovi, Ph.D. za asistenci při přípravě a realizaci měření.

Obsah

Úvod	- 1 -
1 Normalizované zkoušky vysokým napětím	- 1 -
1.1 Základní pojmy a normy v technice vysokého napětí	- 1 -
1.2 Zkoušky stejnosměrným napětím (DC)	- 3 -
1.2.1 Požadavky na zkušební napětí DC zkoušek	- 3 -
1.2.2 Zkoušky výdržným napětím	- 3 -
1.2.3 Zkoušky napětí průrazného výboje	- 3 -
1.2.4 Zkoušky zaručeného napětí průrazného výboje	- 4 -
1.3 Zkoušky střídavým napětím (AC)	- 4 -
1.3.1 Požadavky na zkušební napětí AC zkoušek	- 4 -
1.3.2 Zkoušky výdržným napětím	- 4 -
1.3.3 Zkoušky napětí průrazného výboje	- 5 -
1.3.4 Zkoušky napětím zaručeného průrazného výboje	- 5 -
1.4 Zkoušky atmosférickým impulzem (LI)	- 5 -
1.4.1 Požadavky na zkušební napětí LI zkoušek	- 5 -
1.4.2 Zkoušky výdržným napětím: postup A	- 8 -
1.4.3 Zkoušky výdržným napětím: postup B	- 8 -
1.4.4 Zkoušky výdržným napětím: postup C	- 8 -
1.4.5 Zkoušky výdržným napětím: postup D	- 9 -
1.4.6 Zkoušky zaručeného napětí průrazného výboje	- 9 -
1.5 Zkoušky spínacím impulzem (SI)	- 9 -
1.5.1 Požadavky na zkušební napětí SI zkoušek	- 9 -
1.5.2 Zkušební postupy SI zkoušek	- 10 -
1.6 Shrnutí normalizovaných zkušebních postupů a jejich návaznost na koordinaci izolace	- 11 -
2 Statistické metody vyhodnocení zkoušek vysokým napětím	- 12 -
2.1 Statistická rozdělení využívaná v technice vysokého napětí	- 12 -
2.1.1 Normální rozdělení	- 13 -
2.1.2 Weibullovo rozdělení	- 14 -

2.1.3	Dvojitě exponenciální rozdělení	- 16 -
2.1.4	Smíšená rozdělení	- 17 -
2.2	Klasifikace zkoušek vysokým napětím	- 17 -
2.2.1	Zkoušky více hladinami	- 17 -
2.2.2	Zkoušky metodou nahoru-dolů	- 19 -
2.2.3	Zkoušky postupným namáháním	- 20 -
2.3	Postup statistického vyhodnocení zkoušky více hladinami	- 21 -
2.3.1	Příprava zkoušky	- 21 -
2.3.2	Ověření nezávislosti	- 22 -
2.3.3	Bodové odhady a spolehlivostní intervaly	- 23 -
2.3.4	Funkce chování izolace	- 23 -
2.3.5	Test shody distribuční funkce	- 25 -
2.3.6	Určení technicky významných kvantilů	- 26 -
2.4	Postup statistického vyhodnocení zkoušky postupným namáháním	- 26 -
2.4.1	Příprava zkoušky	- 26 -
2.4.2	Ověření nezávislosti	- 26 -
2.4.3	Porovnání teoretické a empirické kumulativní distribuční funkce	- 27 -
2.4.4	Určení technicky významných kvantilů	- 29 -
2.5	Interpretace výsledků vysokonapěťových zkoušek	- 29 -
3	Realizace napěťových zkoušek	- 31 -
3.1	Zkoušky stejnosměrným napětím na plynné izolaci	- 33 -
3.2	Zkoušky atmosférickým impulzem na plynné izolaci	- 34 -
3.2.1	Zkouška více hladinami	- 36 -
3.2.2	Zkouška postupným namáháním	- 37 -
4	Statistické vyhodnocení vysokonapěťových zkoušek	- 38 -
4.1	Zkoušky stejnosměrným napětím	- 38 -
4.1.1	Závislost zkoušky pro tlak 3 bary	- 42 -
4.2	Zkoušky atmosférickým impulzem	- 44 -
4.2.1	Zkouška více hladinami	- 44 -
4.2.2	Problematika smíšených rozdělení	- 47 -

4.2.3 Zkouška postupným namáháním.....	- 49 -
Zhodnocení a závěr.....	- 51 -
Literatura	II
Přílohy	IV

Seznam symbolů a zkratek

LI		atmosférický impulz
DC		stejnoseměrný proud
AC		střídavý proud
SI		spínací impulz
GWP		potenciál globálního oteplování
MLM		metoda více hladinami
PSM		metoda postupným namáháním
pd		pravděpodobnostní rozdělení
SG		spouštěcí jiskřiště
PDF		funkce hustoty pravděpodobnosti
CDF		kumulativní distribuční funkce
μ		střední hodnota
μ^*		odhad střední hodnoty
σ		rozptyl
σ^*		odhad rozptylu
$D^2(X)$		rozptyl náhodné proměnné X
$E(X)$		střední hodnota náhodné proměnné X
s		směrodatná odchylka
p		kvantil řádu
$P(U)$		pravděpodobnost přeskočení na napěťové hladině U
$p(U)$		funkce chování izolace
$f(X)$		funkce hustoty pravděpodobnosti náhodné proměnné X
$F(X)$		distribuční funkce náhodné proměnné X
$\phi(X)$		distribuční funkce náhodné proměnné X
$\varphi(X)$		funkce hustoty pravděpodobnosti náhodné proměnné X
$h_i(A)$		relativní četnost průrazného výboje
$h_i(\underline{A})$		relativní četnost výdrže
r		korelační koeficient
d_{max}		maximální odchylka
$k_{0,2}$		kritická hodnota na hladině významnosti 0,2
ΔU	V	napěťový krok
Δt	s	doba mezi namáháním izolace
U_{50}	V	polovinové přeskokové napětí
U_{10}	V	10procentní kvantil přeskokového napětí
U_a	V	aritmetický průměr přeskokových napětí

Úvod

Předkládaná diplomová práce se věnuje problematice statistického vyhodnocení zkoušek vysokým napětím na plynné izolaci. Statistický přístup ke zkouškám, při kterých dochází k průrazným výbojům, je s ohledem na náhodnou povahu výbojových procesů a nemožnost jejich simulace nutný pro predikci chování izolantů při různých typech namáhání a také slouží k samotnému návrhu izolačního systému. V rámci této práce byly provedeny vysokonapěťové zkoušky stejnosměrným a impulzním namáháním na plynné izolaci v podobě syntetického vzduchu s obsahem 80 % N₂ a 20 % O₂ v silně nehomogenním poli. Hlavní cíl práce spočívá ve stanovení metodiky pro nadcházející vysokonapěťové zkoušky stejnosměrným napětím v silně nehomogenním poli a v ověření správnosti metodiky již provedených zkoušek atmosférickým impulzem. Stanovení metodiky pro stejnosměrné zkoušky spočívá v ověření věrohodnosti naměřených dat s pomocí statistických metod, odhalení možných nedostatků zvolené metodiky a ve vytvoření postupu zkoušek zajišťující reprodukovatelnost výsledků získaných z těchto zkoušek. U zkoušek atmosférickým impulzem vykazovaly některé zkoušky jisté anomálie, které nebylo možné jednoznačně fyzikálně interpretovat. Ze statistického hlediska výbojové procesy v plynné izolaci standardně odpovídají normálnímu, Weibullovu, či dvojité exponenciálnímu rozdělení pravděpodobnosti. Některé zkoušky vykazovaly charakter dvou normálních rozdělení, což s sebou přináší značné komplikace ve vyhodnocení a interpretaci naměřených dat. Pro ověření správnosti zvolené metodiky zkoušek atmosférickým impulzem bylo nutné zkoušky zopakovat, provést kontrolu a případně výměnu elektrodového uspořádání, odstranit zbylé prostorové náboje a měření následně zopakovat.

Práce je rozdělena na čtyři části. První část obsahuje přehled norem týkajících se techniky vysokého napětí se zaměřením na zkušební postupy uvedené v normě ČSN EN 60061-1 a možnosti jejich využití pro stanovení koordinace izolace dle normy ČSN EN 60071-2. Ve druhé části se práce zaměřuje na statistické metody používané v technice vysokého napětí a také popisuje postup statistického vyhodnocení pro různé metody zkoušek. Třetí část uvádí postup při realizaci vysokonapěťových zkoušek pro stejnosměrné a impulzní namáhání. Ve čtvrté části je provedeno statistické vyhodnocení realizovaných vysokonapěťových zkoušek se zaměřením na ověření metodiky a porovnáním výsledků pro různé postupy zkoušek.

1 Normalizované zkoušky vysokým napětím

Následující definice pojmů, popis a rozdělení zkoušek uvedené v podkapitolách 1.1 až 1.5 vycházejí z normy ČSN EN 60060-1 [1].

1.1 Základní pojmy a normy v technice vysokého napětí

V rámci realizace a vyhodnocování normalizovaných zkoušek vysokým napětím je nutné pracovat se základními definicemi výbojových procesů, statistických charakteristik těchto procesů a s klasifikací izolačního systému zkoušeného zařízení. Mimo statistické charakteristiky průrazných výbojů, které jsou popsány v kapitole 2, mezi základní pojmy patří:

- **průrazný výboj** – výboj úplně přemostřující testovanou izolaci, důsledkem je porucha izolace a pokles napětí prakticky k nule
- **neprůrazný výboj** – výboj, při kterém testovací napětí neklesne k nule, může se jednat o průrazný výboj, pokud tak stanoví technická komise (některé neprůrazné výboje jsou označovány, jako výboje částečné)
- **přeskok** – průrazný výboj v plynné, či kapalné izolaci
- **průraz** – průrazný výboj v pevné izolaci
- **vnější izolace** – vzdušná izolace a zároveň také nechráněný povrch pevné izolace, který je vystaven atmosférickým a vnějším podmínkám v podobě vlhkosti, znečištění a působení škůdců
- **vnitřní izolace** – všechny izolační prvky, které jsou chráněny před vnějšími vlivy (viz. vnější izolace)
- **samočinně obnovující se izolace** – izolace, která je schopná kompletně obnovit své izolační vlastnosti po průrazném výboji
- **samočinně neobnovující se izolace** – izolace, která úplně ztratí, nebo není schopná kompletně obnovit své izolační vlastnosti po průrazném výboji
- **výdržné napětí** – napětí vypovídající o izolační schopnosti systému vztahující se ke zkoušce výdržným napětím

Technika vysokého napětí se řídí celou řadou norem. Od těch obecných, až po velice specifické normy pro speciální vysokonapěťové zkoušky. Základní norma pro zkoušky v technice vysokého napětí je norma ČSN EN 60060-1 (IEC 60060-1), která se zabývá definicemi základních pojmů využívaných v technice vysokého napětí, obecnými

požadavky na zkušební napětí a konkrétními postupy vysokonapěťových zkoušek. Norma ČSN EN 60060-1 rozděluje zkoušky na zkoušky stejnosměrným napětím, střídavým napětím, impulzním napětím a jejich kombinacemi. Zkoušky impulzním napětím se ještě dále rozdělují na zkoušky atmosférickým impulzem a spínacím impulzem. Zkoušky jsou popsány v následujících podkapitolách 1.2 až 1.5. Příloha A normy ČSN EN 60060-1 také rozděluje zkoušky do třech tříd v rámci jejich statistického vyhodnocení. Podrobný popis klasifikace zkoušek a jejich vyhodnocení je popsán v kapitole 2.2. Shrnutí základních norem pro techniku vysokého napětí je uvedeno v Tab. 1.1.

Tab. 1.1 Shrnutí základních norem pro techniku vysokého napětí

Označení normy	Obsah
ČSN EN 60060-1	Technika zkoušek vysokým napětím – Část 1: Obecné definice a požadavky
ČSN EN 60060-2 ED.2	Technika zkoušek vysokým napětím – Část 2: Měřicí systémy
ČSN EN 60060-3	Technika zkoušek vysokým napětím – Část 3: Definice a požadavky na zkoušky na místě
ČSN EN IEC 60071-1 ED.3	Koordinace izolace – Část 1: Definice, principy a pravidla
ČSN EN IEC 60071-2 ED.2	Koordinace izolace – Část 2: Směrnice pro použití
ČSN EN 60071-5	Koordinace izolace – Část 5: Postupy pro vysokonapěťové stanice měničů stejnosměrného proudu
ČSN 33 0419-4 (330419)	Koordinace izolace – Část 4: Průvodce výpočty koordinace izolace a modelováním elektrických sítí
ČSN EN 60270	Technika zkoušek vysokým napětím – Měření částečných výbojů
ČSN EN 61083-1 ED.2	Přístroje a programové vybavení pro měření při zkouškách impulzy vysokého napětí – Část 1: Požadavky na přístroje
ČSN EN 61083-2 ED.2	Přístroje a software použité pro měření při vysokonapěťových a silnoproudých zkouškách – Část 2: Požadavky na software při zkouškách napěťovými a proudovými impulzy
ČSN EN 60052	Měření napětí pomocí normalizovaných vzduchových jiskřišť

1.2 Zkoušky stejnosměrným napětím (DC)

1.2.1 Požadavky na zkušební napětí DC zkoušek

U zkoušek stejnosměrným napětím je nutné, aby činitel zvlnění nepřekročil 3 %, pokud příslušná technická komise neurčí jiný požadavek na činitel zvlnění. Činitel zvlnění udává poloviční hodnotu rozdílu maximální a minimální hodnoty testovacího napětí, vůči střední hodnotě testovacího napětí. Pokud zkouška nepřesahuje dobu 60 sekund, je nutné, aby testovací napětí bylo drženo v rozmezí ± 1 % od předem určené hodnoty. Pokud zkouška přesahuje dobu 60 sekund, tak je nutné držet napětí v tolerančním pásmu ± 3 % od testovacího napětí. Pro generování vysokého stejnosměrného napětí se standardně využívá regulační transformátor s vysokou hodnotou převodu (např.: $p = \frac{1}{1000}$) v kombinaci s usměrňovačem. Usměrňovač může mít různá provedení, jako například jednocestné, dvoucestné, zdvojovací a násobící. Zdvojovače a násobiče se využívají pro snížení zvlnění a dosažení vyšších hodnot napětí. Samotné měření testovacího napětí musí být provedeno pomocí měřicích systémů splňující podmínky dle normy ČSN EN 60060-2 ed.2 [1].

1.2.2 Zkoušky výdržným napětím

Stejnosemřné napětí by mělo být přiloženo na zkoušený objekt s dostatečně nízkou hodnotou z hlediska přepětí způsobeného spínacím přechodným dějem. Zvyšování napětí by mělo probíhat dostatečně rychle a plynule, aby nedocházelo ke zbytečnému namáhání izolačního systému při vyšších hodnotách zkušebního napětí a zároveň tak, aby bylo možné odečítat naměřené hodnoty napětí z měřicích přístrojů. Tato rychlost zvyšování napětí odpovídá přibližně 2 % zkušebního napětí za sekundu, při dosažení napětí převyšující 75 % zkušebního napětí. Doba trvání zkoušky výdržným napětím je závislá také na době potřebné k dosažení ustáleného stavu. Pokud technická komise neurčí jinou dobu, tak by zkouška měla trvat 60 sekund. Zkoušený objekt zkoušce vyhoví, pokud na něm během zkoušky nedojde k průraznému výboji [1].

1.2.3 Zkoušky napětí průrazného výboje

Zvyšování napětí zde probíhá stejně jako u zkoušky výdržným napětím s jediným rozdílem a to takovým, že se při této zkoušce, na rozdíl od zkoušky výdržným napětím průraz očekává. Výstupem zkoušky je tedy poslední naměřená hodnota napětí v okamžiku průrazu, přičemž je nutné postup n -krát opakovat pro získání souboru n hodnot naměřených průrazných napětí [1].

1.2.4 Zkoušky zaručeného napětí průrazného výboje

Postup zkoušky je identický, jako u zkoušky napětí průrazného výboje, ale je zde definován způsob vyhodnocení, tedy zda zkoušený objekt zkouškou prošel, či nikoliv. Pokud ani jedna hodnota změřeného průrazného napětí nepřesáhne předem definovanou hodnotu napětí zaručeného průrazného výboje, tak zkoušený objekt zkouškou prošel [1].

1.3 Zkoušky střídavým napětím (AC)

1.3.1 Požadavky na zkušební napětí AC zkoušek

Zkoušky střídavým napětím dle normy ČSN EN 60060-1 musí mít jasně dané testovací napětí. Testovací napětí se musí pohybovat v rozsahu 45-65 Hz, obecně se jedná o síťový kmitočet. Pro speciální zkoušky může technická komise posunout testovací kmitočet mimo rozsah 45-65 Hz. Dále norma IEC 60060-3 stanovuje zkoušky pro kmitočty v rozmezí 10-500 Hz. Tvar testovacího napětí musí být blízký funkci sinus s maximálním rozdílem kladných a záporných amplitud 2 %. Tento tvar napětí je dán za předpokladu, že síťové napětí má poměr amplitudy k efektivní hodnotě roven $\sqrt{2}$ a povolenou odchylku ± 5 % od jmenovité hodnoty. Tyto předpoklady samozřejmě platí pro testované objekty s lineární impedanční charakteristikou. Nelinearita impedanční charakteristiky může výrazně ovlivnit odchylku napětí. Proto je v těchto případech nutné určit technickou komisí povolené odchylky v závislosti na testovaném objektu. Stejně jako u stejnosměrných zkoušek je nutné u zkoušek nepřesahující 60 sekund držet hodnotu napětí v rozmezí ± 1 % od předem určené hodnoty testovacího napětí a u zkoušek přesahující 60 sekund v rozmezí ± 3 %. Pro generování vysokého střídavého napětí se standardně využívá zvyšovací transformátor, nebo například rezonanční obvody. Je nutné, aby zdroj udržel testovací napětí v povolených mezích i v případě přechodných proudů výbojů. Maximální povolený pokles napětí je o 20 %. Neprůrazné výboje mohou ovlivňovat měřené napětí, proto je nutné, aby se celková kapacita testovaného objektu a každého dalšího kondenzátoru pohybovala v rozmezí 0,5 až 1,0 nF. Samotné měření testovacího napětí musí být provedeno pomocí měřicích systémů splňujících podmínky dle normy ČSN EN 60060-2 ed.2 [1].

1.3.2 Zkoušky výdržným napětím

Střídavé napětí by mělo být přiloženo na zkoušený objekt s dostatečně nízkou hodnotou z hlediska přepětí způsobeného spínacím přechodným dějem a možných nekontrolovaných rezonančních podmínek. Zvyšování napětí by mělo probíhat dostatečně rychle a plynule, aby

nedocházelo ke zbytečnému namáhání izolačního systému při vyšších hodnotách zkušebního napětí a zároveň tak, aby bylo možné odečítat naměřené hodnoty napětí z měřicích přístrojů. Tato rychlost zvyšování napětí odpovídá přibližně 2 % zkušebního napětí za sekundu, při dosažení napětí převyšující 75 % zkušebního napětí. Napětí se musí na zkoušeném objektu držet určitou dobu a nesmí být náhle odpojeno, protože by mohlo dojít k přepětí vlivem spínacího přechodného děje, což by mohlo zkreslit výsledky zkoušky, nebo poškodit zkoušený objekt. Pokud technická komise neurčí jinou dobu, tak by zkouška měla trvat 60 sekund. Zkoušený objekt zkoušce vyhoví, pokud na něm během zkoušky nedojde k průraznému výboji [1].

1.3.3 Zkoušky napětí průrazného výboje

Zkouška probíhá identicky, jako u stejnosměrných zkoušek napětí průrazného výboje viz. podkapitola 1.2.3.

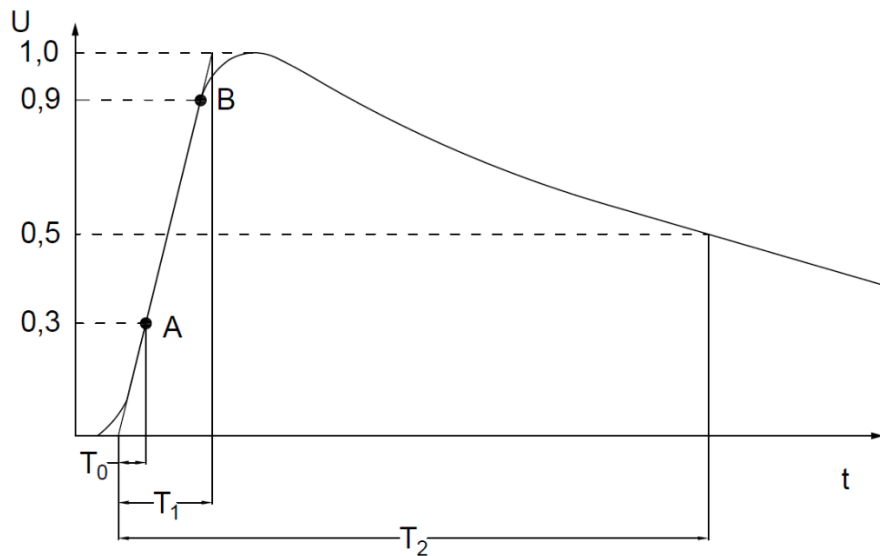
1.3.4 Zkoušky napětím zaručeného průrazného výboje

Zkouška probíhá identicky, jako u stejnosměrných zkoušek zaručeného napětí průrazného výboje viz. podkapitola 1.2.4.

1.4 Zkoušky atmosférickým impulzem (LI)

1.4.1 Požadavky na zkušební napětí LI zkoušek

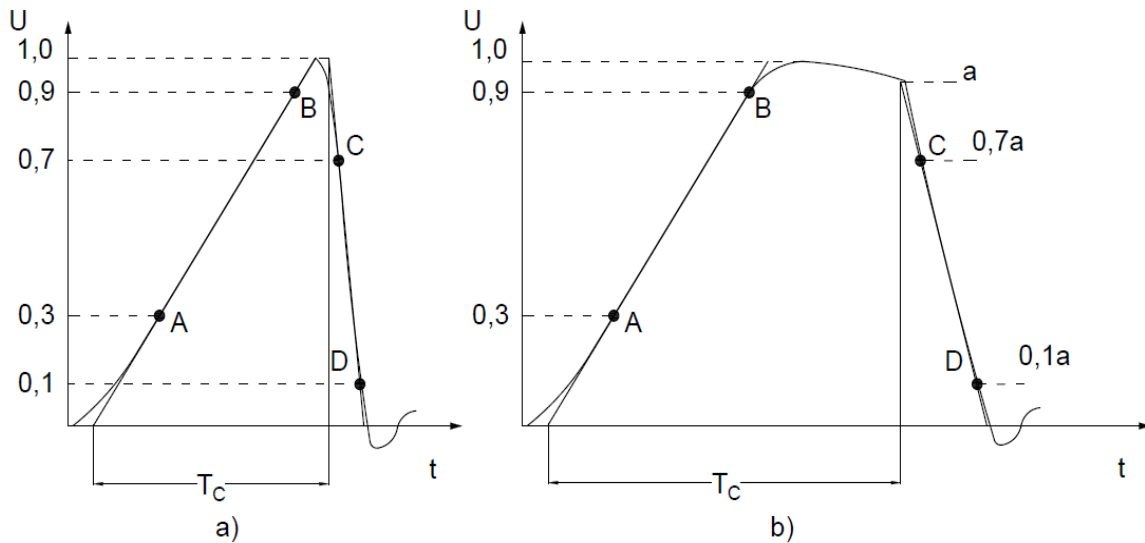
Napětí při zkouškách atmosférickým impulzem je definované jako aperiodické přechodné napětí, které má rychlý nárůst do vrcholu a pozvolný pokles k nulové hodnotě. Na Obr. 1.1 jsou vidět základní časové parametry impulzního napětí.



Obr. 1.1 Normalizovaný impulz napětí pro zkoušky plným atmosférickým impulzem [1]

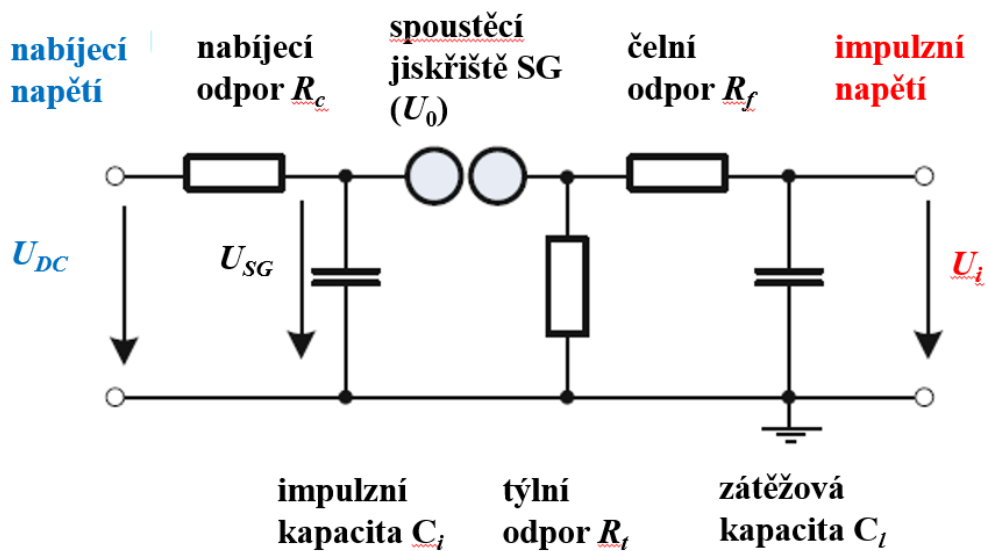
Parametr T_1 se nazývá doba čela a je definován, jako $\frac{1}{0,6}$ násobek doby, při které se hodnota zkušebního napětí dostane ze 30 % na 90 % maximální hodnoty zkušebního napětí. Parametr T_0 se nazývá zdánlivý počátek a je definován jako časový okamžik, který předchází bodu A o 0,3násobek doby čela. Parametr T_2 se nazývá doba půltýlu a je definován, jako časový úsek mezi zdánlivým počátkem a okamžikem, ve kterém klesne hodnota zkušebního napětí na 50 % maximální hodnoty zkušebního napětí. Normalizovaný impulz napětí je definován jako impulz $1,2/50$, přičemž $1,2 \mu\text{s}$ je doba čela a $50 \mu\text{s}$ je doba půltýlu. Toleranční pásmo hodnoty zkušebního napětí je $\pm 3 \%$, doby čela $\pm 30 \%$ a doby půltýlu $\pm 20 \%$. Tyto tolerance platí v případě, že technická komise neurčí jiné požadavky [1].

V předchozím odstavci byl popsán plný impulz napětí. Pro některá zařízení je předepsána zkouška useknutým atmosférickým impulzem. Tento tvar přepětí se může objevit na vstupních svorkách zařízení v důsledku průrazného výboje, například na svodiči typu jiskřiště. Useknutí impulzu znamená rychlé zhroucení napětí na nulovou hodnotu s možným podkmitem do opačné polarity. Zkouška useknutým atmosférickým impulzem spočívá v tom, že se plný atmosférický impulz usekne vnějším jiskřištěm po $2 \mu\text{s}$ až $5 \mu\text{s}$, čímž je simulována reakce přepětiových ochran typu jiskřiště. Na Obr. 1.2 je vidět useknutý atmosférický impulz v čele a v týle s vyznačeným parametrem T_c , který se nazývá doba do useknutí. Doba do useknutí je definována jako časový úsek mezi zdánlivým počátkem impulzu a momentem useknutí [1].



Obr. 1.2 Normalizovaný impulz napětí useknutý v čele a) a useknutý v týle b) [1]

Pro generování impulzního napětí se standardně využívá impulzní generátor. Základní schéma impulzního generátoru lze vidět na Obr. 1.3. Impulzní kapacita je nabíjena přes nabíjecí odpor na hodnotu přeskovového stejnosměrného napětí spouštěcího jiskřiště. Po přeskoku na spouštěcím jiskřišti je nabíjena zátěžová kapacita zkoušeného objektu přes čelní odpor a zároveň je impulzní kapacita vybíjena přes týlní odpor. Superpozice nabíjení zátěžové kapacity přes čelní odpor a vybíjení impulzní kapacity přes týlní odpor vytváří výsledný impulz [2].



Obr. 1.3 Základní obvod impulzního generátoru [2]

Výše popsáný princip platí pro jeden stupeň impulzního generátoru. Z ekonomického hlediska je možné jednostupňovým impulzním generátorem generovat napětí do 200 kV,

protože při generování vyšších napětí by bylo nutné použít příliš velké průměry elektrod spouštěcího jiskřiště, kvůli udržení homogenity pole mezi elektrodami. V praxi se pro generování vyšších napětí využívají vícestupňové impulzní generátory [2].

Měření zkušebního napětí musí být provedeno měřicími systémy splňující podmínky dle normy ČSN EN 60060-2 ed.2 [1].

1.4.2 Zkoušky výdržným napětím: postup A

Zkouška probíhá přivedením třech impulzů s daným tvarem, polaritou a hodnotou napětí na zkoušený objekt. Zkoušený objekt zkoušce vyhoví, pokud ani jeden z impulzů nezpůsobí poruchu samočinně neobnovující se izolace. To, jakým způsobem se porucha indikuje, určuje technická komise [1].

1.4.3 Zkoušky výdržným napětím: postup B

Zkouška probíhá přivedením patnácti impulzů s daným tvarem, polaritou a hodnotou napětí na zkoušený objekt. Zkoušený objekt zkoušce vyhoví, pokud impulzy nezpůsobí více než dva průrazné výboje u samočinně obnovující se izolace a není zjištěna porucha u samočinně se neobnovující izolace. To, jakým způsobem se porucha indikuje, určuje technická komise. Indikací, že nedošlo k poruše samočinně neobnovující se izolace, může být, že se při třech posledních impulzech nevyskytne průrazný výboj. Pokud ve třináctém až patnáctém impulzu dojde k jednomu průraznému výboji je možné přiložit další tři impulzy (maximální počet impulzů je 18). Pokud ani jeden ze třech dalších impulzů nezpůsobí průrazný výboj, tak zkoušený objekt zkoušce vyhověl [1].

1.4.4 Zkoušky výdržným napětím: postup C

Zkouška probíhá přivedením třech impulzů s daným tvarem, polaritou a hodnotou napětí na zkoušený objekt. Pokud nedojde k průraznému výboji, tak zkoušený objekt zkouškou prošel. Pokud dojde k jednomu průraznému výboji u samočinně obnovující se izolace, tak zkouška pokračuje, a to přiložením dalších devíti impulzů. Pokud ani jeden z devíti impulzů nezpůsobí průrazný výboj, zkoušený objekt zkouškou prošel. V případě, že dojde k více než jednomu průraznému výboji během původních třech impulzů, zkoušený objekt zkouškou neprošel. Zároveň pokud dojde k detekci poruchy u samočinně neobnovující se izolace, tak zkoušený objekt zkouškou neprošel [1].

1.4.5 Zkoušky výdržným napětím: postup D

Tato metoda umožňuje statisticky vyhodnotit rovnou 10%, nebo 50% průrazné napětí, případně je možné 10% průrazné napětí vypočítat při znalosti 50% průrazného napětí, což vyplývá z rovnice (1.1).

$$U_{10} = U_{50} \cdot (1 - 1,3s) \quad (1.1)$$

, kde U_{10} (V) je statistické výdržné napětí, U_{50} (V) je polovinové průrazného napětí a s (–) je směrodatná odchylka.

Velikost směrodatné odchylky určuje technická komise (například pro vzdušnou izolaci se často uvažuje $s = 0,03$). Směrodatná odchylka je definována v rovnici (1.2).

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (U_i - U_a)^2} \quad (1.2)$$

, kde s (–) je směrodatná odchylka, n (–) je počet průrazů, U_i (V) je i -té změřené průrazné napětí, U_a (V) je aritmetický průměr průrazných napětí (často lze uvažovat, že $U_a = U_{50}$) [1].

Tento postup zkoušky je možné aplikovat pouze u samočinně se obnovující izolace.

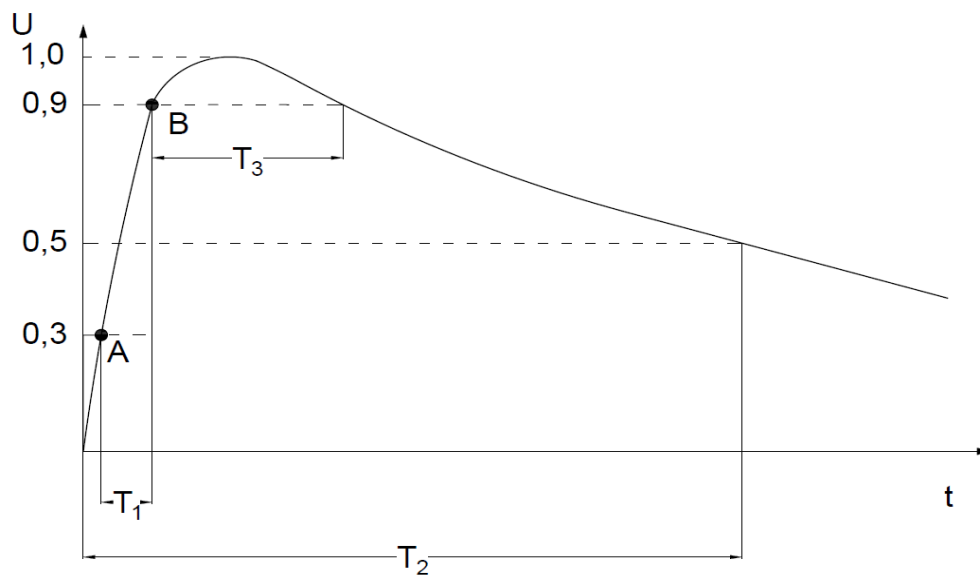
1.4.6 Zkoušky zaručeného napětí průrazného výboje

Postup zkoušek je v podstatě identický, jako u zkoušek výdržným napětím viz podkapitoly 1.4.2 až 1.4.5. Zásadní změny zkoušky spočívají v rozdílech mezi výbojem a výdrží testované izolace [1].

1.5 Zkoušky spínacím impulzem (SI)

1.5.1 Požadavky na zkušební napětí SI zkoušek

Normalizovaný impulz napětí je definován jako impulz 250/2500, přičemž 250 μ s je doba do vrcholu a 2500 μ s je doba půltýlu [1]. Na Obr. 1.4 jsou vidět základní časové parametry impulzního napětí.



Obr. 1.4 Normalizovaný impulz napětí pro zkoušky spínacím impulzem [1]

Parametr T_2 se nazývá doba půltýlu a je definován, jako časový úsek mezi začátkem impulzu a momentem, kdy napětí poprvé klesne na polovinu. Parametr T_3 se nazývá doba nad 90 % a je definován jako časový úsek, během kterého napětí překračuje 90 % vrcholové hodnoty. Toleranční pásmo hodnoty zkušebního napětí je $\pm 3\%$, doby do vrcholu $\pm 20\%$ a doby půltýlu $\pm 60\%$. Tyto tolerance platí v případě, že technická komise neurčí jiné požadavky. V případě, že normalizovaný spínací impulz není pro daný testovaný objekt vhodný, tak technická komise může určit speciální požadavky na spínací impulz, který má aperiodický, či oscilační tvar. Pro generování impulzního napětí se standardně využívá konvenční impulzní generátor. Případný průrazný výboj znamená, že testovaným objektem proteče proud, který na testovaném objektu může značně zdeformovat tvar impulzu, z tohoto důvodu je nutné impulzní generátor a jeho prvky zvolit tak, aby bylo větším deformacím impulzu zabráněno. Pro každý měřený objekt musí být provedena kontrola tvaru impulzu. Měření maximálních hodnot zkušebního napětí a časových intervalů musí být provedeno měřicími systémy splňující podmínky dle normy ČSN EN 60060-2 ed.2 [1].

1.5.2 Zkušební postupy SI zkoušek

Průběhy zkoušek jsou v podstatě identické, jako u zkoušek atmosférickým impulzem viz. podkapitoly 1.4.1 až 1.4.5.

1.6 Shrnutí normalizovaných zkušebních postupů a jejich návaznost na koordinaci izolace

Z normy ČSN EN 60060-1 vyplývá, že normalizované zkoušky vysokým napětím mají dva druhy zkoušek, a to zkoušky výdržným napětím a zkoušky průrazným výbojem [1]. Zásadní rozdíl těchto zkoušek spočívá v tom, zda při zkoušce očekáváme průrazný výboj, nebo nikoliv. U samočinně neobnovující se izolace, tedy u kapalné a obzvláště u pevné izolace nelze využít statistický přístup popsáný v normě ČSN EN 60060-1. Je zřejmé, že průrazný výboj u pevné izolace může způsobit úplné selhání izolačního systému, čímž by došlo k destrukci zkoušeného zařízení. Pokud tedy průrazný výboj nepřipadá v úvahu, tak je nutné využít zkoušky výdržným napětím. Samotný návrh izolačního systému zařízení se řídí normami ČSN EN IEC 60071-1 ed.3 a ČSN EN 60071-2 ed.2. Zde se zavádí pojem *koordinace izolace*, který je definován jako: „*volba dielektrické pevnosti zařízení ve vztahu k provozním napětím a přepětím, která se mohou vyskytovat v síti, pro kterou je zařízení určeno, s respektováním provozních podmínek okolí a charakteristik použitých ochranných zařízení*“ [3]. Koordinace izolace je tedy proces volby zkušebního výdržného napětí z řady normalizovaných jmenovitých výdržných napětí, která určuje odolnost izolačního systému daného zařízení [3]. Celý proces má několik dílčích kroků, a to [3]:

- Stanovení reprezentativních napětí a přepětí
- Stanovení koordinačních výdržných napětí
- Stanovení požadovaných výdržných napětí
- Volba jmenovité izolační hladiny

U samočinně obnovující se izolace lze využít postup zkoušek zahrnující průrazný výboj, což umožňuje využití statistických metod. Statistické metody umožňují popsat chování dané izolace pomocí pravděpodobnostních rozdělení, která udávají, s jakou pravděpodobností dojde v izolaci k průraznému výboji. Tato informace je zásadní v rámci vývoje elektroizolačních materiálů a také pro vyšetření, jak se daný izolační materiál bude chovat při různých typech namáhání. Konkrétní postupy zkoušek z hlediska jejich statistického vyhodnocení jsou popsány v kapitole 2.

2 Statistické metody vyhodnocení zkoušek vysokým napětím

Zkouška vysokým napětím obecně probíhá tak, že se na zkoušený objekt opakovaně přikládá napětí a sledujeme, zda dojde k průraznému výboji, či nikoliv. Výstupem této zkoušky je počet průrazných výbojů pro předem definovaný počet opakovaných přiložení zkušebního napětí na dané napěťové hladině [1][4]. Po provedení vysokonapěťové zkoušky s dostatečně četným přiložením zkušebního napětí pro několik napěťových hladin získáme závislost pravděpodobnosti průrazného výboje na přiloženém napětí $p(U)$ [1]. Získanou závislost lze aproximovat teoretickým pravděpodobnostním rozdělením. Výsledkem je funkce chování izolace (z anglického *performance function*). Funkce chování izolace je klíčovou informací o samotném izolačním systému zkoušeného objektu. Tato informace může sloužit i pro predikci chování izolačního systému a jeho samotný návrh [4]. Dle normy ČSN EN 60060-1 by teoretické pravděpodobnostní rozdělení mělo být reprezentováno pomocí alespoň dvou parametrů, a to 50% průrazným napětím způsobující průrazný výboj v polovině přiložení napětí U_{50} a odhadnuté směrodatné odchylky s [1]. Pro získání funkce chování izolace by tedy bylo nutné provést sérii zkoušek na různých napěťových hladinách a následně funkci aproximovat teoretickým pravděpodobnostním rozdělením. Tento druh testu je v technice vysokého napětí preferován, ale pokud přikládání napětí není předem definovaný impulz a jedná se o zkoušku zahrnující postupné zvyšování napětí (AC a DC zkoušky, viz kapitola 1), pak tento druh testu není z technických, či ekonomických důvodů vhodný [4]. Pro vyhodnocení AC a DC testů je nutné předem stanovit dobu namáhání izolace. Při určování statistického výdržného napětí se jedná o kvantil řádu p , který se většinou uvažuje $p \leq 0,1$, což znamená, že k průraznému výboji dojde s pravděpodobností $\leq 10\%$ [4]. Norma ČSN EN 60060-1, Příloha A rozděluje zkoušky v rámci jejich statistického vyhodnocení do tří skupin, které jsou popsány v podkapitole 2.2 [1].

2.1 Statistická rozdělení využívaná v technice vysokého napětí

V rámci techniky vysokého napětí se nejčastěji využívá normální rozdělení a Weibullovo rozdělení, jelikož se tato rozdělení hodí pro popis problémů v rámci provozního namáhání izolačního systému a náhodných jevů související s průrazným výbojem [1][4]. Normální i Weibullovo rozdělení je charakterizováno právě dvěma parametry. Ve speciálních případech, například při výzkumu elektrické pevnosti polymerů, je nutné použít Weibullovo rozdělení ve variantě se třemi parametry [4].

2.1.1 Normální rozdělení

Náhodný proces vytváří normálně distribuovanou proměnnou v případě, že se jedná o velký soubor náhodně distribuovaných proměnných na sobě nezávislých, přičemž příspěvky jednotlivých proměnných do celkového souboru jsou zanedbatelné [4][5][6]. Normální rozdělení se dá použít pro mnoho náhodných jevů, včetně výbojových procesů [4].

Funkce hustoty pravděpodobnosti normálního rozdělení je definována jako [4][5][6]:

$$\varphi(x; \mu; \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.1)$$

Distribuční funkce normálního rozdělení je definována jako [4][5][6]:

$$\Phi(x; \mu; \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (2.2)$$

Normální rozdělení je charakterizováno dvěma parametry, a to střední hodnotou μ a rozptylem σ^2 .

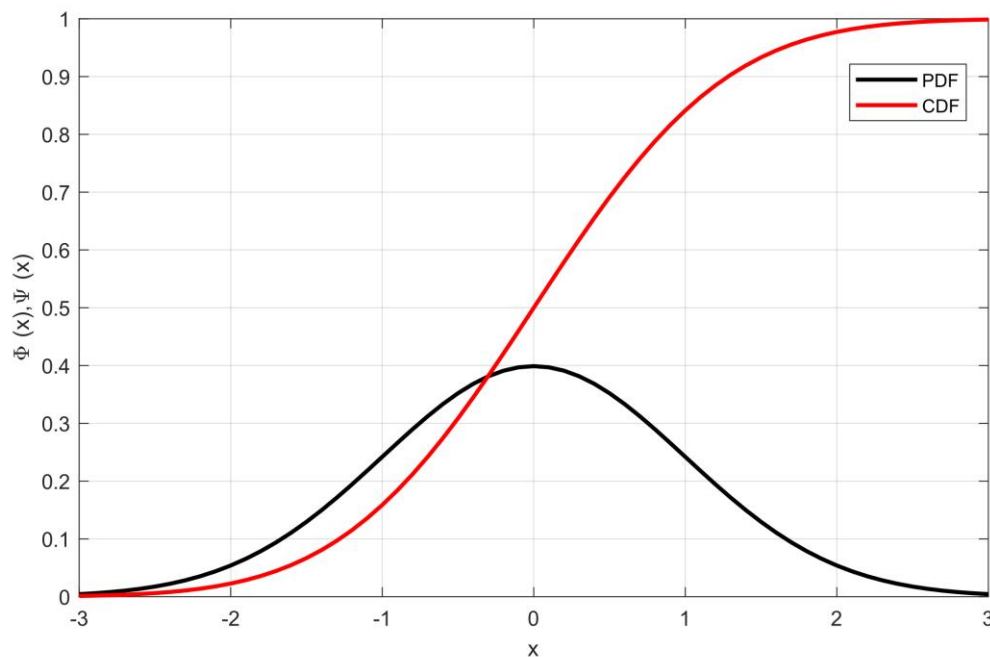
Odhad střední hodnoty je definován jako [4]:

$$\mu^* = \underline{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = x_{50}^* \quad (2.3)$$

Odhad rozptylu je definován jako [4]:

$$\sigma^* = s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \underline{x})^2 = (x_{50}^* - x_{16}^*) \quad (2.4)$$

Normální rozdělení je možné normovat a jeho kvantily určit pomocí tabulek. Normované normální rozdělení má střední hodnotu $\mu = 0$ a rozptyl $\sigma^2 = 1$. Graf hustoty pravděpodobnosti normovaného normálního rozdělení a kumulativní distribuční funkce normovaného normálního rozdělení je vidět na Obr. 2.1.



Obr. 2.1 Hustota pravděpodobnosti a kumulativní distribuční funkce normovaného normálního rozdělení [4]
 V rámci techniky vysokého napětí se normální rozdělení hodí pro popis náhodných jevů, jako například přeskok, či částečný výboj [4]. Při statistickém popisu chování izolačních systémů se použití normálního rozdělení jeví jako nejjednodušší a většinou se právě tímto rozdělením při statistických úvahách začíná [4].

2.1.2 Weibullovo rozdělení

Weibullovo rozdělení spadá do skupiny rozdělení extrémních hodnot. Rozdělení extrémních hodnot vychází ze stejného modelu a využívají se pro určení minim, či maxim. Weibullovo rozdělení je standardně charakterizováno třemi parametry: η , δ , x_0 . Parametr η se nazývá parametr měřítka a závisí na zkoumaném materiálu. V technice vysokého napětí se parametr η často odhaduje jako 63% kvantil přeskokového napětí. Parametr δ se nazývá parametr tvaru, nebo také Weibullův exponent a určuje tvar intenzity poruch (průrazných výbojů). Posledním parametrem je x_0 , který se nazývá parametr polohy, nebo také počáteční hodnota. Speciální forma Weibullova rozdělení s parametry $\delta = 1$ a $x_0 = 0$ se nazývá exponenciální rozdělení. Exponenciální rozdělení má tedy jen jeden parametr a to $\lambda = \frac{1}{\eta}$ [4][7]. V technice vysokého napětí nachází Weibullovo rozdělení ve své formě zahrnující dva parametry ($x_0 = 0$) uplatnění hlavně u zjišťování času do přeskoku u pevných izolačních materiálů.

Weibullovo rozdělení lze také využít pro určování elektrické pevnosti materiálů, ale zde je již nutné přejít na variantu se třemi parametry [4].

Hustota pravděpodobnosti Weibullova rozdělení je definována jako [4][7]:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\delta}{\eta} \left(\frac{x-x_0}{\eta}\right)^{\delta-1} e^{-\left(\frac{x-x_0}{\eta}\right)^\delta} & x > x_0 \\ 0 & x \leq x_0 \end{cases} \quad (2.5)$$

Distribuční funkce Weibullova rozdělení je definována jako [4][7]:

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{x-x_0}{\eta}\right)^\delta} & x > x_0 \\ 0 & x \leq x_0 \end{cases} \quad (2.6)$$

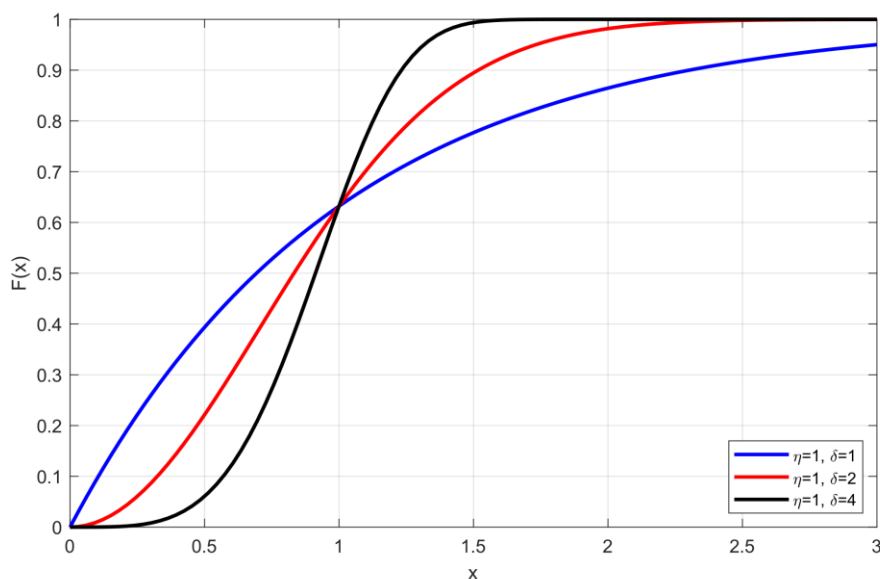
Střední hodnota Weibullova rozdělení se spočítá jako [4][7]:

$$E(X) = x_0 + \eta \Gamma\left(\frac{1}{\delta} + 1\right) \quad (2.7)$$

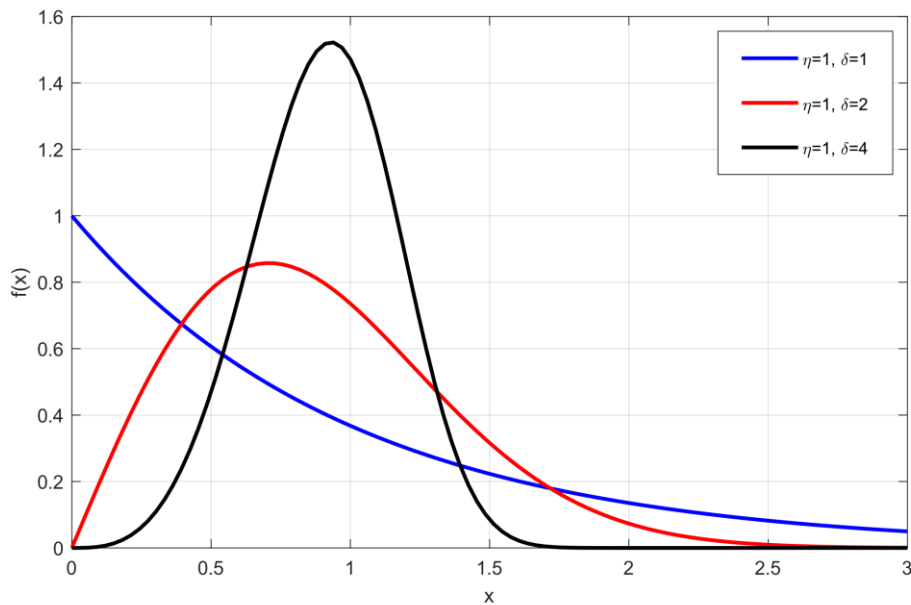
Rozptyl Weibullova rozdělení se spočítá jako [4][7]:

$$D^2(X) = \eta^2 \left[\Gamma\left(\frac{2}{\delta} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{\delta} + 1\right) \right] \quad (2.8)$$

Funkce Γ je funkce Gama, které je tabelována [4]. Na Obr. 2.2 lze vidět kumulativní distribuční funkci Weibullova rozdělení pro různé parametry a na Obr. 2.3 lze vidět hustotu pravděpodobnosti Weibullova rozdělení pro různé parametry.



Obr. 2.2 Kumulativní distribuční funkce Weibullova rozdělení [4]



Obr. 2.3 Hustota pravděpodobnosti Weibullova rozdělení [4]

2.1.3 Dvojitě exponenciální rozdělení

Stejně jako Weibullovo rozdělení patří dvojitě exponenciální rozdělení do skupiny rozdělení extrémních hodnot. V technice vysokého napětí se dvojitě exponenciální rozdělení hodí pro popis elektrické pevnosti stlačených plyných izolantů. Je charakterizováno dvěma parametry γ a η . Parametr γ je míra rozptylu a η je stejně jako u Weibullova rozdělení nazývá parametr měřítka a v technice vysokého napětí se často odhaduje jako 63 % kvantil přeskokového napětí [4].

Hustota pravděpodobnosti dvojitě exponenciálního rozdělení je definována jako [4]:

$$f(x) = \frac{1}{\gamma} \exp\left(\frac{x - \eta}{\gamma} - \exp\left(\frac{x - \eta}{\gamma}\right)\right) \quad (2.9)$$

Distribuční funkce dvojitě exponenciálního rozdělení je definována jako [4]:

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\exp\left(\frac{x - \eta}{\gamma}\right)\right) \quad (2.10)$$

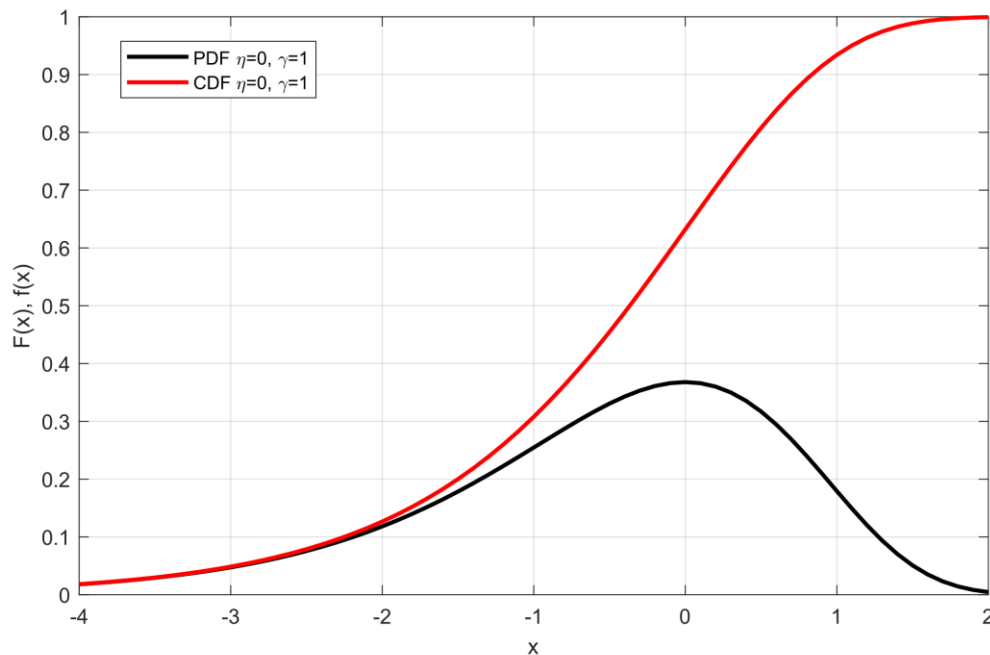
Střední hodnota dvojitě exponenciálního rozdělení se spočítá jako [4]:

$$E(x) = \eta - \gamma C, \text{ kde } C = 0,5772 \quad (2.11)$$

Rozptyl dvojitě exponenciálního rozdělení se spočítá jako [4]:

$$D^2(x) = \frac{1}{6} \pi^2 \gamma^2 \quad (2.12)$$

Na Obr. 2.4 lze vidět distribuční funkci a hustotu pravděpodobnosti dvojitě exponenciálního rozdělení pro parametry $\gamma = 1$ a $\eta = 0$.



Obr. 2.4 Distribuční funkce a hustota pravděpodobnosti pro dvojitě exponenciální rozdělení [4]

2.1.4 Smíšená rozdělení

Smíšené rozdělení se používá v případě, když obdržené empirické distribuční funkce daného napěťového testu vykazují charakter dvou, či více teoretických rozdělení najednou. Nastává to v případě, když je průrazný výboj závislý na více vlivech. Například u izolačních systémů, kde průrazný výboj může nastat s přítomností částečných výbojů, či bez nich, nebo pokud je průrazný výboj doprovázen různými druhy částečných výbojů [4].

2.2 Klasifikace zkoušek vysokým napětím

Norma ČSN EN 60061-1, Příloha A klasifikuje zkoušky do tří skupin. Každá z těchto skupin má odlišný samotný postup zkoušky v návaznosti na jejich statistické vyhodnocení [1].

2.2.1 Zkoušky více hladinami

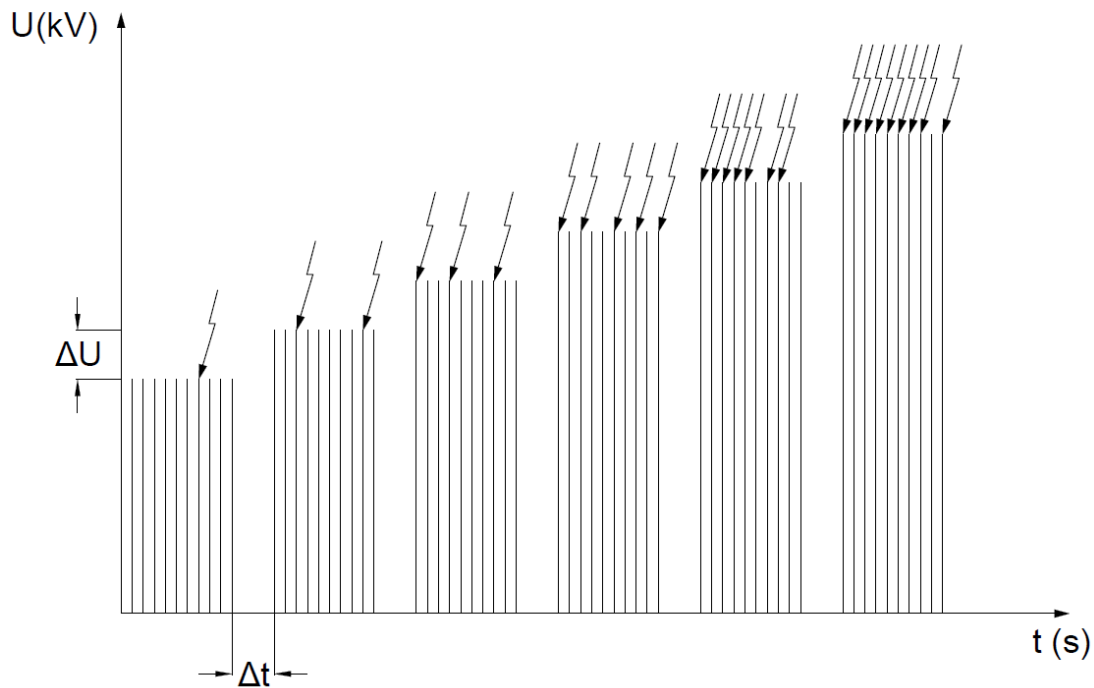
Zkouška více hladinami probíhá přiložením n_i napětí, které způsobí k_i průrazných výbojů. Počet průrazných výbojů k_i se vztahuje k dané napěťové hladině m s daným odstupem napěťových hladin ΔU [1]. Celkový počet provedených zkoušek z je:

$$z = m \cdot n_i \quad (2.13)$$

Celkový počet provedených zkoušek je ovlivněn rozptylem pozorovaných náhodných jevů a požadavky na přesnost zkoušky [4]. Výběr parametrů zkoušky je definován v příloze A normy ČSN EN 60060-1 [1]:

$$m \geq 5; n_i \geq 10; \Delta U = (0,01 \text{ až } 0,06) \cdot U_{50} \quad (2.14)$$

Každá zkouška se provádí tak, aby byla zaručena její nezávislost, což znamená, že výsledek přiložení napětí není ovlivněný předchozím přiložením [4]. S nezávislostí zkoušek úzce souvisí normou nedefinovaný parametr Δt , který reprezentuje dobu mezi jednotlivými zkouškami. U plyných izolací v uzavřené nádobě je nutné věnovat parametru Δt větší pozornost, protože výboj způsobí chemické reakce v plynu, které mohou ovlivnit následující zkoušku [4]. Dále také přeskoky v plynu za sebou zanechávají prostorové náboje, které musí před dalším přiložením úplně zrekombinovat. Pokud by došlo k tomu, že zkouška bude provedena před úplnou rekombinací prostorových nábojů, tak bude ovlivněno rozložení elektrického pole, což může zpomalit, či zrychlit ionizační proces v plynu. Zamezení vlivu prostorového náboje je možné buď zvětšením parametru Δt , nebo přiložením střídavého napětí limitované amplitudy napětí pro zrychlení rekombinačních procesů prostorových nábojů [4]. Tato metodika zkoušky se standardně uplatňuje pro zkoušky atmosférickým impulzem, ale je možné stejný postup replikovat u AC a DC zkoušek, za předpokladu přesného definování doby namáhání izolace [1]. Na Obr. 2.5 lze vidět grafické znázornění zkoušky více hladinami.

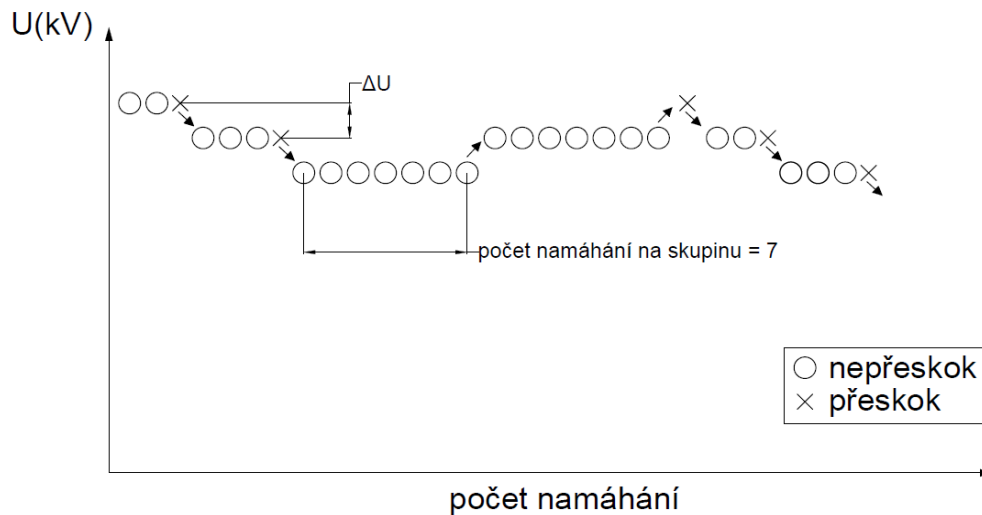


Obr. 2.5 Grafické znázornění zkoušky více hladinami [1]

2.2.2 Zkoušky metodou nahoru-dolů

Zkouška metodou nahoru-dolů probíhá přiložením napětí, u kterého s jistotou nedojde k průrazu a poté následuje zvyšování napětí o určitý napěťový krok ΔU . Jakmile dojde k průrazu, napětí je znovu o ΔU sníženo, pokud v následujícím přiložení nedojde k průrazu, napětí se opět zvyšuje o ΔU . Tímto způsobem se k testovanému objektu přikládá m skupin n napěťových namáhání při napěťových hladinách, které jsou od sebe odděleny napěťovým krokem ΔU [1][4][8]. Běžně se používají dva testovací postupy, a to výdržný a výbojový způsob. U výdržného postupu se postupuje tak, že se napětí postupně zvyšuje o ΔU , pokud při n přiložení napětí nedojde k průrazu. Pokud k průrazu dojde, napětí se o ΔU sníží. Výdržný postup se hodí při hledání napěťové hladiny odpovídající nízké pravděpodobnosti průrazu. Výbojový postup probíhá postupným zvyšováním napětí o ΔU , pokud nedojde k průrazu. Pokud k průrazu dojde, napětí se o ΔU sníží. Výbojový postup určuje napěťové hladiny, u kterých je vysoká pravděpodobnost průrazu [1]. Ze statistického hlediska je metoda nahoru-dolů v obou postupech při $n = 1$ vhodná pro určení hodnoty napětí U_{50} , při které je pravděpodobnost průrazu 50 %. Pokud se zvýší počet přiložení na $n = 7$, lze pomocí výdržného postupu určit hodnotu napětí U_{10} , při které je pravděpodobnost průrazu 10 %. U

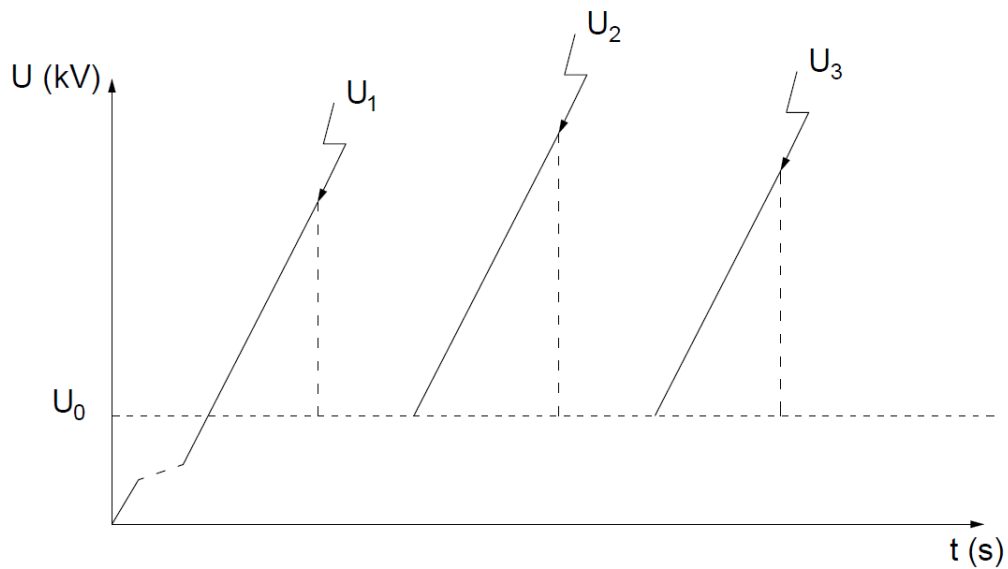
výbojového postupu lze zjistit hodnotu napětí U_{90} , při kterém je pravděpodobnost průrazu 90 % [1]. Na Obr. 2.6 lze vidět grafické znázornění zkoušky nahoru-dolů s výdržným postupem.



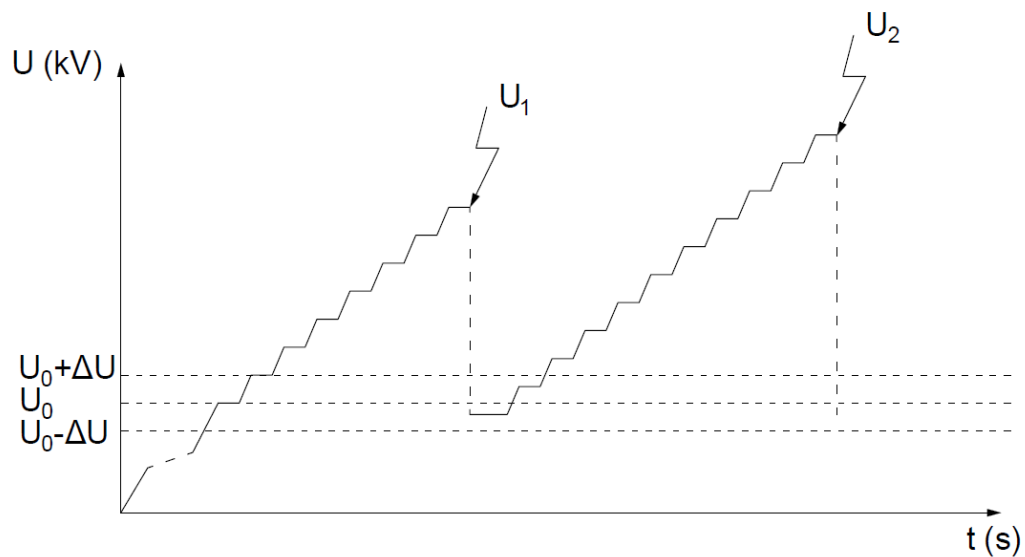
Obr. 2.6 Grafické znázornění zkoušky nahoru-dolů [1]

2.2.3 Zkoušky postupným namáháním

U zkoušky postupným namáháním se očekává průrazný výboj, z čehož vyplývá, že tento druh zkoušky se provádí nejčastěji u samočinně se obnovující izolace, nebo u množství vzorků samočinně se neobnovující izolace. Zkouška probíhá tak, že se na testovaný objekt přiloží napětí, které se postupně zvyšuje až do průrazu, nebo se na testovací objekt přiloží konstantní napětí o určité hodnotě a sleduje se doba do průrazu. Výstupem zkoušky jsou tedy buď hodnoty průrazných napětí, nebo čas, při kterém došlo k průrazu. Počet přiložení napětí n by měl být alespoň 10. Zvyšování napětí může být prováděno plynule, nebo po určitých napěťových krocích. Zkoušku postupným namáháním lze provést pro střídavé, stejnosměrné, nebo impulzní napětí [1]. V rámci statistického vyhodnocení zkoušky postupným namáháním je nutné věnovat pozornost množství parametrů. Mezi tyto parametry patří rychlost zvyšování testovacího napětí, počet přiložení a časová prodleva mezi zkouškami. Při zvyšování napětí po krocích je také nutné věnovat pozornost napěťovému kroku [4]. Na Obr. 2.7 a Obr. 2.8 lze vidět grafické znázornění zkoušek postupným namáháním pro obě varianty zvyšování napětí.



Obr. 2.7 Grafické znázornění zkoušky postupným namáháním pro plynulé zvyšování napětí [1]



Obr. 2.8 Grafické znázornění zkoušky postupným namáháním pro zvyšování napětí po krocích [1]

2.3 Postup statistického vyhodnocení zkoušky více hladinami

2.3.1 Příprava zkoušky

Příprava zkoušky více hladinami spočívá ve stanovení počtu napěťových hladin m , na kterých bude zkouška prováděna, počtu přiložení napětí na určité napěťové hladině n ,

napětíového kroku Δu a intervalu mezi přiložením napětí Δt . Po určení potřebných parametrů se provede samotná zkouška dle postupů zmíněných v kapitolách 1 a 2.2.1.

2.3.2 Ověření nezávislosti

Prvním krokem po provedení zkoušky je test nezávislosti naměřeného souboru dat. Ověření nezávislosti lze provést graficky, kontrolou trendu naměřených hodnot, nebo iteračním testem. Doporučuje se během zkoušky provádět grafický test nezávislosti [4]. Grafický test nezávislosti u zkoušky více hladinami lze provést tak, že se soubor naměřených dat na jedné napětíové hladině rozdělí na několik podsouborů, vypočte se relativní četnost každého podsouboru a porovná se s relativní četností celého souboru. Ze souboru naměřených dat byla vybrána napětíová hladina 120 kV s počtem přiložení napětí $n = 25$, která byla rozdělena na 5 podsouborů [4]. U každého podsouboru se vypočte jeho relativní četnost:

$$h_5 = \frac{\text{počet průrazů podsouboru}}{\text{velikost podsouboru}} \quad (2.15)$$

Následně se u celkového souboru vypočte celková relativní četnost:

$$h_{25} = \frac{\text{celkový počet průrazů}}{\text{velikost souboru}} \quad (2.16)$$

Porovnáním relativních četností podsouboru a celkového souboru lze vyzorovat, zdali naměřený soubor dat fluktuuje okolo celkové relativní četnosti souboru a nevykazuje žádný trend [4]. V Tab. 2.1 je proveden grafický test nezávislosti pro zkoušku více hladinami, který vykazuje nezávislost naměřených hodnot.

Tab. 2.1 Grafický test nezávislosti pro zkoušku více hladinami

Test nezávislosti					Relativní četnost	
LI-test (4 cm, 3 bar), hladina 120 kV, n=25, „x“=přeskok, „-“=výdrž					h_5	h_{25}
-	x	-	x	x	0,6	0,72
x	x	x	-	x	0,8	
x	x	x	-	x	0,8	
x	x	x	x	x	1	
-	-	x	-	x	0,4	

2.3.3 Bodové odhady a spolehlivostní intervaly

Následují bodové odhady relativní četnosti průrazného výboje a určení spolehlivostních intervalů. Bodovým odhadem pravděpodobnosti průrazu je u testu více hladinami relativní četnost průrazu a bodovým odhadem výdrže je relativní výdržná četnost. Pomocí počtu průrazů k_i a počtu přiložení napětí n lze vypočítat relativní četnost průrazu jako [4]:

$$h_i(A) = \frac{k_i}{n} \quad (2.17)$$

Relativní výdržná četnost se spočítá jako [4]:

$$h_i(\underline{A}) = \frac{(n - k)}{n} = 1 - h_i(A) \quad (2.18)$$

Relativní četnost závisí na celkovém počtu přiložení napětí n . Zvyšováním celkového počtu přiložení napětí se relativní četnost přibližuje k pevné hodnotě pravděpodobnosti průrazu [4]. Matematické vyjádření pravděpodobnosti průrazu je [4]:

$$h_i(A) = p(A) \quad (2.19)$$

Jelikož není možné přímo určit pravděpodobnost průrazu $p(A)$, tak pro určení přesnosti odhadu relativní četnosti na dané hladině se využívá spolehlivostní interval (konfidenční interval). Spolehlivostní interval je interval, který s určitou hladinou významnosti α pokrývá neznámou pravděpodobnost průrazu $p(A)$. Hladina významnosti α se v technice vysokého napětí nejčastěji uvažuje 0,05, nebo 0,1 [4].

2.3.4 Funkce chování izolace

Dále lze vynést do grafu empirickou distribuční funkci relativní četnosti průrazných výbojů ze změřených hodnot a aproximovat ji teoretickou distribuční funkcí. Touto aproximací se získá funkce chování izolace. Aproximace se standardně provádí graficky na pravděpodobnostní papír, který má osu y linearizovanou podle použitého pravděpodobnostního rozdělení, nebo matematicky pomocí lineární regrese. Linearizaci osy y lze provést transformací relativní četnosti průrazných výbojů inverzní funkcí očekávaného pravděpodobnostního rozdělení [4]. Na Obr. 2.9 je vidět netransformovaná závislost relativní četnosti a na Obr. 2.10 je vidět funkce chování izolace s transformovanou osou y dle normálního rozdělení a proložením empirické funkce chování izolace pomocí lineární regrese [4]. Pro lineární regresi dvou proměnných se využívá korelace, která slouží ke zjištění, zda mají dvě proměnné mezi sebou určitou závislost. Pro zjištění tohoto vztahu se

využívá korelačního koeficientu. Korelační koeficient se značí r a vyjadřuje míru závislosti dvou proměnných porovnáním odchylek a středních hodnot obou proměnných dle následujících rovnic [4]:

$$s_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \underline{x})(y_i - \underline{y}) \quad (2.20)$$

, kde s_{xy} je empirická kovariance dvou proměnných, \underline{x} a \underline{y} jsou střední hodnoty proměnných.

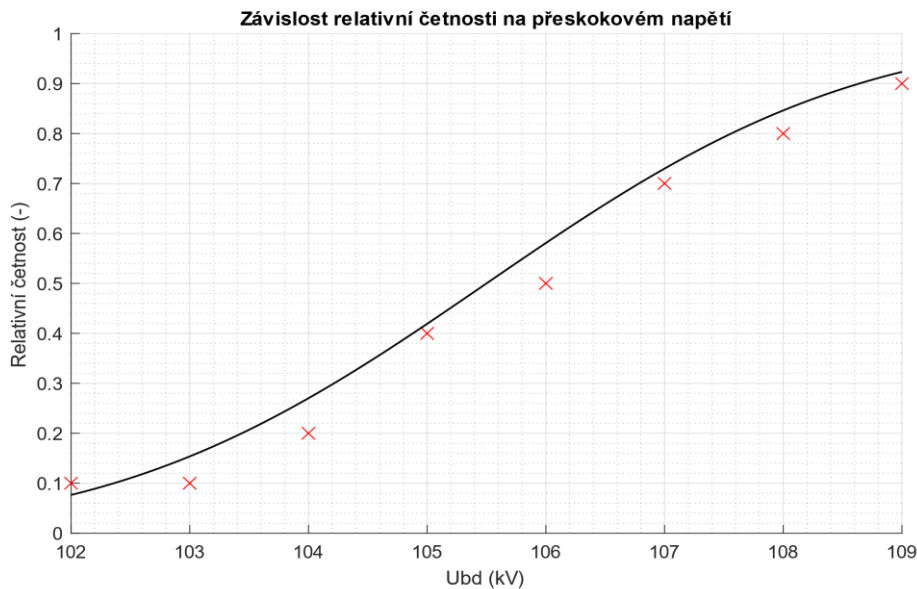
$$r = \frac{s_{xy}}{s_x s_y}; r = \begin{cases} 1 & \rightarrow \text{přímá závislost proměnných} \\ 0 & \rightarrow \text{nezávislost proměnných} \\ -1 & \rightarrow \text{nepřímá závislost proměnných} \end{cases} \quad (2.21)$$

Pokud se korelační koeficient blíží jedné je možné usoudit, že dvě proměnné mezi sebou mají určitou vazbu. Následuje výpočet regresního koeficientu b_{yx} a koeficientu polohy a_{yx} [4][5][6]:

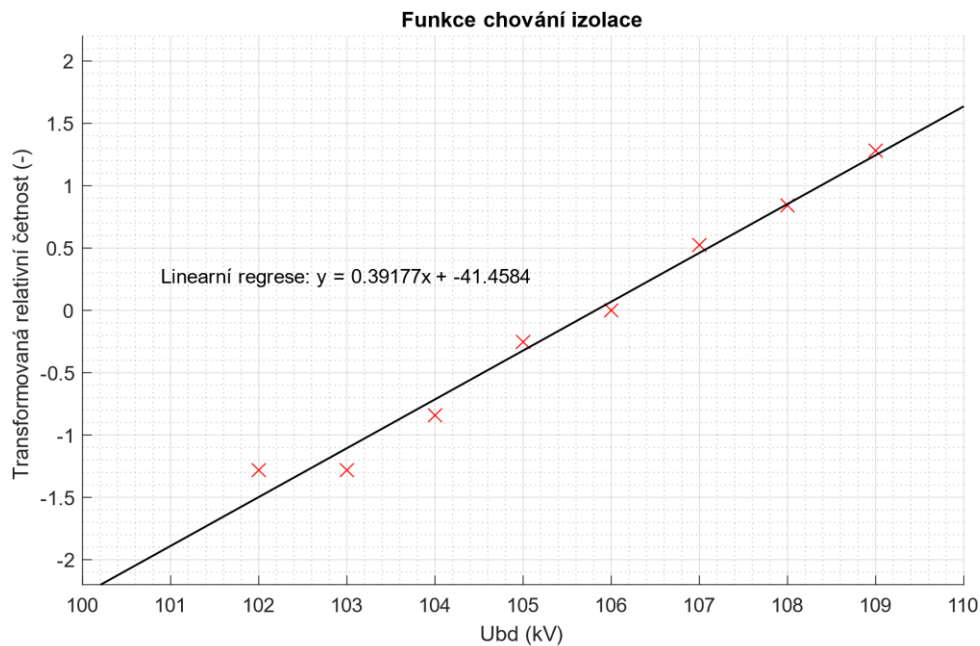
$$b_{yx} = \frac{s_{xy}}{s_x^2}; a_{yx} = \underline{y} - b_{yx} \underline{x} \quad (2.22)$$

A následně je možné určit rovnici regresní přímky [4]:

$$y = a_{yx} + b_{yx} \cdot x \quad (2.23)$$



Obr. 2.9 Závislost relativní četnosti na přeskokovém napětí – nelineární [4]



Obr. 2.10 Funkce chování izolace aproximována pomocí lineární regrese [4]

2.3.5 Test shody distribuční funkce

To, zda empirická distribuční funkce pochází z určitého teoretického rozdělení, lze ověřit pomocí Kolmogorova-Smirnova testu. Kolmogorov-Smirnov test spočívá v porovnání empirické distribuční funkce s teoretickou distribuční funkcí s určitou hladinou významnosti. V technice vysokého napětí se pro tento test nejčastěji využívají hladiny významnosti 0,1, nebo 0,05 [4]. Porovnávacím faktorem pro vyhodnocení, jestli daný soubor dat odpovídá určitému teoretickému rozdělení, je maximální odchylka mezi empirickou distribuční funkcí a teoretickou distribuční funkcí [4]:

$$d_{max} = |F_n(x) - F_0(x)| \quad (2.24)$$

Kritické hodnoty pro Kolmogorovův test jsou tabelovány a závisí na velikosti souboru dat a na hladině významnosti. Například pro soubor dat o velikosti $n = 24$ a hladinu významnosti $\alpha = 0,1$ je kritická hodnota $k_{24,0,1} = 0,242$. Pokud je maximální odchylka $d_{max} > k_{n,\alpha}$ je hypotéza zamítnuta, tudíž daný soubor dat neodpovídá určitému teoretickému rozdělení [4]. Pro ověření shody empirické distribuční funkce s teoretickou distribuční funkcí existuje kromě Kolmogorova testu mnoho dalších jako například X test, nebo U test. Volba testu závisí převážně na velikosti testovaného souboru a očekávané přesnosti testu [4].

2.3.6 Určení technicky významných kvantilů

Po provedení testu nezávislosti, bodových odhadů, porovnání teoretické a empirické distribuční funkce a ověření, zda změřený soubor dat pochází ze stejného teoretického rozdělení následuje stanovení technicky významných kvantilů funkce chování izolace. Konkrétně se jedná o hodnotu napětí s 50% pravděpodobností průrazného výboje, statistická hodnota výdržného napětí a statistická hodnota provozního napětí. Posledním krokem vyhodnocení zkoušky více hladinami je interpretace výsledků z technického a fyzikálního hlediska [4].

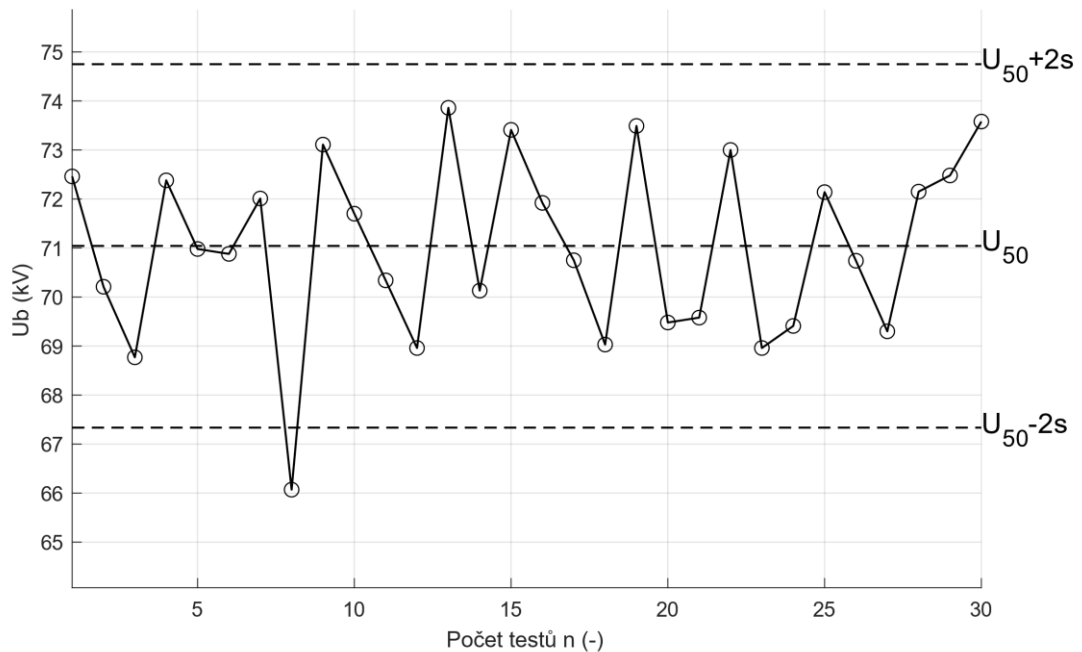
2.4 Postup statistického vyhodnocení zkoušky postupným namáháním

2.4.1 Příprava zkoušky

Příprava zkoušky postupným namáháním má velice podobný postup, jako zkouška více hladinami. Zásadní rozdíl těchto dvou postupů spočívá v tom, že statistickým výstupem zkoušky postupným namáháním není funkce chování izolace, nýbrž empirická funkce kumulativní četnosti průrazných výbojů. Samotný postup zkoušky začíná určením základních parametrů. Mezi tyto parametry patří počet přiložení napětí, rychlost zvyšování napětí (nebo napět'ový krok), počáteční napětí a časový interval mezi přiložením napětí. Po určení těchto parametrů se provede zkouška dle postupů zmíněných v kapitolách 1 a 2.2.3 [4].

2.4.2 Ověření nezávislosti

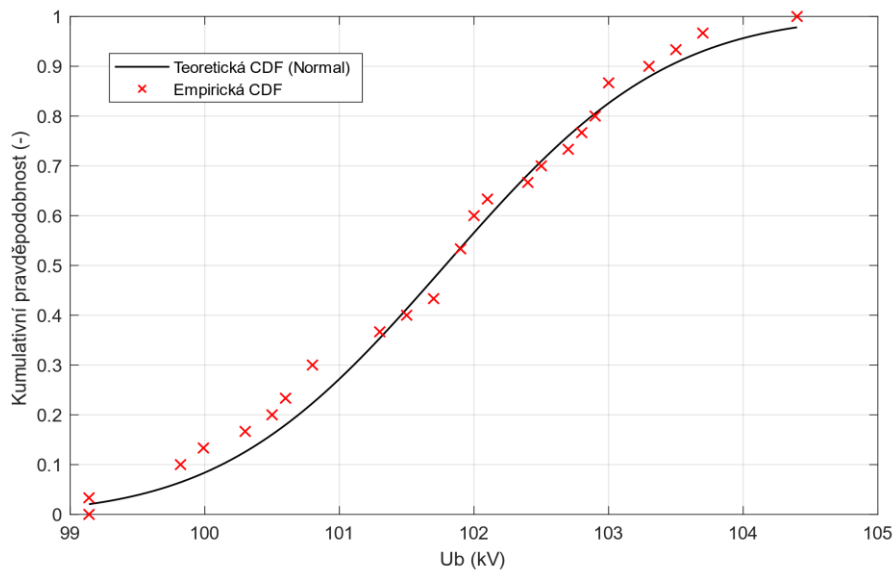
Ověření nezávislosti zkoušky postupným namáháním lze provést graficky. U grafického testu nezávislosti je sledováno, zda hodnoty dostatečně fluktuují okolo střední hodnoty a nevykazují žádný trend, který by naznačoval závislost. Na Obr. 2.11 je vidět grafický test nezávislosti s dostatečnou fluktuací hodnot, která jasně vypovídá o nezávislosti změřených hodnot [4].



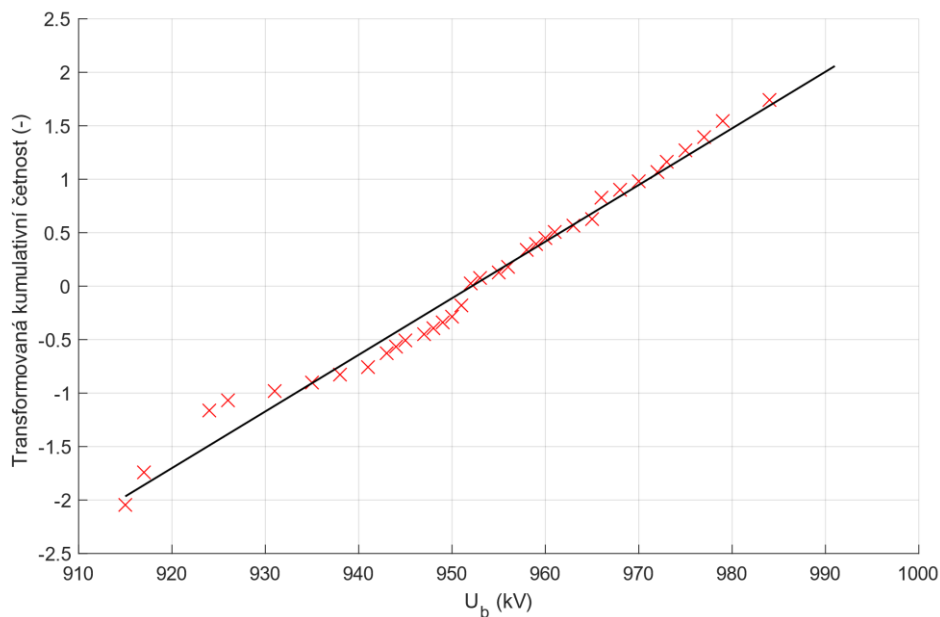
Obr. 2.11 Grafický test nezávislosti zkoušky postupným namáháním [4]

2.4.3 Porovnání teoretické a empirické kumulativní distribuční funkce

Následuje vynesení funkce kumulativní četnosti průrazných výbojů do grafu a následná aproximace teoretickým rozdělením a ověření, zda empirická kumulativní četnost pochází ze stejného teoretického rozdělení. Na Obr. 2.12 lze vidět porovnání empirické a teoretické kumulativní distribuční funkce zkoušky postupným namáháním. Pro přesnější porovnání lze využít lineární regrese stejně jako u zkoušky více hladinami viz Obr. 2.13.



Obr. 2.12 Empirická a teoretická kumulativní distribuční funkce zkoušky postupným namáháním [4]



Obr. 2.13 Empirická a aproximovaná kumulativní distribuční funkce [4]

Další ověření, zda empirická distribuční funkce odpovídá teoretické distribuční funkci lze realizovat Kolmogorovým testem viz podkapitola 2.3.5 [4].

Aproximovaná kumulativní distribuční funkce a funkce chování izolace mezi sebou mají určité vazby, které vycházejí ze zvolených parametrů během přípravy zkoušky postupným namáháním. Zkouška postupným namáháním v porovnání se zkouškou více hladinami nabízí jisté výhody týkající se menší časové náročnosti a jednoduchosti zkoušky. Nevýhoda zkoušky ovšem spočívá v tom, že určení odolnosti izolace na konkrétní napěťové hladině

s konkrétním uspořádáním lze odvodit pouze z funkce chování izolace. Kumulativní distribuční funkce totiž určuje pravděpodobnost průrazu pro všechny napěťové úrovně vyskytující se pod danou napěťovou úrovní. Toto je zásadní rozdíl mezi funkcí chování izolace a kumulativní distribuční funkcí. Z technického hlediska je možné použít kumulativní distribuční funkci, jako funkci chování izolace, jelikož hodnoty obdržené kumulativní distribuční funkcí se dají považovat za dostatečně spolehlivé v rámci predikce chování izolace v provozních podmínkách. Pro zjištění pravděpodobnosti průrazu na určité napěťové hladině je nutné kumulativní distribuční funkci přepočítat na funkci chování izolace [4].

2.4.4 Určení technicky významných kvantilů

Stejně jako u zkoušky více hladinami je jedním z posledních kroků statistického vyhodnocení určení technicky významných kvantilů, mezi které spadá napětí s 50% pravděpodobností průrazného výboje, statistická hodnota výdržného napětí a statistická hodnota provozního napětí. Posledním krokem je interpretace výsledků zkoušky [4].

2.5 Interpretace výsledků vysokonapěťových zkoušek

Výsledky vycházející ze statistického vyhodnocení vysokonapěťových zkoušek mají důležitý význam při určování koordinačního výdržného napětí. Koordinační výdržné napětí respektuje chování izolace při namáhání reprezentativním přepětím a zohledňuje provozní podmínky. Pokud známe statistickou distribuční funkci popisující chování izolace pro různá napěťová namáhání a zároveň známe funkci hustoty pravděpodobnosti popisující výskyt přepětí, můžeme spočítat riziko poruchy. Kritériem chování izolace je pak přijatelná poruchovost, která určuje požadavky na izolaci. Riziko poruchy izolace se tedy určuje pomocí následující rovnice [9]:

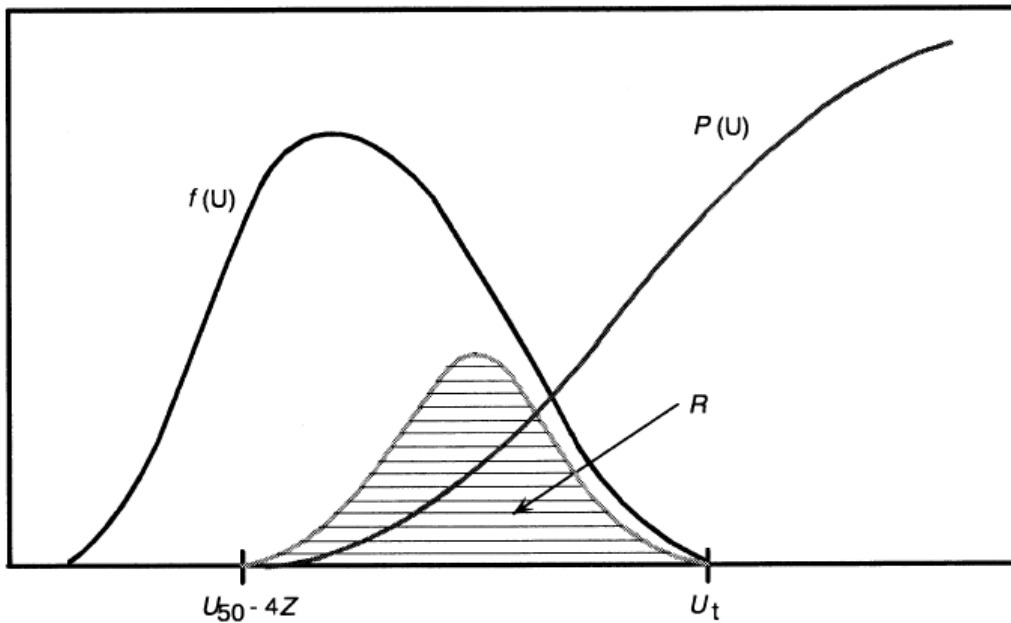
$$R = \int_0^{\infty} f(U) \cdot P(U) dU \quad (2.25)$$

Z fyzikálního hlediska je nutné funkci chování izolace $P(U)$ v určitém bodě useknout, protože k průraznému výboji nemůže dojít pod nějakou minimální hodnotou napětí. Useknutí funkce lze provést pomocí následující rovnice [9]:

$$U_{spec} = \begin{cases} U_{50} - 3Z \\ U_{50} - 4Z \end{cases} \quad (2.26)$$

, kde U_{50} je hodnota napětí s 50% pravděpodobností přeskočení, Z je směrodatná odchylka a U_{spec} je hodnota napětí, při které je pravděpodobnost průrazu $P(U) = 0$ [9].

Konkrétní postupy a definice v rámci určení koordinace izolace jsou popsány v normách ČSN EN 60071-1 ed.3 a ČSN EN 60071-2 ed.2. Na Obr. 2.14 lze vidět příklad vyhodnocení rizika poruchy.



Obr. 2.14 Vyhodnocení rizika poruchy dle ČSN EN 60071-2 [9]

3 Realizace napět'ových zkoušek

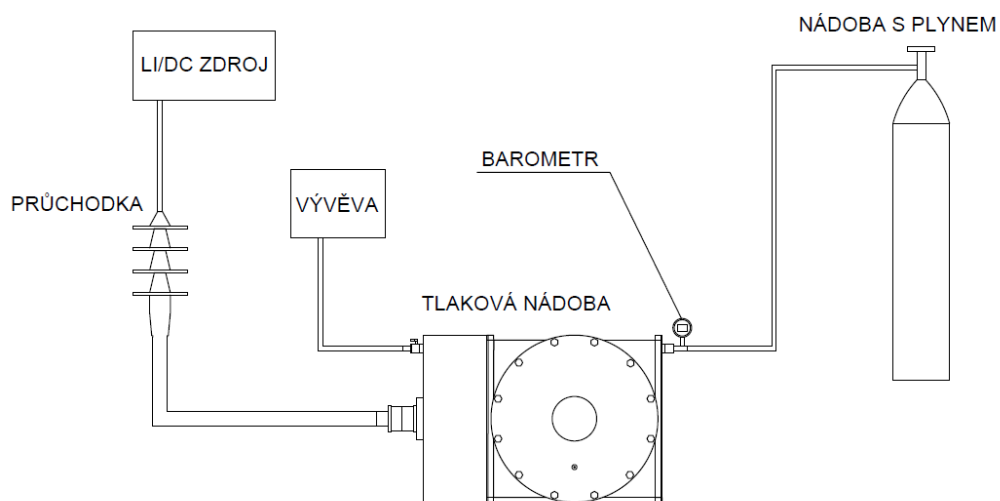
V rámci praktické části jsem provedl řadu napět'ových zkoušek na samočinně obnovující se izolaci v podobě syntetického vzduchu s obsahem kyslíku 20 % a dusíku 80 %. Výběr právě syntetického vzduchu souvisí s v dnešní době velmi diskutovanou problematikou nahrazení izolačního plynu SF₆. Plyn SF₆ je široce využívaný elektroizolační plyn. Jeho elektroizolační vlastnosti jsou velice spolehlivé, ale jedná se o skleníkový plyn s vysokým potenciálem globálního oteplování (okolo 23 500 GWP) [10]. V dnešní době je cílem snižovat znečišťování a emise skleníkových plynů do životního prostředí. V budoucnu bude nutné plyn SF₆ nahradit jiným izolačním plynem, který bude disponovat značně nižším potenciálem globálního oteplování a zároveň bude mít dostatečně spolehlivé elektroizolační vlastnosti. Touto problematikou se zabývá řada pracovišť, jak je patrné například z obsáhlého materiálu pracovní skupiny CIGRE [10]. Syntetický vzduch patří mezi potenciální plyny, které by mohly alespoň částečně nahradit plyn SF₆. Provedené napět'ové zkoušky se zaměřují na dielektrické vlastnosti syntetického vzduchu v silně nehomogenním poli. Výběr zkušebního uspořádání a zvolených parametrů byl určený požadavkem zaměřit se na kontrolu metodiky zkoušek, jejich reprodukovatelnost, možnost statistického přístupu ke zkouškám a případné odhalení a interpretaci anomálií. Zkoušky provedené pro účely této diplomové práce jsou výběrem ze souboru zkoušek provedených pro firmu Schneider electric. V rámci smluvního výzkumu realizovala laboratoř testy střídavým a impulzním napětím na souboru elektrodových systémů s různou geometrií, a tedy i nehomogenitou elektrického pole. Testy řešily kromě přeskokového napětí v závislosti na typu elektrod ještě také závislost na vzdálenosti mezi elektrodami a tlaku. V případě některých testů vykazoval charakter výsledků i podoba výbojového kanálu určité anomálie, které nemají jednoznačné fyzikální vysvětlení. V souvislosti s tím bylo nutné potvrdit reprodukovatelnost takových výsledků, nastavení metodiky a zároveň zkontrolovat podmínky vlastní zkoušky, které mohou mít vliv na statistické chování izolace (kontrola uzemnění, odstranění volných částic v prostoru nádoby a kontrola tvaru a povrchu elektrod). Pro vysokonapět'ové zkoušky bylo zvoleno uspořádání silně nehomogenního pole v podobě ostré elektrody s hrotem o průměru 0,5 mm a kulové elektrody s poloměrem 75 mm. Jako testovaná plynná izolace byl použit již zmíněný syntetický vzduch s obsahem kyslíku 20 % a dusíku 80 %. Konkrétně se jednalo o zkoušky stejnosměrným napětím a atmosférickým impulzem. Na Obr. 3.1 je vidět

elektrodové uspořádání uvnitř tlakové nádoby, která byla pro vysokonapětěvé zkoušky použita.



Obr. 3.1 Otevřená tlaková nádoba s testovacími elektrodami

Na ostrou elektrodu byl připojen zdroj vysokého napětí přes průchodku a kulová elektroda byla uzemněna. Pro odčerpání vzduchu v nádobě byla použita vývěva připojená k tlakové nádobě přes ventil. Na přívodu plynu z tlakové lahve byl umístěn barometr pro měření tlaku plynu. Na Obr. 3.2 lze vidět schéma měřicího stanoviště.



Obr. 3.2 Schématické znázornění měřicího stanoviště

3.1 Zkoušky stejnosměrným napětím na plynné izolaci

Zkoušky stejnosměrným napětím metodou postupným namáháním byly provedeny pro již zmíněné uspořádání hrot-koule. Při testech byla udržována konstantní vzdálenost mezi elektrodami 4 cm a měněným parametrem zde byl tlak syntetického vzduchu v uzavřené nádobě. První test byl proveden pro otevřenou nádobu, kvůli ověření a následnému porovnání chování otevřeného a uzavřeného prostoru nádoby při atmosférickém tlaku. Po dokončení testu s otevřenou nádobou se plynule přešlo na testy v uzavřené nádobě. Pomocí vývěvy byl odčerpán vzduch z uzavřené nádoby a následně byl do nádoby načerpán syntetický vzduch (20 % O₂, 80 % N₂). Jako zdroj stejnosměrného napětí byl použit napěťový zdvojovač, který je vidět na Obr. 3.3. Vstupem do napěťového zdvojovače byl napájecí transformátor, který byl regulován regulačním transformátorem. Měření přeskových napětí bylo prováděno pomocí vrcholového voltmetru MU17 připojeným na odporový dělič.



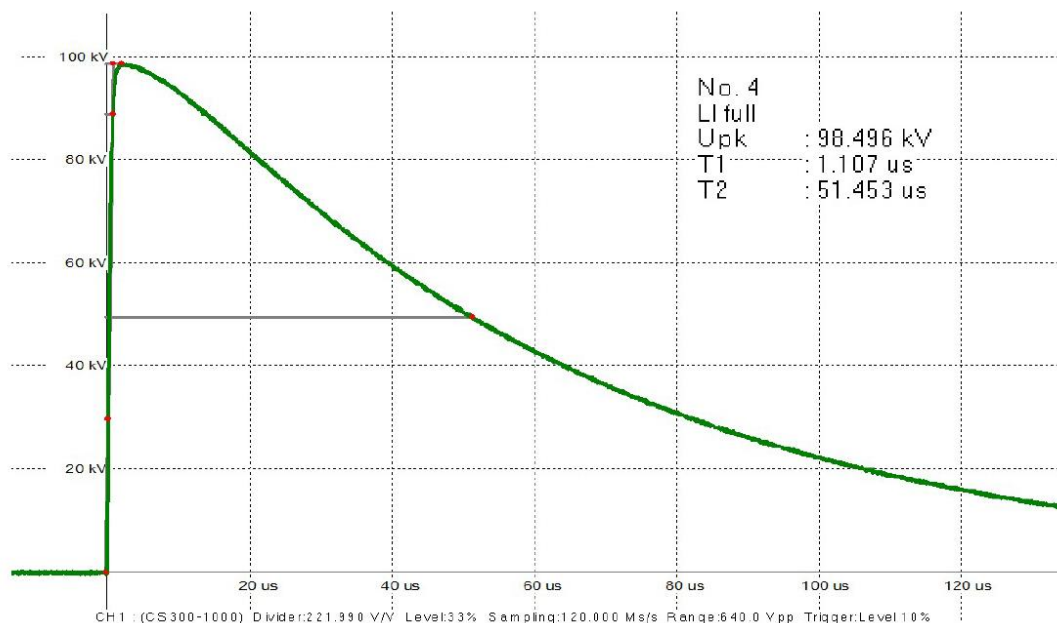
Obr. 3.3 Napěťový zdvojovač

Obecný postup zkoušky postupným namáháním je popsán v kapitole 1.2.3. U této metody se jedná o postupné zvyšování napětí až do přeskočení mezi elektrodami. Na ostrou elektrodu byla přivedena záporná polarita stejnosměrného napětí. Napětí bylo postupně zvyšováno až do přeskočení, který byl doprovázen vizuálními a zvukovými projevy. V okamžik přeskočení byla zaznamenána hodnota přeskového napětí. Čas mezi zkouškami byl stanoven 60 s a

rychlost zvyšování napětí přibližně 2 kV/s. Zkouška byla provedena v rozmezí tlaků 1 až 3 bary (s krokem 0,5 baru). Na každé hladině tlaku bylo provedeno celkem 30 příložení napětí. Počet příložení napětí byl zde zvolen 30 převážně z důvodu vytvoření dostatečně obsáhlého statistického souboru dat. Před každou zkouškou byla změřena teplota a atmosférický tlak. Během testu bylo možné pozorovat částečné výboje v podobě korónového výboje vznikající na ostré elektrodě. Zapalovací napětí korónového výboje bylo během všech zkoušek na dané hladině tlaku v podstatě konstantní, což odpovídá teoretickým předpokladům a další zkoumání částečných výbojů není předmětem této diplomové práce. V rámci stejnosměrných zkoušek bylo naměřeno přes 200 hodnot přeskokového napětí pro různé hodnoty tlaku. Všechny naměřené hodnoty ze zkoušek stejnosměrným napětím jsou umístěny v příloze B. V kapitole 4.1 je provedeno statistické vyhodnocení získaných výsledků a jejich interpretace.

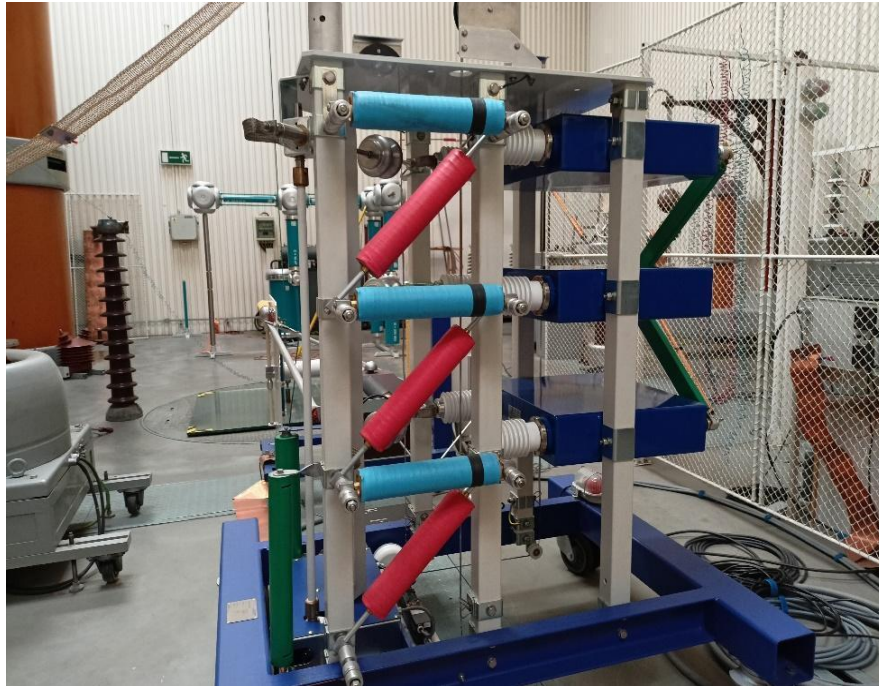
3.2 Zkoušky atmosférickým impulzem na plynné izolaci

Zkoušky atmosférickým impulzem byly provedeny pro stejné uspořádání hrot-koule. Jednalo se o zkoušky normalizovaným atmosférickým impulzem kladné polarity s parametry 1,2/50 μ s. Na Obr. 3.4 lze vidět záznam plného impulzu z vyhodnocovacího systému rázového generátoru [11].



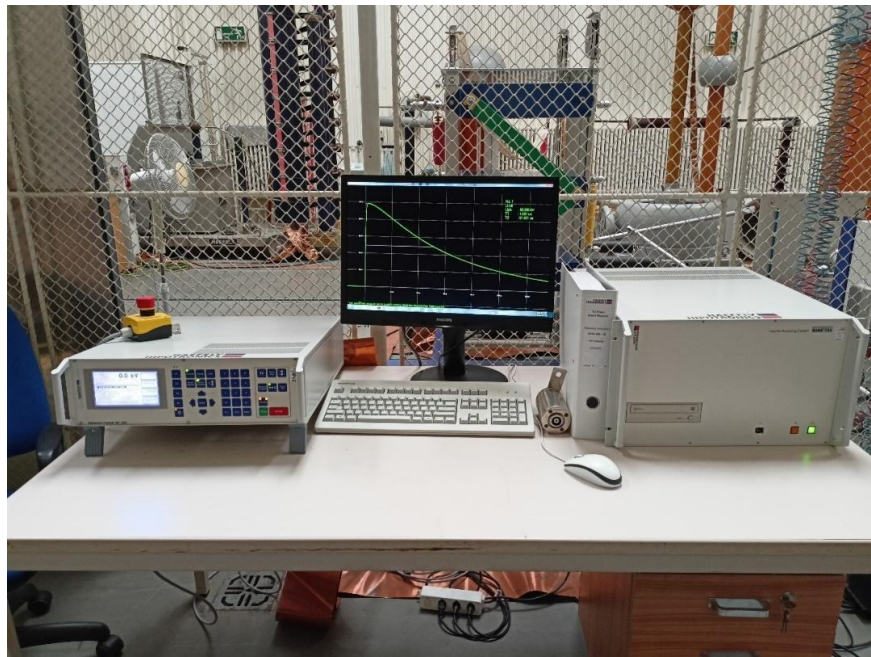
Obr. 3.4 Záznam plného atmosférického impulzu

Jako zdroj impulzu zde byl použit třístupňový rázový generátor SGS-300-15 od firmy Haefely Hipotronics [11]. Každý stupeň rázového generátoru dosahuje maximálního napětí 100 kV a energie 5 kJ. Na Obr. 3.5 lze vidět rázový generátor.



Obr. 3.5 Rázový generátor

Obsluha rázového generátoru probíhala na měřicím stanovišti s počítačem pro analýzu a vizualizaci dat a řídicím systémem pro samotné nastavení rázového generátoru. Na Obr. 3.6 lze vidět fotografii měřicího stanoviště.



Obr. 3.6 Měřicí stanoviště pro zkoušky atmosférickým impulzem

3.2.1 Zkouška více hladinami

Pro zkoušku více hladinami bylo měřením zjištěno, u jaké napěťové hladiny dochází k průraznému výboji s nízkou, či nulovou pravděpodobností. Tato hodnota napětí byla použita jako počáteční napěťová hladina. Počet namáhání na napěťové hladině byl zvolen 25 s napěťovým krokem 5 kV. Doba mezi jednotlivými přiloženými impulzy na dané napěťové hladině byla zvolena 30 s. Zkoušky byly provedeny pro vzdálenosti elektrod 4, 6 a 9 cm a tlak 3 a 3,5 baru. V Tab. 3.1 lze vidět výstupní hodnoty pro test více hladinami pro vzdálenost 6 cm a tlak 3,5 baru. Symbol „x“ reprezentuje průraz a symbol „-“ reprezentuje výdrž.

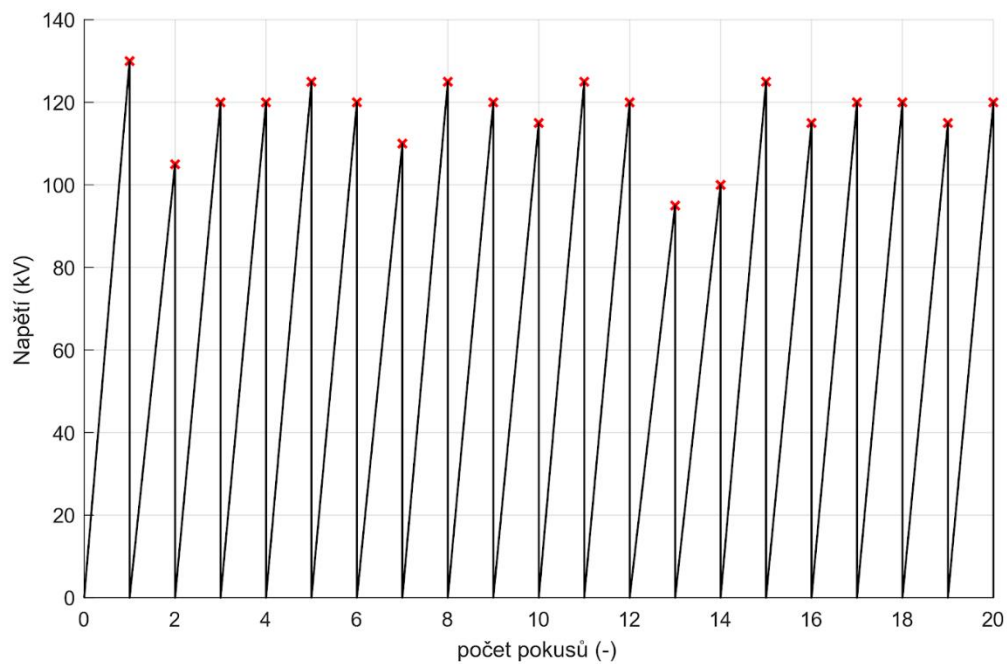
Tab. 3.1 Změřené hodnoty u zkoušky více hladinami

U (kV)	MLM-LI-test, 6 cm, 3,5bar																				relativní četnost (-)	
105	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,04
110	-	-	-	-	-	x	x	-	x	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	0,16
115	-	-	-	x	x	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	x	x	-	-	-	0,2
120	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
125	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
130	-	-	-	-	-	x	x	x	x	-	-	-	x	x	-	x	x	-	x	-	x	0,4
135	x	-	-	-	-	x	-	-	x	x	x	-	x	-	-	x	-	-	x	x	x	0,48
140	-	-	-	x	x	-	x	x	x	x	x	-	-	x	-	-	-	-	x	-	-	0,4
145	x	-	x	-	-	-	-	x	x	x	x	-	x	-	x	x	x	x	-	x	-	0,6
150	-	x	x	x	x	x	x	x	x	-	x	x	x	-	x	-	-	x	x	x	-	0,76
155	x	-	x	x	x	x	x	-	x	x	x	x	x	-	x	x	x	x	x	x	x	0,88
160	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	0,96

Během zkoušek při vzdálenostech 6 a 9 cm často docházelo k průrazným výbojům mezi ostrou elektrodou a vnitřkem tlakové nádoby. Počet průrazných výbojů do tlakové nádoby narůstal se zvyšující se vzdáleností a tlakem. Pro kontrolu opakovatelnosti výsledků provedené zkoušky bylo nutné tlakovou nádobu vyčerpat, otevřít a následně zkontrolovat stav povrchu elektrod, zkontrolovat uzemnění nádoby a odstranit volné částice. Po provedení těchto opatření byly některé zkoušky zopakovány. Konkrétně se jednalo o zkoušky pro vzdálenost 6 cm při tlacích 3 a 3,5 baru. Porovnání výsledků a jejich statistické vyhodnocení je rozebráno v kapitole 4.

3.2.2 Zkouška postupným namáháním

Metodu postupným namáháním pro zkoušku atmosférickým impulzem lze provést jedinečně tak, že se na zkoušenou izolaci postupně přikládají normalizované impulzy po určitých napěťových krocích, dokud nedojde k průraznému výboji. Zkouška postupným namáháním byla provedena pro vzdálenost elektrod 6 cm a tlak 3 bary. Hladina počátečního napětí, u které jsme neočekávali průraz, byla dle předchozích zkušeností ze zkoušky více hladinami zvolena 80 kV. Napěťový krok byl zvolen 5 kV a polarita impulsu kladná. Zkouška obsahovala celkem 20 průrazných výbojů a čas mezi zkouškami zde byl ponechán ze zkoušky stejnosměrným napětím a to 30 s. Na Obr. 3.7 lze vidět záznam průběhu zkoušky postupným namáháním.



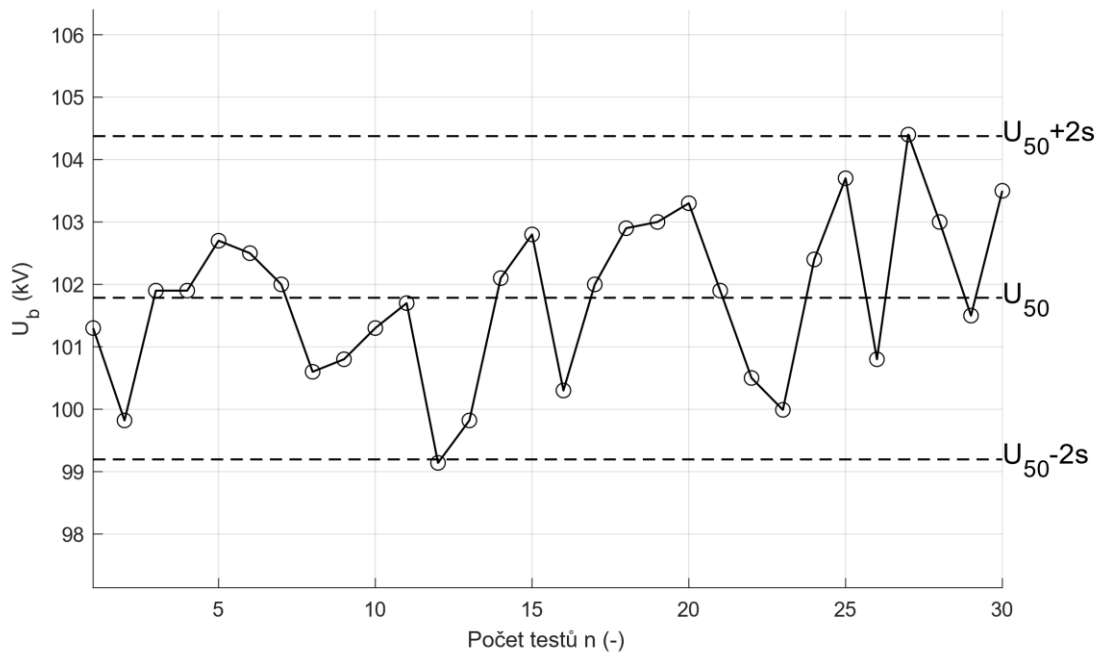
Obr. 3.7 Záznam průběhu zkoušky postupným namáháním

4 Statistické vyhodnocení vysokonapět'ových zkoušek

Pro statistické vyhodnocení provedených zkoušek jsem vytvořil skript v programu Matlab se statistickou knihovnou. Statistická knihovna poskytuje funkce jako deskriptivní statistika včetně vizualizace, pravděpodobnostní rozdělení, testování hypotéz a mnoho dalších [12][13]. Nejedná se o univerzální skript pro všechny zkoušky, protože samotné vyhodnocení různých metod zkoušek má zásadní odlišnosti. Skripty použité pro vyhodnocení zkoušek jsou umístěny v příloze A a v příloze I. V rámci statistického vyhodnocení jsem pracoval s daty, která jsem sám naměřil a také s daty, která mi byla poskytnuta vysokonapět'ovou laboratoří. U impulzních zkoušek více hladinami jsem se v rámci statistického vyhodnocení zaměřil na ty zkoušky, které vykazovaly jisté anomálie. Ze statistického hlediska se jednalo o to, že některé zkoušky nevykazovaly charakter pouze jednoho pravděpodobnostního rozdělení. Pro potvrzení získaných výsledků a ověření metodiky zkoušek jsem některé vybrané zkoušky zopakoval. V následujících podkapitolách jsem provedl statistické vyhodnocení jednotlivých zkoušek s ohledem na měněné parametry, porovnání postupů a metodiku zkoušek.

4.1 Zkoušky stejnosměrným napětím

Výsledkem zkoušky stejnosměrným napětím metodou postupným namáháním je pro každou hodnotu tlaku 30 hodnot přeskokového napětí. Pro statistické vyhodnocení je nutné mít seřazené výsledky ve dvou podobách, a to chronologicky dle průběhu zkoušky a také vzestupně pro zjednodušení výpočtu kumulativních distribučních funkcí. Pro všechny zkoušky stejnosměrným napětím jsem uvažoval, že naměřená data odpovídají normálnímu rozdělení. Následující výpočty jsou provedeny pro tlak 2 bary. Výpočty pro všechny zkoušky jsou uvedeny v přílohách B až H. Jako první krok jsem pro ověření věrohodnosti dat provedl grafický test nezávislosti, který je vidět na Obr. 4.1. Z obrázku je patrné, že data nevykazují žádný trend a dají se tedy považovat za nezávislá.



Obr. 4.1 Test nezávislosti pro 2 bary

Výpočet střední hodnoty a rozptylu jsem provedl pomocí následujících rovnic:

$$\text{Střední hodnota: } \mu^*_{2bar} = \underline{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 101,786 \text{ kV} \quad (4.1)$$

$$\text{Rozptyl: } \sigma^*_{2bar} = s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \underline{x})^2 = 1,2949 \text{ kV} \quad (4.2)$$

Pro výpočet jsem využil funkce **mean** a **std**. Pro ověření hodnot rozptylu a střední hodnoty a výpočet jejich konfidenčních intervalů jsem využil funkce ze statistické knihovny **fitdist**, která vypočítá rozptyl a střední hodnotu včetně jejich konfidenčních intervalů [13].

```
pd = fitdist(Ub', 'Normal')
pd = Normal distribution
mu = 101.786    [101.302, 102.269]
sigma = 1.2949  [1.03127, 1.74076]
```

Dalším krokem je provedení testu shody distribuční funkce. Využil jsem Kolmogorov-Smirnov test shody. Tento test se provádí pro normované normální rozdělení. Využil jsem zde odhadů rozptylu a střední hodnoty z předešlých výpočtů. Pro naměřená data jsem provedl normalizaci dle následující rovnice:

$$U_{bnorm} = \frac{U_b - \mu^*_{1,5bar}}{\sigma^*_{1,5bar}} \quad (4.3)$$

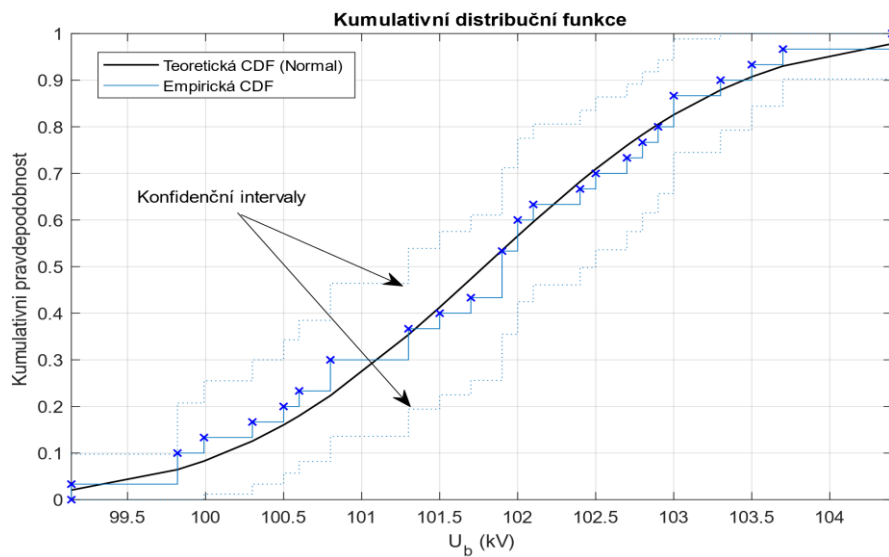
Následně jsem využil v Matlabu funkci **kstest**. Výstupem z této funkce je přijetí či odmítnutí nulové hypotézy, která tvrdí, že testovaná data pochází z daného pravděpodobnostního rozdělení s hladinou významnosti $\alpha = 0,05$. Výsledkem je logická hodnota, přičemž výsledek *1* znamená odmítnutí a výsledek *0* přijetí nulové hypotézy [13].

```
[h,p,ksstat,cv] = kstest((Ub-mean(Ub))/std(Ub));
Kolmogorov-Smirnov test: h = 0, p = 0.88383, ksstat =
0.10185, cv = 0.24173
```

Kolmogorův test shody přijímá nulovou hypotézu, že naměřená data pochází z normálního rozdělení ($h = 0$). Hodnota $p = 0,88383$ je dost vysoká, což podporuje přijetí nulové hypotézy. U nízkých hodnot p se nulová hypotéza automaticky odmítá [13]. Hodnota $cv = 0,24173$ reprezentuje kritickou hodnotu testu s hladinou významnosti $\alpha = 0,05$. Maximální odchylka teoretické a empirické distribuční funkce je dána hodnotou $ksstat = 0,10185$. Následně jsem pomocí funkce **ecdf** vypočítal a graficky znázornil empirickou distribuční funkci v podobě schodovité funkce včetně konfidenčních intervalů s hladinou významnosti $\alpha = 0,05$ [13]. Po ověření, že zkoumaná data mají charakter normálního rozdělení, a znázornění empirické distribuční funkce jsem provedl výpočet teoretické kumulativní distribuční funkce dle rovnice:

$$F(x; \mu; \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (4.4)$$

Pro tento výpočet jsem využil funkci **normcdf**, jejímž výstupem je spojitá kumulativní distribuční funkce se střední hodnotou a rozptylem z předešlých výpočtů [13]. Obě funkce jsem vložil do grafu na Obr. 4.2



Obr. 4.2 Porovnání teoretické a empirické kumulativní distribuční funkce pro 2 bary

Následně jsem pomocí funkce **norminv** spočítal inverzní kumulativní distribuční funkci [13]. Provedl jsem korelační výpočty pro inverzní kumulativní distribuční funkci v závislosti na přeskokovém napětí dle následujících rovnic:

$$s_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \underline{x})(y_i - \underline{y}) = 1,2383 \quad (4.5)$$

, kde s_{xy} je empirická kovariance pravděpodobnosti přeskočků a přeskokového napětí, \underline{x} a \underline{y} jsou jejich střední hodnoty.

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} = \frac{1,2383}{1,2936 \cdot 0,9651} = 0,9918 \quad (4.6)$$

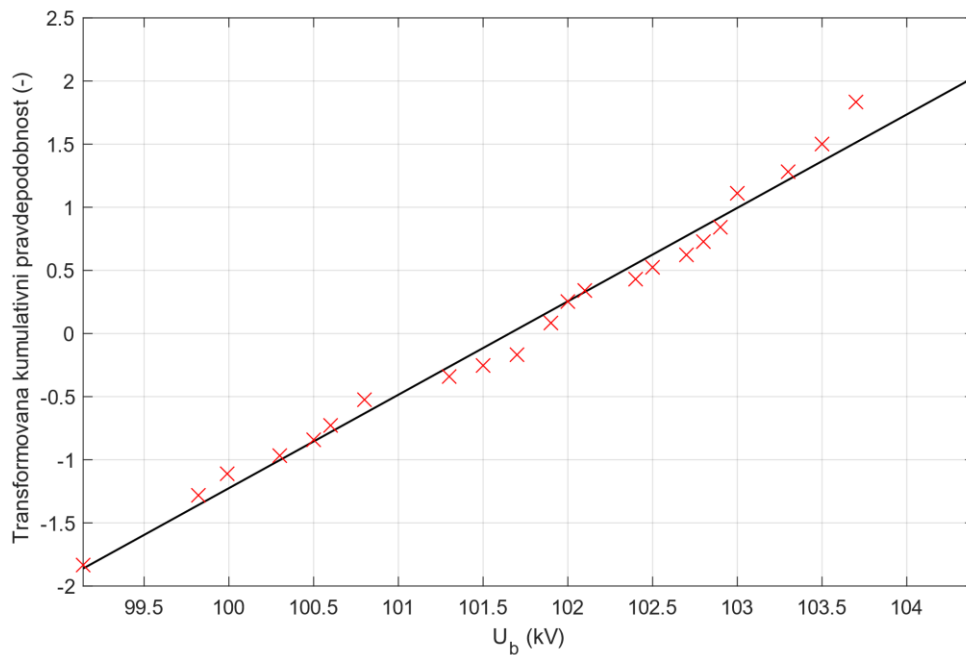
Korelační koeficient r vychází velice blízko jedné, z čehož vyplývá silná vzájemná závislost obou proměnných. Následně jsem provedl lineární regresi výpočtem regresního koeficientu a koeficientu polohy:

$$b_{yx} = \frac{s_{xy}}{s_x^2} = \frac{1,2383}{1,2936^2} = 0,74 \quad (4.7)$$

$$a_{yx} = \underline{y} - b_{yx} \underline{x} = 0,063 - 0,74 \cdot 101,7477 = -75,2209 \quad (4.8)$$

Rovnice regresní přímky:

$$y = a_{yx} + b_{yx} \cdot x = 0,74 \cdot x - 75,2209 \quad (4.9)$$



Obr. 4.3 Lineární regrese závislosti pravděpodobnosti na přeskokovém napětí při tlaku 2 bary

Regresní přímka zde odpovídá teoretickému pravděpodobnostnímu rozdělení s parametry $\mu = 101,6554 \text{ kV}$ a $\sigma = 1,3514 \text{ kV}$. Provedl jsem znovu Kolmogorov-Smirnov test s parametry získanými lineární regrese a hodnoty jsem porovnal s původními odhady μ^*_{2bar} a σ^*_{2bar} obdržené funkcí **fitdist** [13].

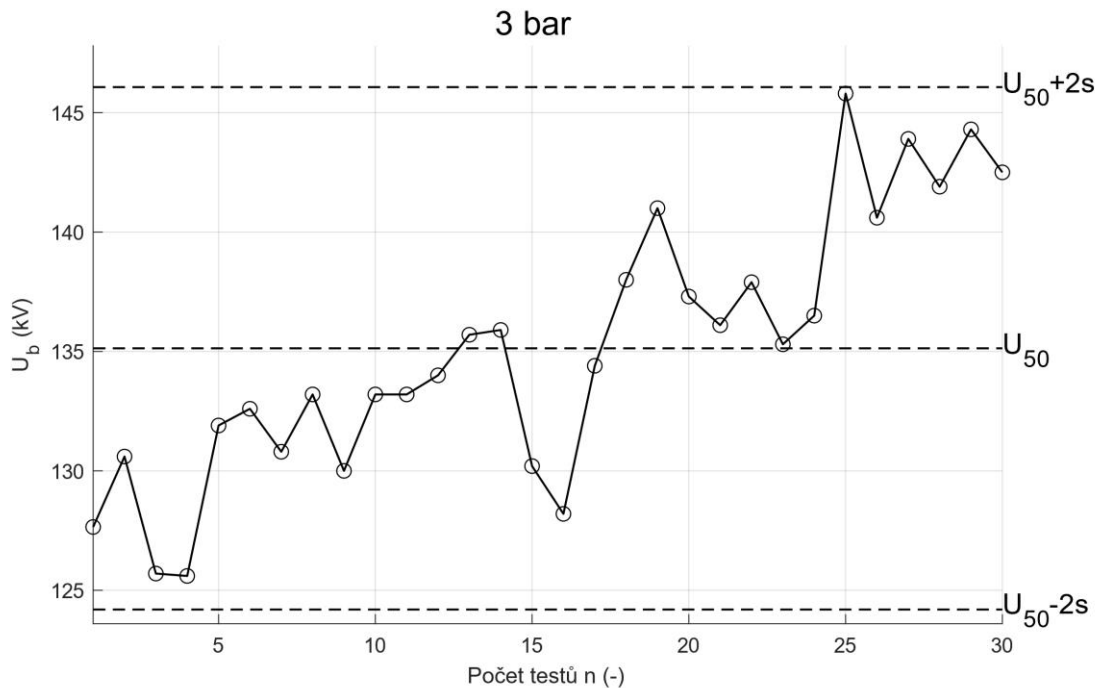
Tab. 4.1 Porovnání výsledných hodnot lineární regrese a funkcí fitdist

Metoda	μ (kV)	σ (kV)	ksstat (-)	cv (-)
Funkce fitdist	101,786	1,2949	0,10185	0,1904
Lineární regrese	101,6554	1,3514	0,13848	

V Tab. 4.1 lze vidět porovnání hodnot μ , σ a *ksstat* pro obě metody. Obě metody vyhovují Kolmogorov-Smirnov testu pro přísnější hladinu významnosti $\alpha = 0,2$.

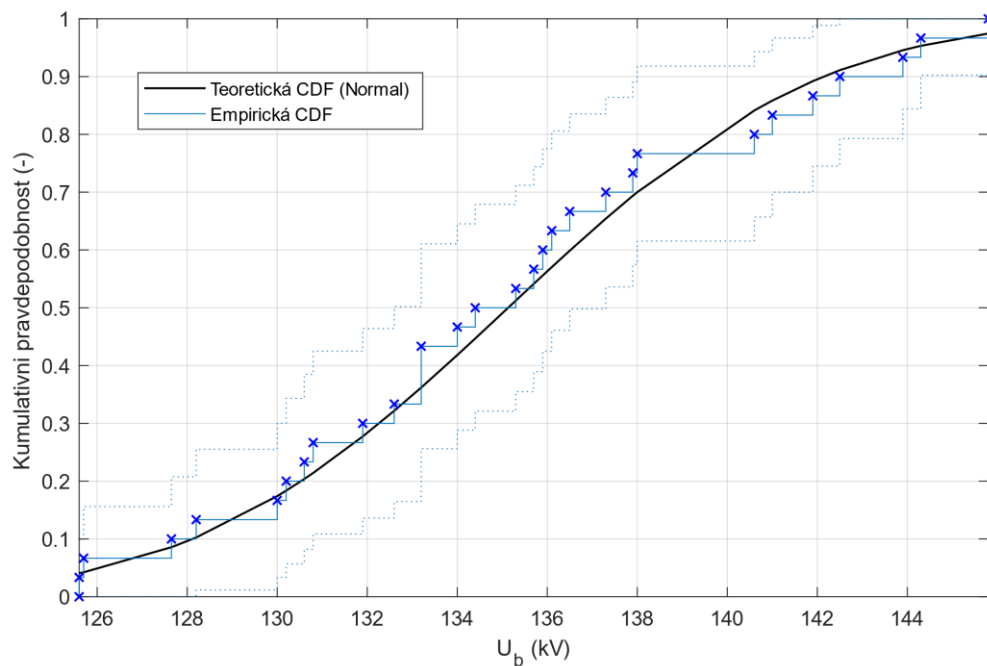
4.1.1 Závislost zkoušky pro tlak 3 bary

Během statistického vyhodnocování vyšlo najevo, že test při tlaku 3 bary jasně vykazuje stoupající trend a naměřená data nemohou být považována za nezávislá. Stoupající trend naměřených hodnot je patrný z Obr. 4.4.



Obr. 4.4 Test nezávislosti pro tlak 3 bary

Důvodem závislosti testu je pravděpodobně vysoká hodnota tlaku, která způsobuje zpomalení rekombinačních procesů. Výboje za sebou zanechaly prostorové náboje, které ovlivnily následující zkoušky. Pro validaci by bylo nutné test zopakovat a zvýšit čas mezi přiložením napětí ze 30 s na alespoň 60 s a více. I přes závislost dat jsem provedl kompletní statistické vyhodnocení, které ukázalo, že data pochází z normálního rozdělení se střední hodnotou $\mu_{3bar} = 135,1317 \text{ kV}$ a se zdaleka největším rozptylem hodnot $\sigma_{3bar} = 5,4684 \text{ kV}$. Shoda empirické a teoretické distribuční funkce je v tomto případě významná. Graf teoretické a empirické kumulativní distribuční funkce lze vidět na Obr. 4.5. Statistické vyhodnocení zkoušky je umístěno v příloze H.



Obr. 4.5 Empirická a teoretická kumulativní distribuční funkce pro 3 bar (závislá data)

4.2 Zkoušky atmosférickým impulzem

4.2.1 Zkouška více hladinami

Očekávaným výstupem ze zkoušky více hladinami je přímo funkce chování izolace, jelikož se zde na rozdíl od zkoušky postupným namáháním pracuje s relativní četností, nikoliv s četností kumulativní. Absolutní četnosti na daných napěťových hladinách určují pravděpodobnost selhání izolace přímo na dané napěťové hladině. Následující výpočty jsou provedeny pro vzdálenost 6 cm a tlak 3,5 bar. Grafy všech zkoušek jsou umístěny v přílohách J až N. Pro získání funkce chování izolace je nutné nejprve zjistit, zda jsou naměřená data nezávislá. Jako první krok jsem tedy provedl grafický test nezávislosti, který je uveden v Tab. 4.2. Z tabulky je patrné, že data nemají žádný jednoznačný trend, dle kterého by se dalo usoudit, že se jedná o závislý test.

Tab. 4.2 Grafický test nezávislosti pro zkoušku více hladinami (6 cm, 3,5 bar)

U (kV)	Test nezávislosti, 6 cm, 3,5bar					h ₂₅ (-)
105	x - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	0,04
h ₅ (-)	0,2	0	0	0	0	
110	- - - - -	- x x - x	- - - - -	x - - - -	- - - - -	0,16
h ₅ (-)	0	0,6	0	0,2	0	
115	- - - x x	- - - - -	x - - - -	- - - x x	- - - - -	0,2
h ₅ (-)	0,4	0	0,2	0,4	0	
120	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	0
h ₅ (-)	0	0	0	0	0	
125	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	- - - - -	0
h ₅ (-)	0	0	0	0	0	
130	- - - - -	- x x x x	- - - x x	- x x - -	x - x - -	0,4
h ₅ (-)	0	0,8	0,4	0,4	0,4	
135	x - - - -	x - - x x	x - x - -	x - - x	x x - x x	0,48
h ₅ (-)	0,2	0,6	0,4	0,4	0,8	
140	- - - x x	- x x x x	x x - - x	- - - - x	- - - - -	0,4
h ₅ (-)	0,4	0,8	0,6	0,2	0	
145	x - x - -	- - - x x	x x - x -	x x x x -	x - x x x	0,6
h ₅ (-)	0,4	0,4	0,6	0,8	0,8	
150	- x x x x	x x x x	x x x - x	- - x x x	- x x x x	0,76
h ₅ (-)	0,8	0,8	0,8	0,6	0,8	
155	x - x x x	x x - x x	x x x x -	x x x x x	x x x x x	0,88
h ₅ (-)	0,8	0,8	0,8	1	1	
160	x x x x x	x x x x x	x x x x x	x x x x -	x x x x x	0,96
h ₅ (-)	1	1	1	0,8	1	

Hodnoty uvedené v Tab. 4.2 také obsahují dopočítané relativní četnosti průrazných výbojů na daných napěťových hladinách.

Pro získání funkce chování izolace jsem využil metodu lineární regrese. Pro použití lineární regrese je nejprve nutné převést relativní frekvence inverzní funkcí normálního rozdělení pro linearizaci osy y. Pro výpočet inverzní funkce jsem využil funkci *norminv*. Následně jsem provedl korelační výpočty dle následujících rovnic:

$$s_{xy} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \underline{x})(y_i - \underline{y}) = 19,3867 \quad (4.10)$$

$$r = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} = \frac{19,3867}{19,2137 \cdot 1,0485} = 0,9623 \quad (4.11)$$

$$b_{yx} = \frac{s_{xy}}{s_x^2} = \frac{19,3867}{19,2137^2} = 0,0525 \quad (4.12)$$

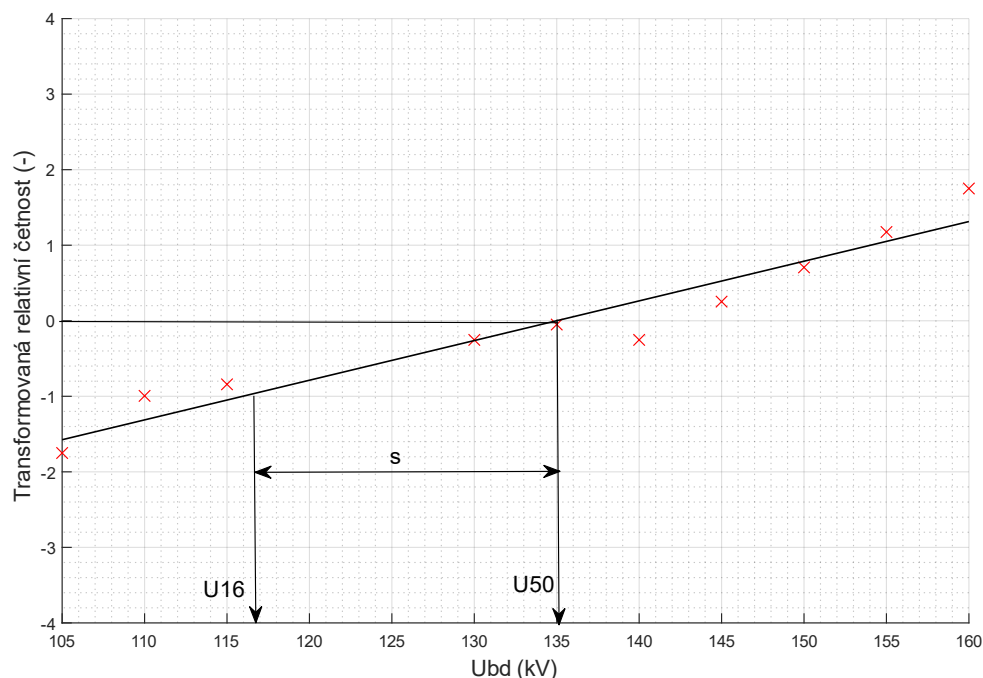
$$a_{yx} = \underline{y} - b_{yx} \underline{x} = -0,0258 - 0,0525 \cdot 134,5 = -7,0891 \quad (4.13)$$

$$y = a_{yx} + b_{yx} \cdot x = 0,0525 \cdot x - 7,0891 \quad (4.14)$$

Získanou regresní přímkou jsem aproximoval transformovanou relativní četnost a následně jsem odečetl významné kvantily pro určení parametrů teoretického normálního rozdělení. S využitím rovnice regresní přímky (4.14) jsem odečetl kvantily U_{16} a U_{50} . Pomocí těchto kvantilů jsem vypočítal parametry normálního rozdělení, které odpovídá regresní přímce:

$$\text{Střední hodnota: } \mu = U_{50} = 134,9918 \quad (4.15)$$

$$\begin{aligned} \text{Rozptyl: } \sigma &= U_{50} - U_{16} = 134,9918 - 115,9496 \\ &= 19,0423 \end{aligned} \quad (4.16)$$



Obr. 4.6 Lineární regrese zkoušky více hladinami (6 cm, 3,5 bar)

Pro obdržené normální rozdělení $N(134,9918; 19,0423)$ jsem provedl Kolmogorov-Smirnov test shody distribuční funkce. V kapitole 4.1 jsem pro realizaci tohoto testu využil funkci **kstest** ze statistického balíčku pro matlab. Tato funkce automaticky určuje velikost kritické hodnoty na základě velikosti souboru vložených dat v normovaném normální rozdělení.

Funkci `kstest` je tedy vhodné použít pro zkoušky postupným namáháním, jelikož velikost souboru dat (počet napěťových hladin, při kterých došlo k průraznému výboji) přímo odpovídá velikosti souboru kumulativních četností.

U zkoušek více hladinami toto není možné použít, protože velikost souboru dat u relativní četnosti odpovídá počtu přiložení na dané napěťové hladině. Z tohoto důvodu jsem Kolmogorov-Smirnov test provedl manuálně:

```
%Kolmogorov - Smirnov test
theoretical = 0.5*erfc(-(coeffs(1)*Ub+coeffs(2))./sqrt(2));
empirical = 0.5*erfc(-normrelfreq./sqrt(2));
dmax=max(abs(empirical-theoretical));
k02=0.208;
k005=0.264;
k001=0.317;
if dmax<k02
    disp(['Přijetí nulové hypotézy na hladině významnosti
0,2:', num2str(dmax), '< ', num2str(k02)]);
elseif dmax<k005
    disp(['Přijetí nulové hypotézy na hladině významnosti
0,05:', num2str(dmax), '< ', num2str(k005)]);
elseif dmax<k001
    disp(['Přijetí nulové hypotézy na hladině významnosti
0,01:', num2str(dmax), '< ', num2str(k001)]);
else
    disp(['Odmítnutí nulové hypotézu:', num2str(dmax), ' > ',
num2str(k02)]);
end
```

Výpočet pravděpodobností teoretické a empirické distribuční funkce jsem provedl přepočtem pomocí funkce `erfc` dle následující rovnice [13].

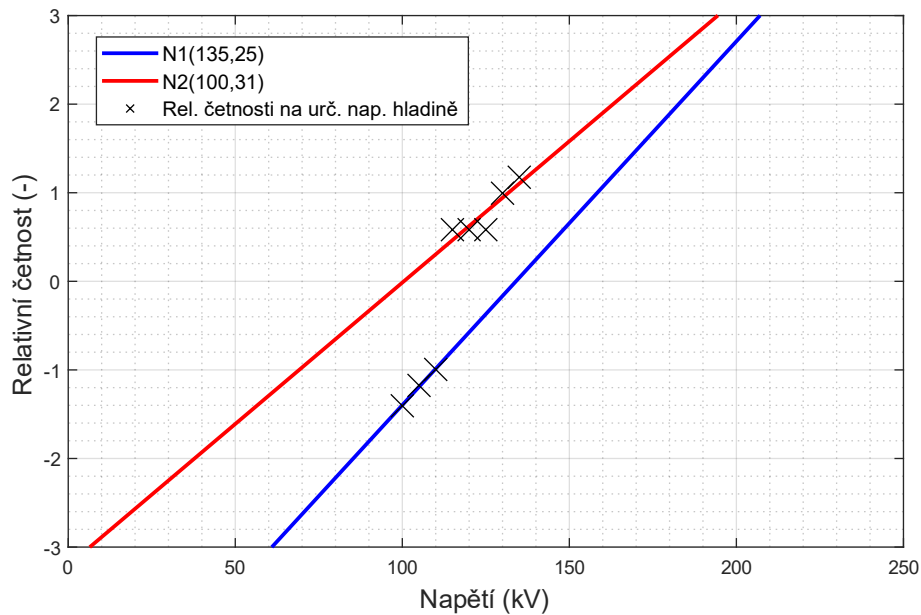
$$F(x) = \frac{1}{2} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{-x}{\sqrt{2}}\right) \quad (4.17)$$

Následně jsem si určil kritické hodnoty Kolmogorov-Smirnov testu pro $n = 25$ a provedl jsem testy shody distribuční pro různé hladiny významnosti. Pro zkoušku se vzdáleností elektrod 6 cm a tlak 3,5 bar odpovídá empirická distribuční funkce teoretické s přísnou hladinou významnosti $\alpha = 0,2$.

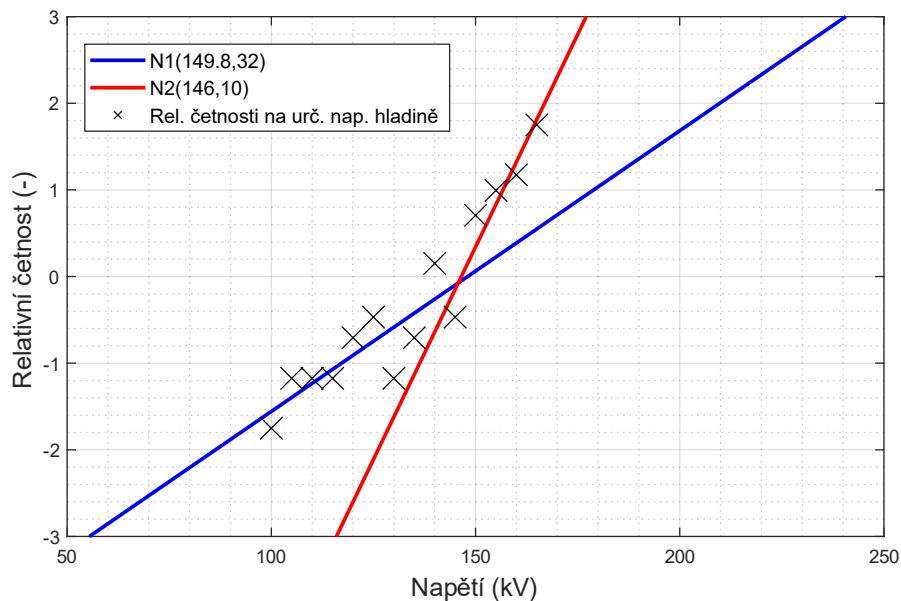
4.2.2 Problematika smíšených rozdělení

To, zdali empirická distribuční funkce odpovídá danému teoretickému rozdělení, jsem u každé zkoušky ověřil Kolmogorov-Smirnov testem shody distribuční funkce. Některé zkoušky více hladinami tímto testem neprošly ani na hladině $\alpha = 0,05$, což poukazuje na to, že data neodpovídají jednomu teoretickému rozdělení, ale rozdělení smíšenému. Právě pro

tyto zkoušky jsem vytvořil skript (příloha H), který hledá bod rozdělující soubor naměřených dat na dva a provádí postupnou lineární regresi s cílem najít dvě regresní přímky odpovídající smíšenému normálnímu rozdělení s rozdílnými středními hodnotami a rozptyly. Na Obr. 4.7 a Obr. 4.8 lze vidět smíšené rozdělení u zkoušek atmosférickým impulzem se vzdálenostmi elektrod 4 cm a 6 cm při tlaku 3 bary.



Obr. 4.7 Smíšené rozdělení u zkoušky 4 cm a 3 bary

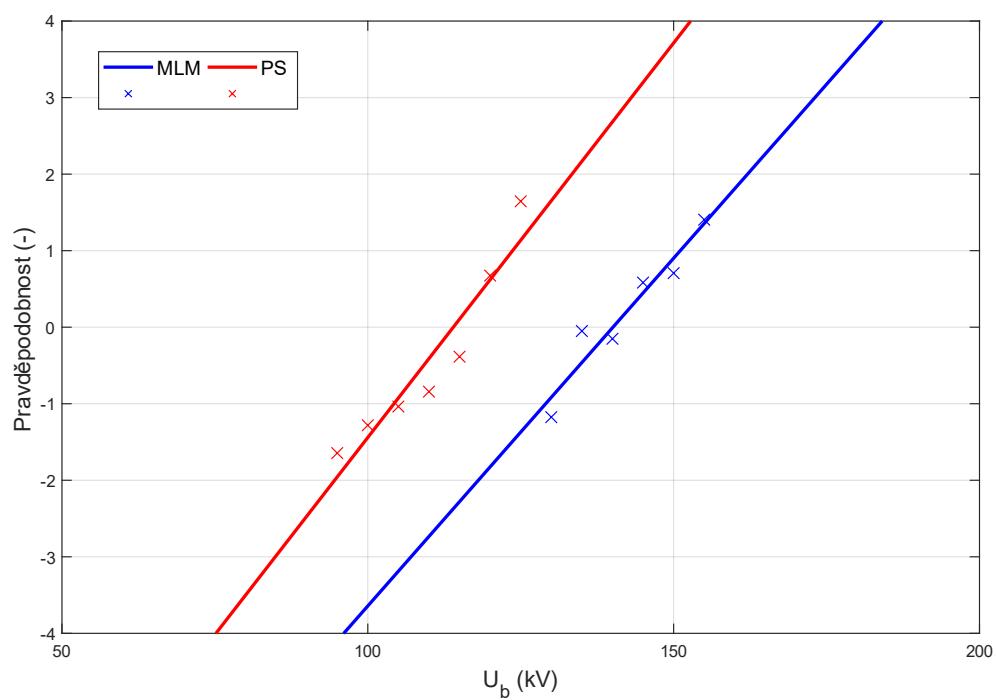


Obr. 4.8 Smíšené rozdělení u zkoušky 6 cm a 3 bary

Zkoušky vykazující charakter smíšeného rozdělení jsem zopakoval, abych dokázal, že zvolená metodika zkoušky byla zvolena správně. Nejdříve jsem provedl kontrolu povrchu elektrod a jejich následnou výměnu, zkontroloval jsem uzemnění nádoby a z nádoby jsem odstranil zbylé volné částice. Zopakovaný test na vzdálenosti elektrod 4 cm a při tlaku 3 bar již nevykazoval charakter dvojitého rozdělení a prošel testem shody distribuční funkce na přísné hladině významnosti $\alpha = 0,2$. Podobný výsledek měl zopakovaný test na vzdálenosti 6 cm a tlaku 3 bary, jelikož testem shody distribuční funkce prošel na hladině významnosti $\alpha = 0,1$. Hlavní aspekt ovlivňující výsledky těchto testů přisuzuji výměně ostré elektrody $R = 0,5$ mm. Povrch elektrody totiž značně ovlivňuje rozložení elektrického pole u silně nehomogenního elektrodového uspořádání. Mikroskopické nerovnosti povrchu elektrody může způsobit vznik stabilních částečných výbojů v místě, kde to neodpovídá teoretickému rozložení intenzity pole. U zkoušek atmosférickým impulzem tato skutečnost značně omezuje reprodukovatelnost samotných zkoušek, jelikož v okolí ostré elektrody dochází k částečným výbojům. Další aspekt, který má značný vliv na samotný výsledek je doba mezi impulzy. Doba mezi impulzy může způsobit závislost zkoušek atmosférickým impulzem na plynné izolaci v uzavřené nádobě. Pro všechny zkoušky byl ovšem proveden test nezávislosti a všechny provedené zkoušky se dají považovat za nezávislé.

4.2.3 Zkouška postupným namáháním

Zkouška atmosférickým impulzem metodou postupným namáháním se statisticky vyhodnocuje stejným způsobem, jako stejnosměrné zkoušky postupným namáháním. Postup vyhodnocení zde není uveden, jelikož jsem již stejný postup aplikoval při vyhodnocení zkoušek stejnosměrným napětím metodou postupným namáháním, který je uveden v kapitole 4.1. Tato zkouška byla provedena pro porovnání metody postupným namáháním s metodou více hladinami. Výstupem zkoušky více hladinami konstantního napětí je přímo funkce chování izolace, přičemž u zkoušky postupným namáháním je výstupem zkoušky kumulativní distribuční funkce. Rozdíl mezi funkcí chování izolace a kumulativní distribuční funkcí je uveden v kapitole 2.4.3. Funkce chování izolace generuje pro stejnou hodnotu napětí nižší pravděpodobnost přeskoků než distribuční funkce pro metodu postupným namáháním, což je zapříčiněno tím, že se jedná o relativní pravděpodobnost přeskoků na určité napětíové hladině, zatímco u metody postupným namáháním se jedná o pravděpodobnosti kumulativní. Skutečnost, že metoda více hladinami dosahuje vyšších hodnot přeskokového napětí pro stejnou pravděpodobnost přeskoků, lze vidět na Obr. 4.9.



Obr. 4.9 Porovnání metody více hladinami (MLM) a metody postupným namáháním (PS)

Zhodnocení a závěr

V kapitole 1 jsem popsal normalizované zkoušky vysokým napětím dle normy ČSN EN 60060-1 převážně s ohledem na zkušební postupy vysokonapěťových zkoušek, jelikož jsem právě tyto postupy uplatnil v experimentální části práce. Také jsem zde stručně popsal postup stanovení koordinace izolace v rámci normy ČSN EN 60071-2.

Kapitola 2 se zabývá statistickým vyhodnocením vysokonapěťových zkoušek. V úvodní části kapitoly jsem popsal, kdy je možné využít statistického přístupu ke zkouškám a uvedl jsem zde pravděpodobnostní rozdělení, která se v technice vysokého napětí nejčastěji používají. Dále jsem provedl rozdělení zkoušek dle normy ČSN EN 60060-1 na tři třídy, které jsem v rámci statistického přístupu popsal a následně jsem tyto postupy využil v experimentální části práce. V závěru této kapitoly jsem popsal, co všechno obnáší statistické vyhodnocení zkoušek, jak se ověřuje nezávislost zkoušek, jak se provádí aproximace empirické distribuční funkce a jakým způsobem se zjistí, zdali teoretická distribuční funkce odpovídá empirické distribuční funkci a také jaké kvantily zkoušek mají význam v rámci stanovení koordinace izolace.

V kapitole 3 jsem uvedl postupy při realizaci vysokonapěťových zkoušek pro stejnosměrné a impulzní namáhání. Popsal jsem obě měřicí stanoviště, použitý izolační plyn a elektrodové uspořádání.

U zkoušek atmosférickým impulzem metodou více hladinami jsem zaznamenal, že výsledky některých zkoušek vykazovaly charakter dvou pravděpodobnostních rozdělení. V kapitole 4.2.2 jsem provedl statistické vyhodnocení zkoušek, které tento charakter vykazovaly. Zjistil jsem, že důvod této anomálie pravděpodobně spočíval ve výskytu lokálních defektů povrchu ostré elektrody. Usuzuji, že pro věrohodnou reprodukovatelnost zkoušek atmosférickým impulzem v silně nehomogenním uspořádání je nutné věnovat velkou pozornost povrchu elektrod. Povrch elektrod v případě rozsáhlých zkoušek je nutné pravidelně kontrolovat a zamezit tak ovlivnění výsledků zkoušky. Ze statistického hlediska většina zkoušek prošla testem shody distribuční funkce na hladině významnosti 0,2, z čehož vyplývá, že zvolená metodika zkoušek se dá považovat za správnou. Přesto jsem na základě analýzy výsledků pro některé zkoušky navrhl doporučení pro úpravu zkušebního postupu. Například zkoušku na vzdálenosti 6 cm při tlaku 3 bary jsem celkem provedl třikrát, přičemž první zkouška vykazovala charakter dvojitého rozdělení a druhá zkouška a třetí zkouška se od sebe lišily

přibližně o 7 %. Tato odchylka může být způsobena příliš velkým napěťovým krokem. Pro přesnější určení funkce chování izolace a zajištění reprodukovatelnosti zkoušek bych doporučil zmenšit napěťový krok na maximálně 2 % napěťové hladiny, u které dojde k prvnímu průraznému výboji. Toto opatření zapříčiní rozdílné napěťové kroky v rámci měněných parametrů zkoušky (vzdálenost elektrod, tlak izolačního média) a zároveň rozšíří experimentálně získaný soubor dat. Experimentálně by se vhodnost tohoto opatření dala ověřit paralelním měřením dvou identických tlakových nádob se stejným elektrodovým uspořádáním a stejným izolačním médiem. Tento experiment by spočíval v tom, že by se izolační plyn v obou nádobách natlakoval na stejný tlak a provedla by se zkouška více hladinami s pevným napěťovým krokem pro různé vzdálenosti elektrod. Následně by se napěťový krok snížil dle získaných hodnot z prvního měření a měření by se provedlo znovu. V rámci impulzních zkoušek jsem také provedl porovnání metody více hladinami a postupným namáháním pro uspořádání ostré a kulové elektrody ve vzdálenosti 6 cm a při tlaku 3 bary. Z porovnání těchto metod vychází, že metoda postupným namáháním klade na izolační vlastnosti větší nároky, protože polovinové průrazné napětí vychází o 20 kV nižší než u metody více hladinami. Pokud bychom tedy při stanovení koordinace izolace vycházely z hodnot získaných metodou postupným namáháním, tak izolační systém bude vykazovat nižší hodnoty elektrické pevnosti, a proto by bylo nutné tento systém předimenzovat.

Zkoušky stejnosměrným napětím metodou postupným namáháním jasně vykazovaly charakter normálního rozdělení pro hladinu významnosti 0,05. Pouze zkouška na tlaku 3 bary neprošla testem nezávislosti (viz kapitola 4.1.1). Všechny stejnosměrné zkoušky byly provedeny pro zápornou polaritu přivedenou na ostrou elektrodu. Důsledkem záporné polarity vzniká záporná koróna, která za sebou zanechává záporný prostorový náboj, který může zapříčinit zvýšení přeskokového napětí a ovlivnit následující zkoušku. Je nutné věnovat zvýšenou pozornost době mezi přiložením napětí. Tento parametr není normou nijak definován. V rámci všech stejnosměrných zkoušek byl čas mezi přiložením napětí stanoven na 60 s. Čas mezi přiložením napětí se u všech zkoušek jevil jako dostatečný, ale bohužel poslední zkouška provedená na tlaku 3 bary se ukázala jako závislá. Jedním z hlavních aspektů, který ovlivňuje mechanismus výboje je právě tlak izolačního média. Závislost zkoušky při tlaku 3 bar přisuzuji příliš malé době mezi přiložením napětí, což zamezilo úplné rekombinaci prostorových nábojů a došlo k ovlivnění následující zkoušky v podobě zvýšení přeskokového napětí.

Pro stejnosměrné zkoušky, u kterých se mění parametry, které významně ovlivňují výsledné přeskové napětí (vzdálenost mezi elektrodami a tlak izolačního média) bych doporučil zvyšovat dobu mezi přiložením napětí v závislosti na zvyšující se vzdálenosti elektrod, či tlaku. Tímto opatřením bych zvýšil pravděpodobnost úplné rekombinace prostorových nábojů, čímž by se s větší pravděpodobností dosáhlo nezávislosti naměřených dat.

Literatura

- [1] ČSN EN 60060-1. Technika zkoušek vysokým napětím – Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [2] HAUSCHILD, Wolfgang, LEMKE, Eberhard. High- Voltage Test and Measuring Techniques. USA: Springer New York Dordrecht London, New York City, 2014. ISBN 978-3-642-45351-9
- [3] ČSN EN IEC 60071-1 ed.3. Koordinace izolace – Část 1: Definice, principy a pravidla Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.
- [4] HAUSCHILD, Wolfgang, MOSCH, Wolfgang. Statistical Techniques for High-Voltage Engineering. UK: J.W. Arrowsmith Ltd, Bristol, 1992. ISBN 0 86341 205 X
- [5] ŘEZANKOVÁ, Hana, Luboš MAREK a Michal VRABEC. Interaktivní učebnice statistiky [online]. 2001. Dostupné z: <http://iastat.vse.cz/>
- [6] FREISL, Michal. Pravděpodobnost a statistika hypertextově [online]. 2014. Dostupné z: <https://home.zcu.cz/~friesl/hpsb/>
- [7] BUDÍKOVÁ, Marie. Statistika a pravděpodobnost [online]. 2016. Dostupné z: <https://is.muni.cz/do/rect/el/estud/prif/ps15/statistika/web/index2.html>
- [8] KUFFEL, E., ZAENGL, W. S. a KUFFEL, J. High voltage engineering: fundamentals. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2000. xiii, 539 s. ISBN 978-0-7506-3634-6.
- [9] ČSN EN IEC 60071-2 ed.3. Koordinace izolace – Část 2: Směrnice pro použití ed.2 Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [10] CIGRE, Working Group. Dry air, N₂, CO₂ and N₂/SF₆ mixtures for gas-insulated systems. D1.51, ISBN 978-2-85873-432-0, 2018.
- [11] HAEFELY. [Online] Haefely-hipotronics. Dostupné z: <http://www.haefely-hipotronics.com/>
- [12] MATHWORKS, Inc. Documentation Matlab [online]. 1994 Dostupné z: <http://www.mathworks.com/help/matlab/index.html>
- [13] MATHWORKS, Inc. Statistics and Machine Learning Toolbox [online]. 1994 Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/stats/>

- [14] KÜCHLER, Andreas. High Voltage Engineering Fundamentals-Technology-Applications.
- [15] HALLER, Rainer & Martínek, Petr & Hammar, Roman & Müllerová, Eva. (2018). Dielectric behaviour of gaseous insulation with synthetic air. 1-4. 10.1109/EPE.2018.8396010.
- [16] HALLER, Rainer & Martínek, Petr & Müllerová, Eva. (2020). Aspects of statistical treatment of electrical breakdown behaviour in gas-insulated apparatus

Přílohy

Příloha A – Skript pro vyhodnocení zkoušek postupným namáháním

```
% SS-zkouska, 4 cm, 2 bar, R0.5mm/R75mm, 80%N2 + 20%O2
clc
clear all
close all

%Preskokova napeti + vzestupne serazeni
Ubx = [101.3    99.82    101.9    101.9    102.7    102.5    102 100.6    100.8
101.3    101.7    99.14    99.82    102.1    102.8    100.3    102 102.9    103
103.3    101.9    100.5    99.99    102.4    103.7    100.8    104.4    103 101.5
103.5];
Ub = sort(Ubx);

% Kolmogorov-Smirnov test
[h,p,ksstat,cv] = kstest((Ub-101.6554)/1.3514,'Alpha',0.2);
disp(['Kolmogorov-Smirnov test: h = ', num2str(h), ', p = ', num2str(p),
', ksstat = ', num2str(ksstat), ', cv = ', num2str(cv)]);

% Stredni hodnota, rozptyl
mean_Ub = mean(Ub);
std_Ub = std(Ub);

% Vypsani vysledku
disp(['Stredni hodnota Ub = ', num2str(mean_Ub)]);
disp(['Smerodatna odchylka Ub = ', num2str(std_Ub)]);

% Normalni rozdeleni: parametry + konfidencni intervaly pro sigma a mu
pd = fitdist(Ub,'Normal')

% Vypocet teoreticke a empiricke CDF
f_theory=cdf(pd,Ub);
[f_empirical,x_empirical]=ecdf(Ub);

% Vypocet inverzni empiricke CDF
f_inv=norminv(f_empirical);
f_inv = f_inv(isfinite(f_inv));
x_inv=x_empirical(2:length(x_empirical)-1);

% Korelace
sy = std(f_inv)
sx = std(x_inv)
sxy = cov(x_inv,f_inv);
sxy = sxy(1,2)
r = sxy/(sx*sy) %Korelacni koeficient
byx = sxy/sx^2
ayx = mean(f_inv)-byx*mean(x_inv)

% Linearni regrese
x = linspace(min(Ub), max(Ub));
y = byx*x+ayx;

%Grafy CDF a linearni regrese
figure;
plot(x, y, 'k-', 'LineWidth', 1);
hold on
scatter(x_inv,f_inv,100,'x','r')
grid on;
```

```

xlabel('U_{b} (kV) ');
ylabel('Transformovaná kumulativní pravděpodobnost (-)');
title('Lineární regrese');
xlim([min(Ub),max(Ub)])
U50=-ayx/byx
U16=(-1-ayx)/byx
U10=(-1.3-ayx)/byx
line([min(Ub),U50],[0,0], 'LineWidth',1,'Color','k','LineStyle','--')
line([min(Ub),U16],[-1,-1], 'LineWidth',1,'Color','k','LineStyle','--')
line([min(Ub),U10],[-1.3,-1.3], 'LineWidth',1,'Color','k','LineStyle','--')
line([U50,U50],[-2,0], 'LineWidth',1,'Color','k','LineStyle','--')
line([U16,U16],[-2,-1], 'LineWidth',1,'Color','k','LineStyle','--')
line([U10,U10],[-2,-1.3], 'LineWidth',1,'Color','k','LineStyle','--')
text(U50+1,0,'U_{50}','FontSize',14)
text(U16+1,-1,'U_{16}','FontSize',14)
text(U10+1,-1.3,'U_{10}','FontSize',14)

% Grafy
figure;
plot(Ub, f_theory, 'k', 'LineWidth', 1);
hold on
ecdf(Ub, 'Alpha',0.05,'Bounds','on')
grid on
hold on;
scatter(x_empirical, f_empirical, 'b', 'LineWidth', 1,'Marker', "x");
xlabel('U_{b} (kV) ');
ylabel('Kumulativní pravděpodobnost');
title('Kumulativní distribuční funkce');
xlim([min(Ub),max(Ub)])
legend('Teoretická CDF (Normal)', 'Empirická CDF');

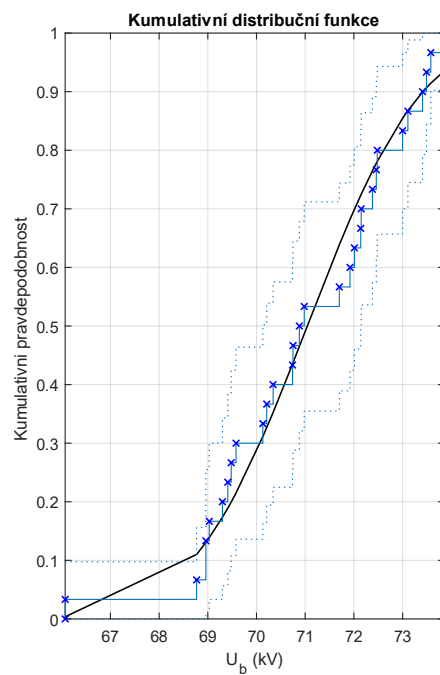
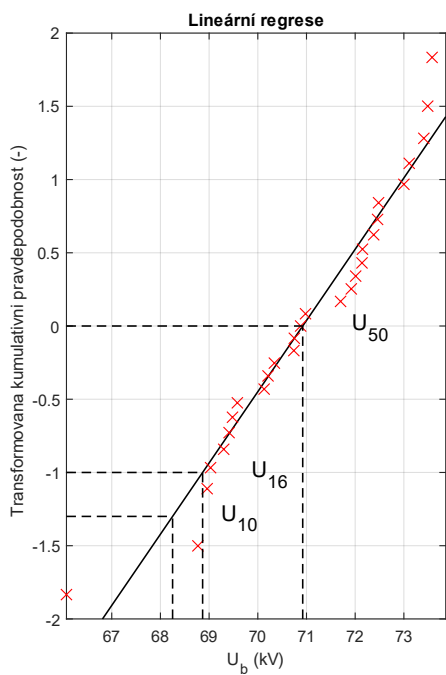
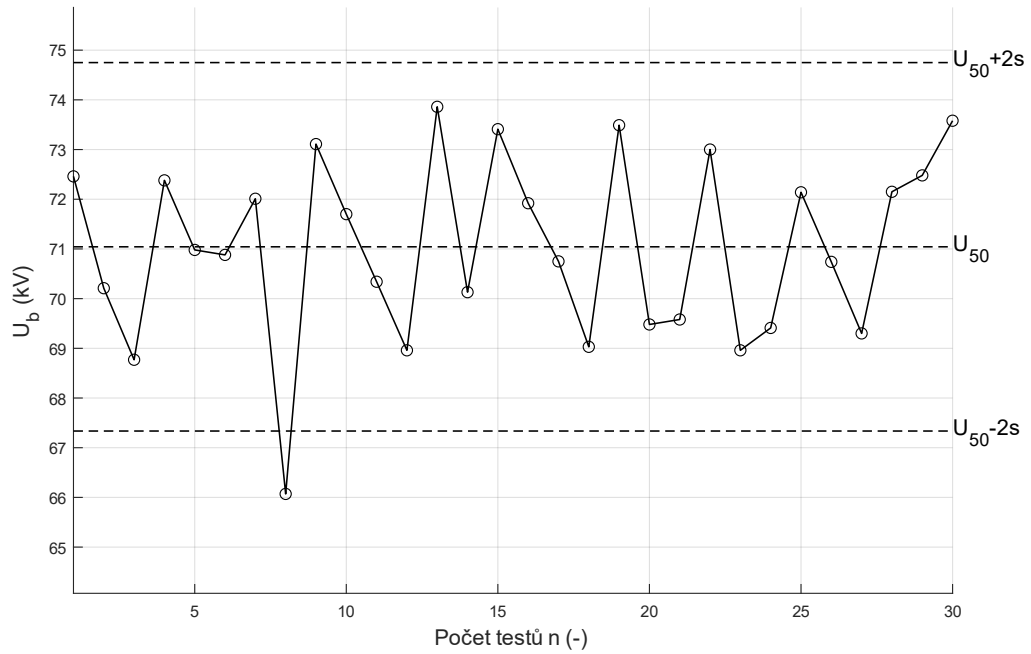
% Graficky test nezávislosti
s=std(Ubx);
Ub50=mean(Ubx);
n=1:1:length(Ubx);
figure;
scatter(n,Ubx,50,'o',"black")
hold on
plot(n,Ubx,'k-', 'LineWidth', 1)
line([min(n),max(n)],[Ub50,Ub50],
'LineWidth',1,'Color','k','LineStyle','--')
line([min(n),max(n)],[Ub50+2*s,Ub50+2*s],
'LineWidth',1,'Color','k','LineStyle','--')
line([min(n),max(n)],[Ub50-2*s,Ub50-2*s],
'LineWidth',1,'Color','k','LineStyle','--')
text(30,Ub50,'U_{50}','FontSize',14)
text(30,Ub50-2*s,'U_{50}-2s','FontSize',14)
text(30,Ub50+2*s,'U_{50}+2s','FontSize',14)
xlim([1 length(n)])
ylim([min(Ub)-2, max(Ub)+2])
grid on
xlabel('Počet testů n (-)')
ylabel('U_{b} (kV)')

```

Příloha B – Naměřené hodnoty stejnosměrných zkoušek postupným namáháním

Stejnosměrné zkoušky postupným namáháním											
Otevřena nádoba		1 bar		1,5 bar		2 bar		2,5 bar		3 bar	
Č.	U (kV)	Č.	U (kV)	Č.	U (kV)	Č.	U (kV)	Č.	U (kV)	Č.	U (kV)
1	72,46	1	71,54	1	90,94	1	101,3	1	113,4	1	127,65
2	70,21	2	75,2	2	88,57	2	99,82	2	115,7	2	130,6
3	68,77	3	74,82	3	92,08	3	101,9	3	116,1	3	125,7
4	72,38	4	72,73	4	85,8	4	101,9	4	119,9	4	125,6
5	70,98	5	77,36	5	86,66	5	102,7	5	118,7	5	131,9
6	70,88	6	75,99	6	83,3	6	102,5	6	112,6	6	132,6
7	72,01	7	77,8	7	89,25	7	102	7	114,9	7	130,8
8	66,07	8	76,43	8	89,19	8	100,6	8	116,4	8	133,2
9	73,11	9	72,09	9	90,75	9	100,8	9	118,9	9	130
10	71,7	10	73,32	10	89,79	10	101,3	10	119,8	10	133,2
11	70,34	11	73,92	11	89,08	11	101,7	11	119,3	11	133,2
12	68,96	12	72,81	12	87,1	12	99,14	12	122,8	12	134
13	73,86	13	72,8	13	89,87	13	99,82	13	122,1	13	135,7
14	70,13	14	74,17	14	87,38	14	102,1	14	115,4	14	135,9
15	73,41	15	73,66	15	90,46	15	102,8	15	117,9	15	130,2
16	71,92	16	74,33	16	88,77	16	100,3	16	120	16	128,2
17	70,75	17	71,94	17	88,46	17	102	17	121,3	17	134,4
18	69,03	18	77,24	18	90,69	18	102,9	18	123,1	18	138
19	73,49	19	76,04	19	90,83	19	103	19	123,5	19	141
20	69,48	20	74,5	20	89,28	20	103,3	20	120,4	20	137,3
21	69,58	21	72,74	21	90,44	21	101,9	21	119,6	21	136,1
22	73	22	76,26	22	90,21	22	100,5	22	122,3	22	137,9
23	68,96	23	75,02	23	83,88	23	99,99	23	121,4	23	135,3
24	69,41	24	72,87	24	90,55	24	102,4	24	123,9	24	136,5
25	72,14	25	74,02	25	87,44	25	103,7	25	121,6	25	145,8
26	70,74	26	75,57	26	90,27	26	100,8	26	119,6	26	140,6
27	69,3	27	74,58	27	83,98	27	104,4	27	119,7	27	143,9
28	72,15	28	72,87	28	87,81	28	103	28	120,6	28	141,9
29	72,48	29	73,8	29	84,56	29	101,5	29	120	29	144,3
30	73,58	30	74,69	30	84,44	30	103,5	30	119,8	30	142,5

Příloha C – Statistické vyhodnocení stejnosměrných zkoušek (otevřená nádoba)



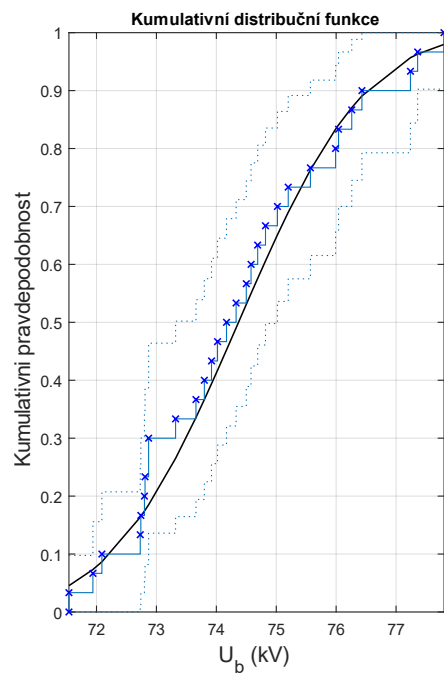
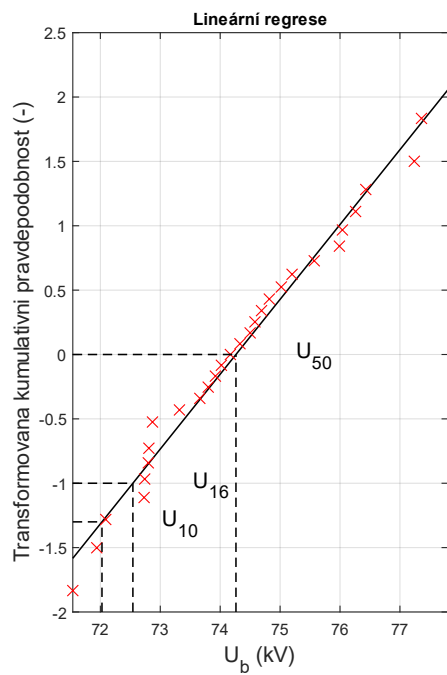
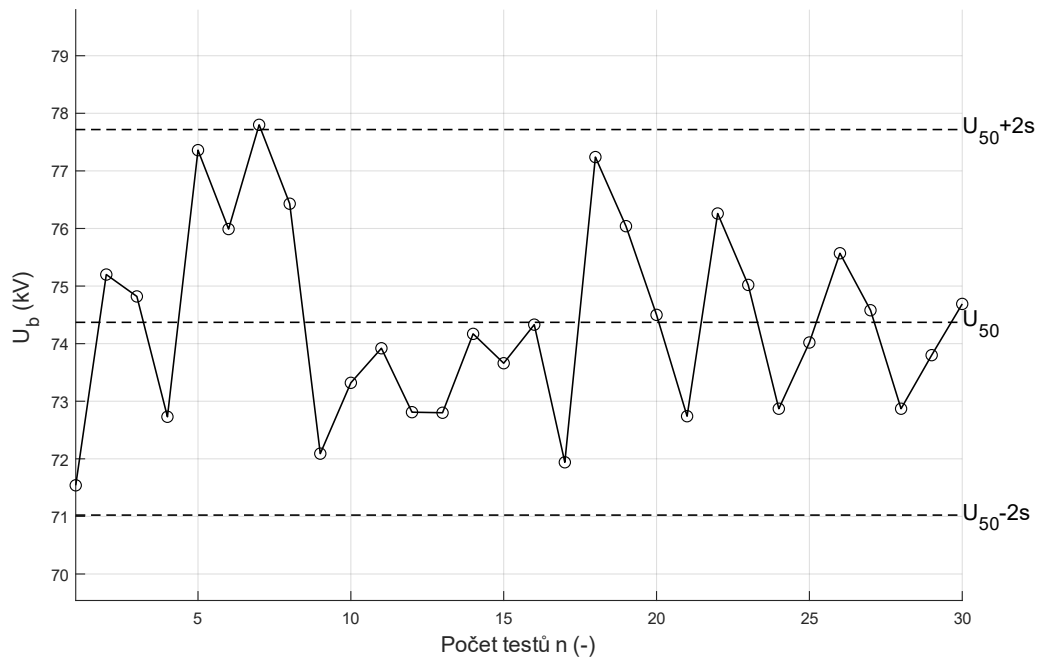
Normal distribution

$\mu = 135.132$ [133.09, 137.174]

$\sigma = 5.46838$ [4.35506, 7.35123]

Kolmogorov-Smirnov test: $h = 0$, $p = 0.99162$, $ksstat = 0.074676$, $cv = 0.24173$

Příloha D – Statistické vyhodnocení stejnosměrných zkoušek (1 bar)



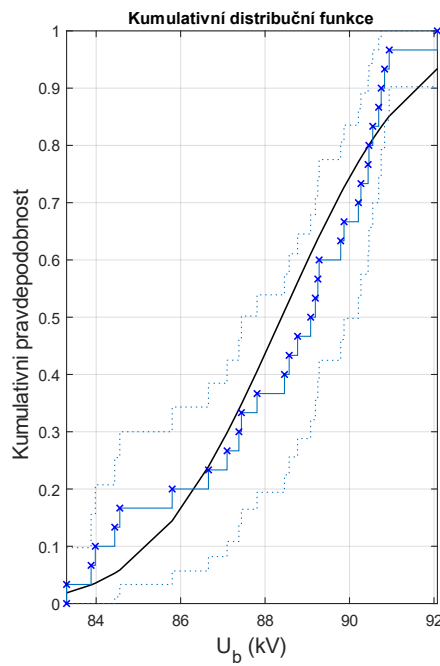
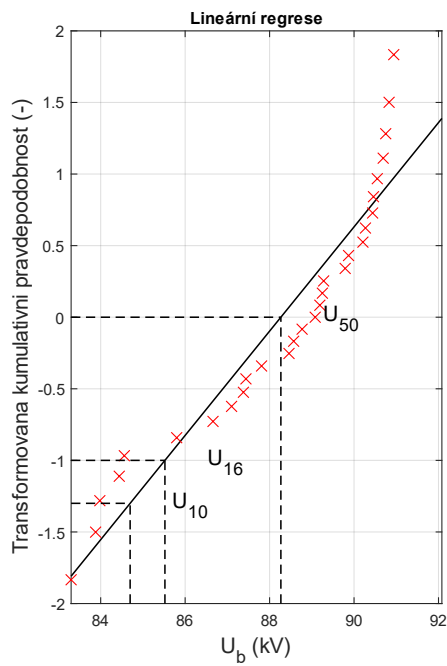
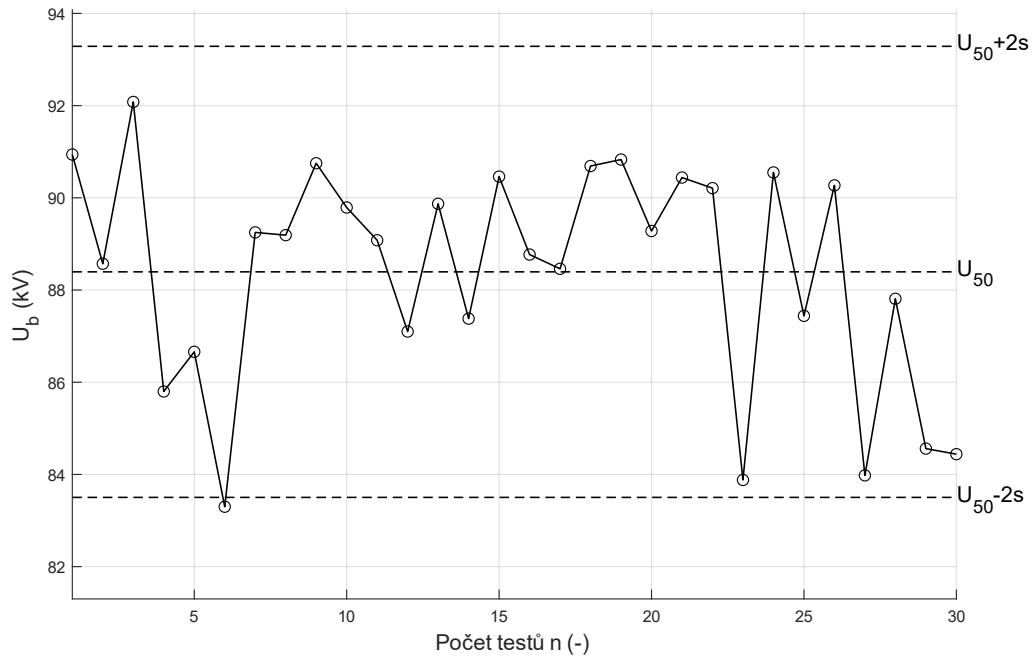
Normal distribution

$\mu = 74.3703$ [73.7453, 74.9953]

$\sigma = 1.67377$ [1.333, 2.25007]

Kolmogorov-Smirnov test: $h = 0$, $p = 0.78081$, $ksstat = 0.11498$, $cv = 0.24173$

Příloha E – Statistické vyhodnocení stejnosměrných zkoušek (1,5 bar)



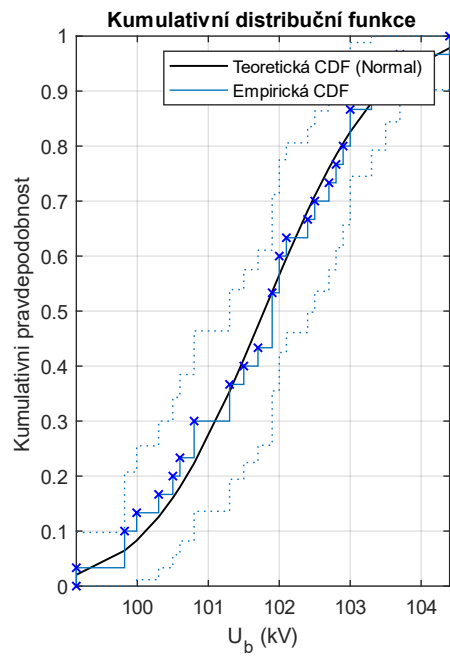
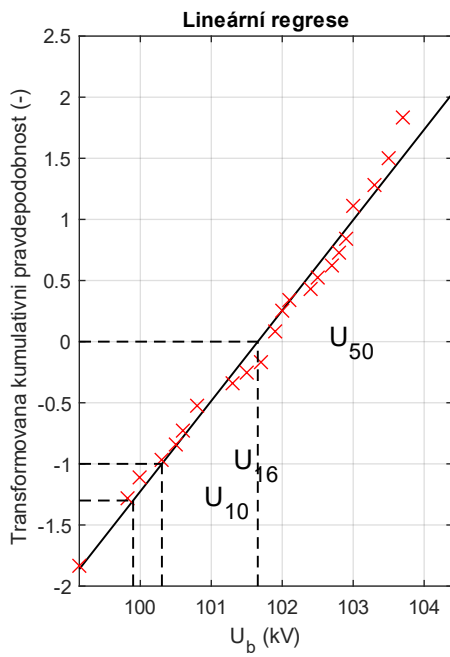
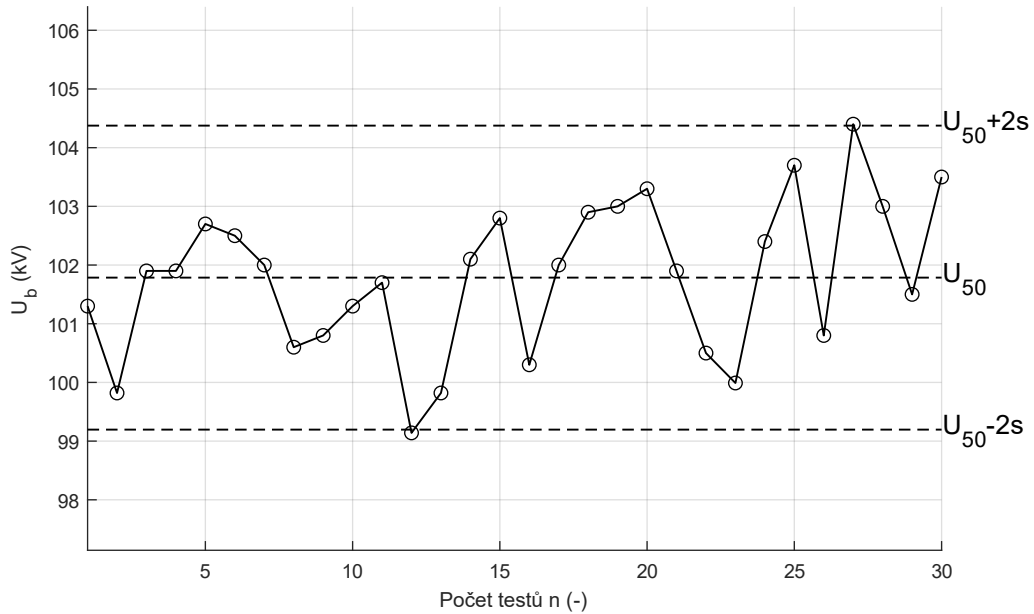
Normal distribution

$\mu = 88.3943$ [87.481, 89.3077]

$\sigma = 2.44599$ [1.948, 3.28818]

Kolmogorov-Smirnov test: $h = 0$, $p = 0.51605$, $ksstat = 0.14404$, $cv = 0.24173$

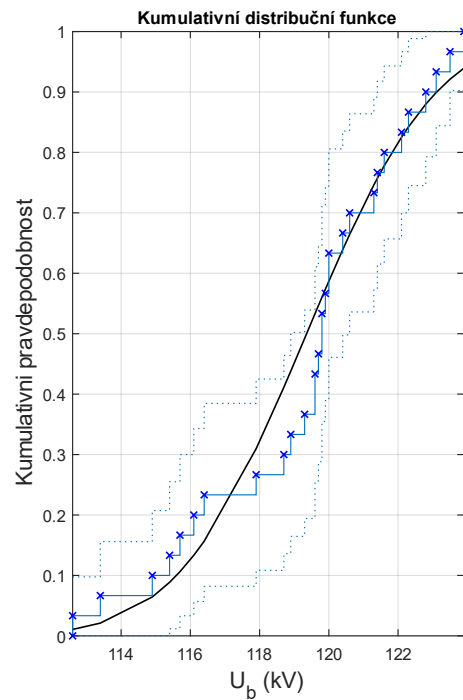
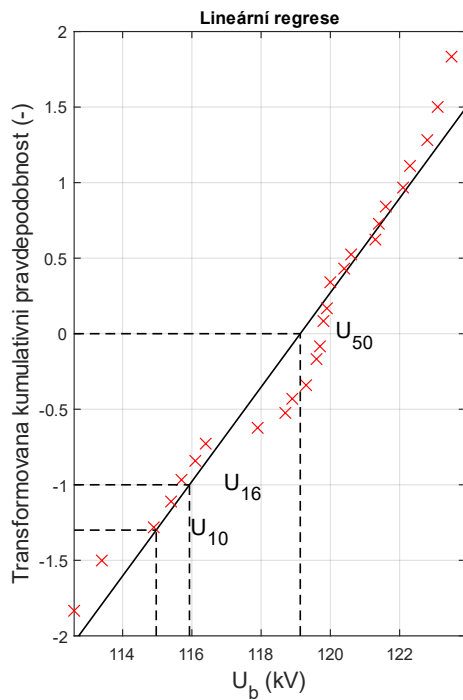
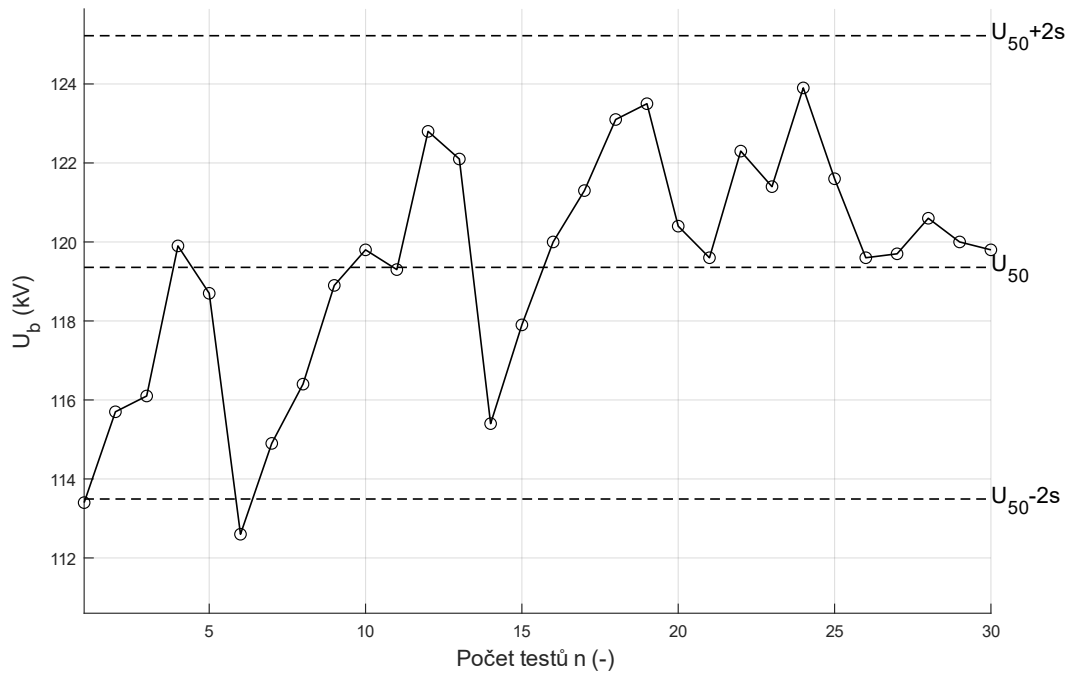
Příloha F – Statistické vyhodnocení stejnosměrných zkoušek (2 bar)



Normal distribution

mu = 101.786 [101.302, 102.269]
 sigma = 1.2949 [1.03127, 1.74076]

Příloha G – Statistické vyhodnocení stejnosměrných zkoušek (2,5 bar)



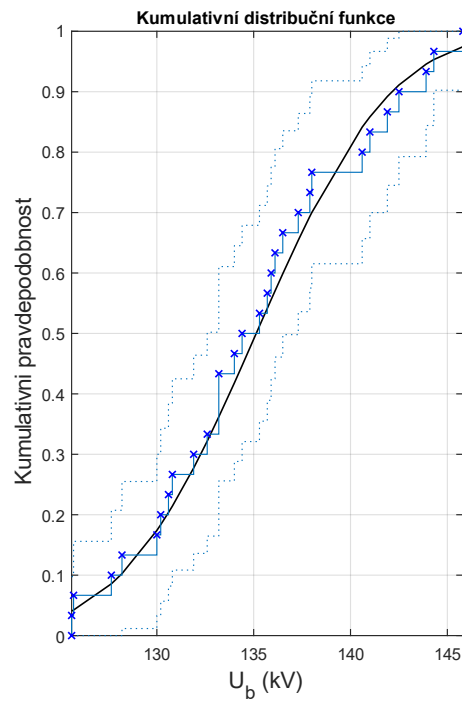
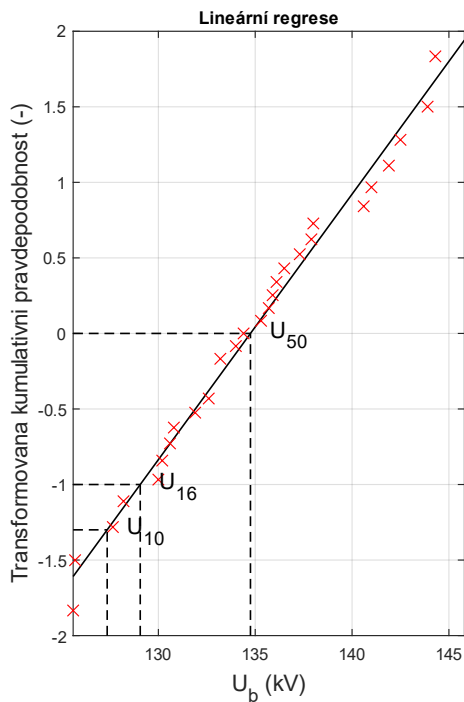
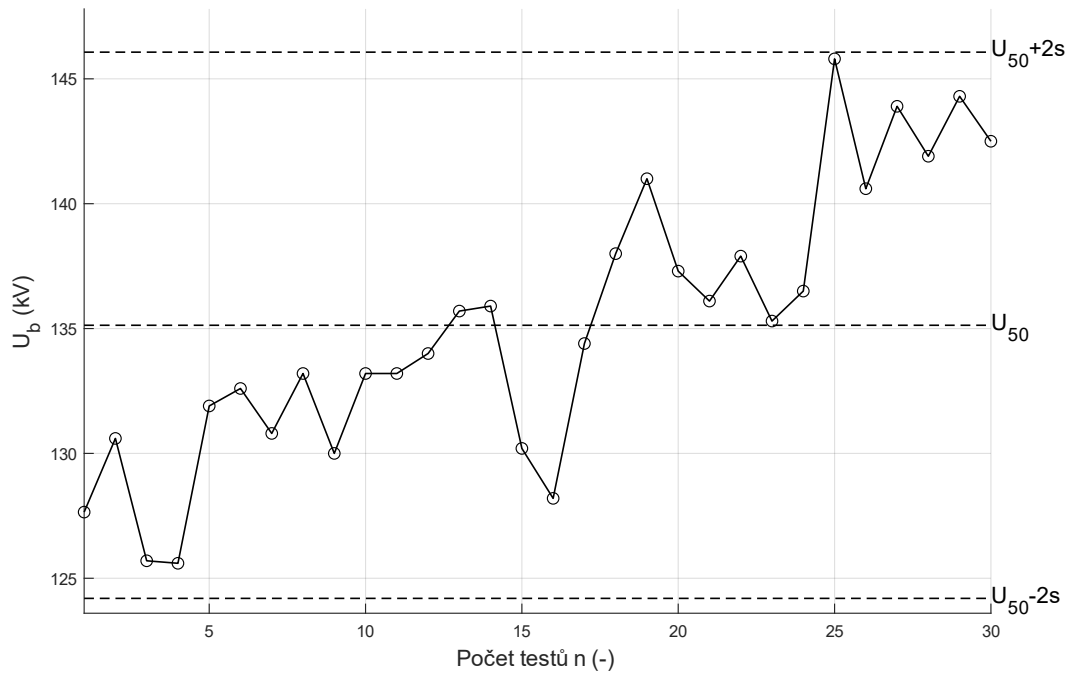
Normal distribution

$$\mu = 119.357 \quad [118.262, 120.452]$$

$$\sigma = 2.93242 \quad [2.3354, 3.9421]$$

Kolmogorov-Smirnov test: $h = 0$, $p = 0.33895$, $ksstat = 0.1664$, $cv = 0.24173$

Příloha H – Statistické vyhodnocení stejnosměrných zkoušek (3 bar)



Normal distribution

$\mu = 135.132$ [133.09, 137.174]

$\sigma = 5.46838$ [4.35506, 7.35123]

Kolmogorov-Smirnov test: $h = 0$, $p = 0.99162$, $ksstat = 0.074676$, $cv = 0.24173$

Příloha I – Skript pro vyhodnocení zkoušek více hladinami

```

clc;
clear all;
close all;
% LI-zkouska R0.5mm/R75mm, 80%N2 + 20%O2

%6cm 3bar c2
Ub = [90 95 100 105 110 115 120 125 130 135 140 145 150 155 160];
sumapreskoku = [2 2 6 4 6 10 12 13 7 12 13 17 15 23 23];
n=25;
relfreq = sumapreskoku/n;
normrelfreq=norminv(relfreq);
normrelfreq = normrelfreq(isfinite(normrelfreq));

% Linearni regrese
coeffs = polyfit(Ub, normrelfreq, 1);
x = linspace(min(Ub)-100, max(Ub)+100);
y = coeffs(1)*x+coeffs(2);

%Vypocet kvantilů
U50=-coeffs(2)/coeffs(1)
U16=(-1-coeffs(2))/coeffs(1)
U84=(1-coeffs(2))/coeffs(1)
U10=(-1.3-coeffs(2))/coeffs(1)

% %Kolmogorov - Smirnov test
theoretical = 0.5*erfc(-(coeffs(1)*Ub+coeffs(2))./sqrt(2));
empirical = 0.5*erfc(-normrelfreq./ sqrt(2));
dmax=max(abs(empirical-theoretical));
k02=1.07275/sqrt(n);
k01=1.22385/sqrt(n);
k005=1.3581/sqrt(n);
if dmax<k02
    disp(['Přijetí nulové hypotézy na hladině významnosti 0,2:',
num2str(dmax), '< ', num2str(k02)]);
    plot(x, y, 'k-', 'LineWidth', 2);
    hold on
    grid on
    grid minor
    ylim([-3 3])
    scatter(Ub, normrelfreq,300,'x','r');
    xlim([min(Ub)-80,max(Ub)+80]);
    xlabel('Ubd (kV)');
    ylabel('Transformovaná relativní četnost (-)');
elseif dmax<k01
    disp(['Přijetí nulové hypotézy na hladině významnosti 0,1:',
num2str(dmax), '< ', num2str(k01)]);
    plot(x, y, 'k-', 'LineWidth', 2);
    hold on
    grid on
    grid minor
    ylim([-3 3])
    scatter(Ub, normrelfreq,300,'x','r');
    xlim([min(Ub)-80,max(Ub)+80]);
    xlabel('Ubd (kV)');
    ylabel('Transformovaná relativní četnost (-)');
elseif dmax<k005
    disp(['Přijetí nulové hypotézy na hladině významnosti 0,05:',
num2str(dmax), '< ', num2str(k005)]);

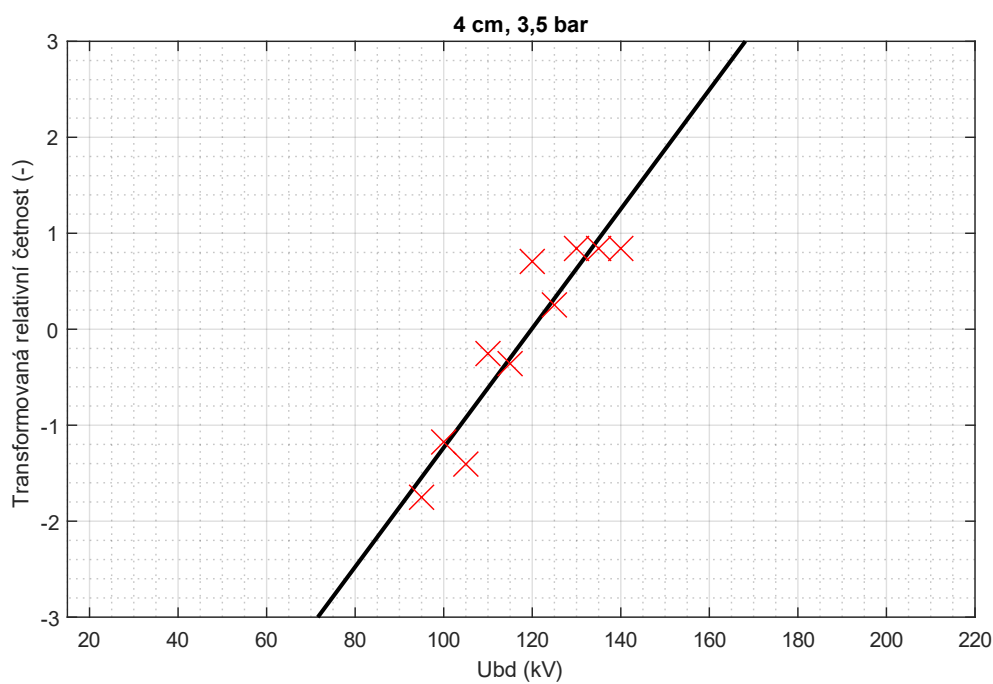
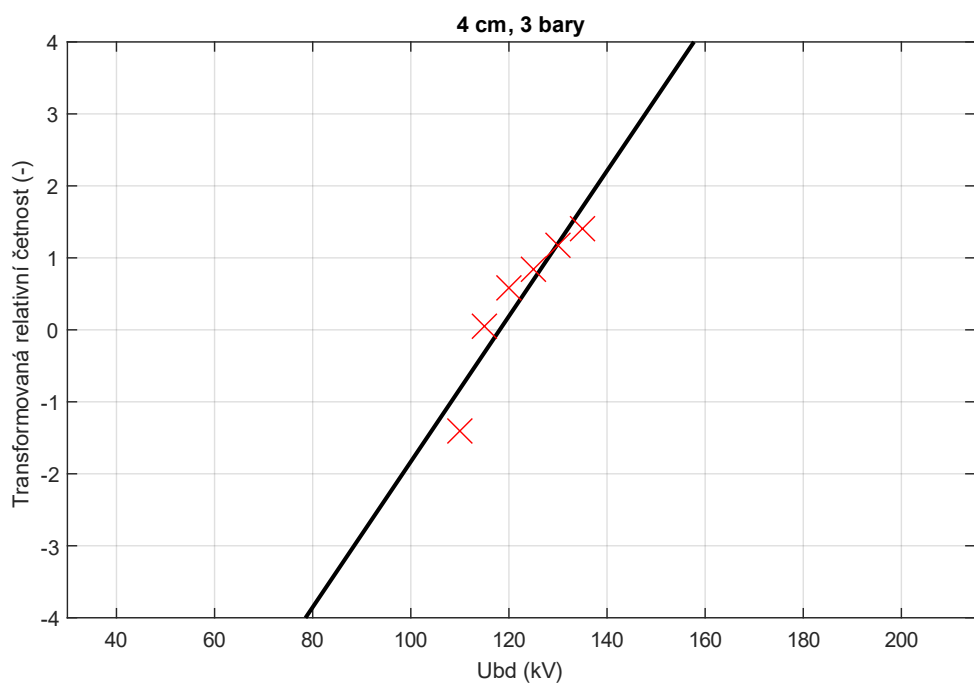
```

```

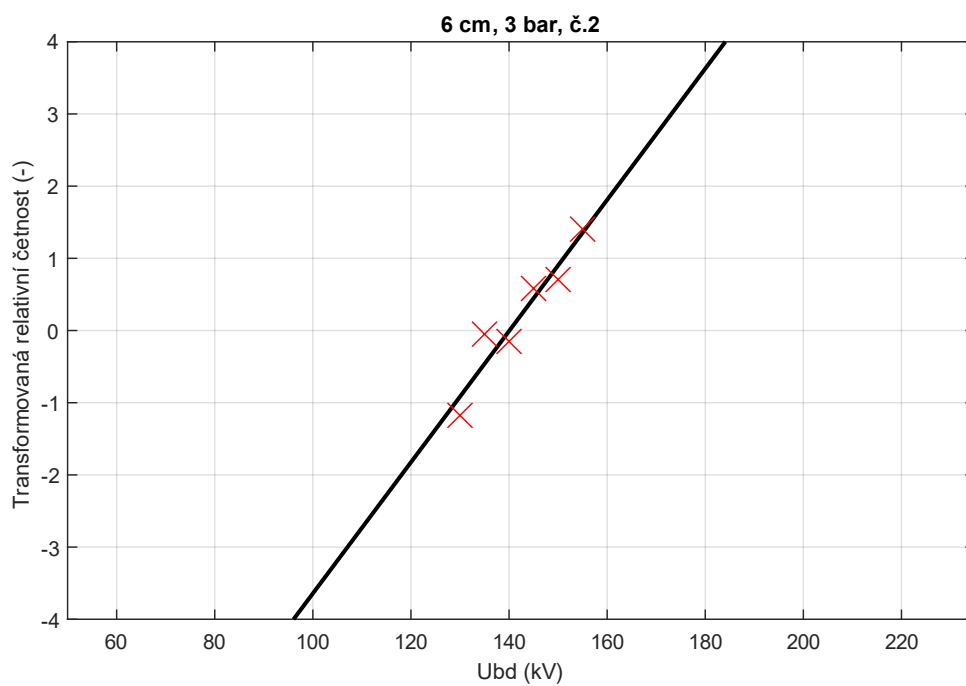
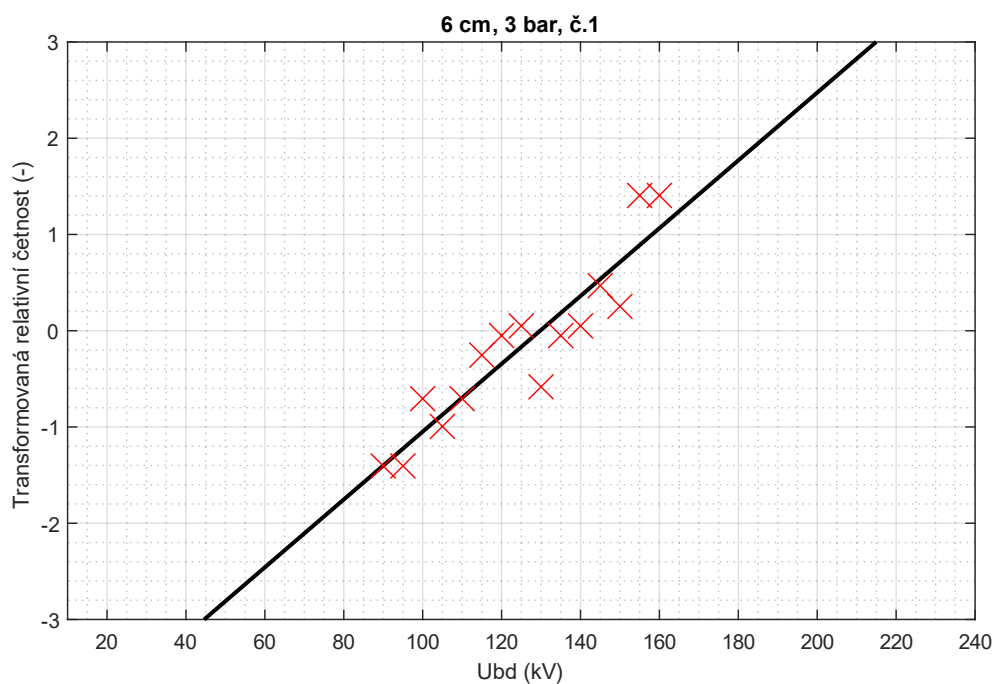
plot(x, y, 'k-', 'LineWidth', 2);
hold on
grid on
grid minor
ylim([-3 3])
scatter(Ub, normrelfreq,300,'x','r');
xlim([min(Ub)-80,max(Ub)+80]);
xlabel('Ubd (kV)');
ylabel('Transformovaná relativní četnost (-)');
else
disp(['Odmítnutí nulové hypotézy:', num2str(dmax), ' > ',
num2str(k005)]);
dmax_min=intmax;
i_min=0;
for i=0:length(Ub)-3
coeffs1 = polyfit(Ub(1:3+i), normrelfreq(1:3+i), 1);
coeffs2 = polyfit(Ub(4+i:length(Ub)),
normrelfreq(4+i:length(Ub)), 1);
theoretical1 = 0.5*erfc(-
(coeffs1(1)*Ub(1:3+i)+coeffs1(2))./sqrt(2));
theoretical2 = 0.5*erfc(-
(coeffs2(1)*Ub(4+i:length(Ub))+coeffs2(2))./sqrt(2));
dmax1=max(abs(empirical(1:3+i)-theoretical1));
dmax2=max(abs(empirical(4+i:length(Ub))-theoretical2));
disp([num2str(dmax1),';', num2str(dmax2),';',num2str(i)]);
if dmax1<k02 & dmax2<k02
disp(['Přijetí nulové hypotézy na hladině významnosti 0,2:',
num2str(dmax1), '< ', num2str(k02)]);
disp(['Přijetí nulové hypotézy na hladině významnosti 0,2:',
num2str(dmax2), '< ', num2str(k02)]);
figure;
x = linspace(min(Ub)-100, max(Ub)+100);
y1 = coeffs1(1)*x+coeffs1(2);
y2 = coeffs2(1)*x+coeffs2(2);
plot(x, y1, 'b-', 'LineWidth', 2);
hold on
plot(x,y2, 'r-', 'LineWidth', 2);
hold on
scatter(Ub, normrelfreq,300,'x','k');
hold on
grid on
grid minor
ylim([-3 3])
break
else
disp('/');
end
end
end
end

```

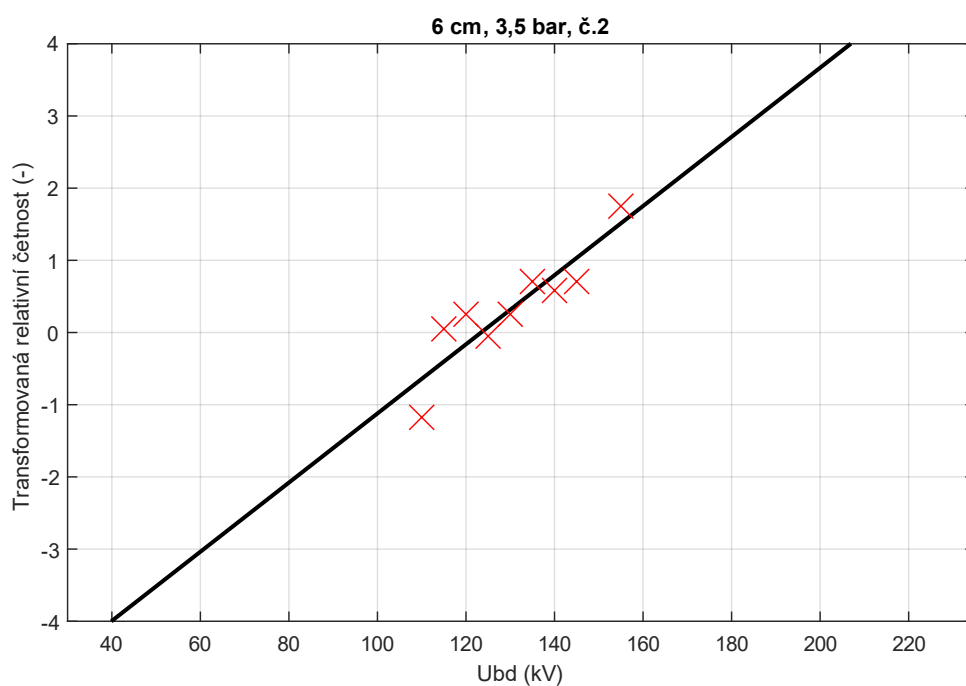
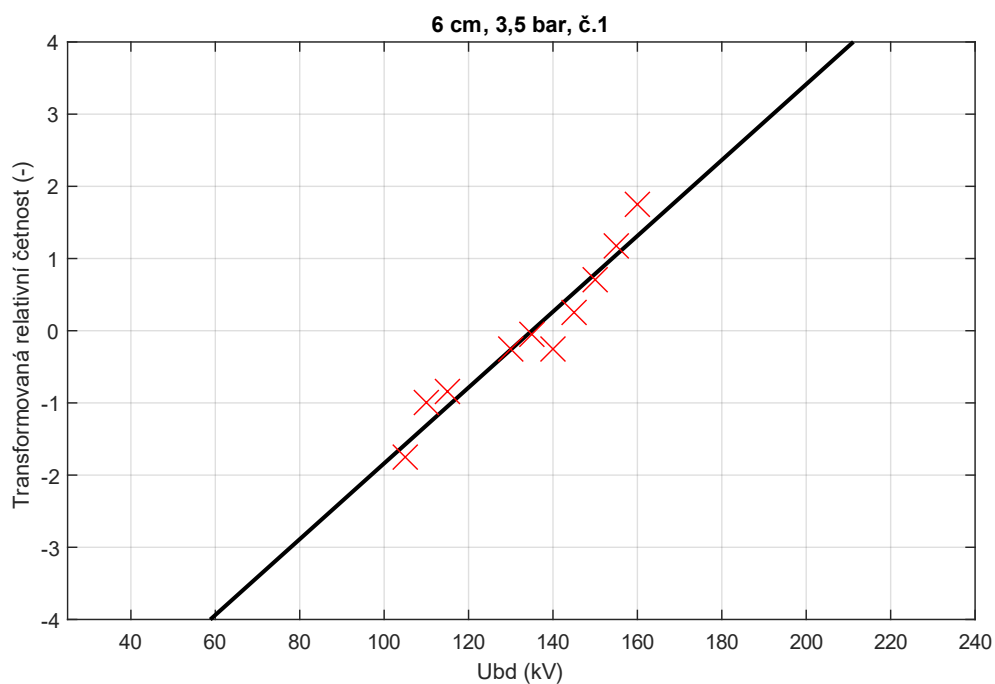
Příloha J – Statistické vyhodnocení impulzních zkoušek 1



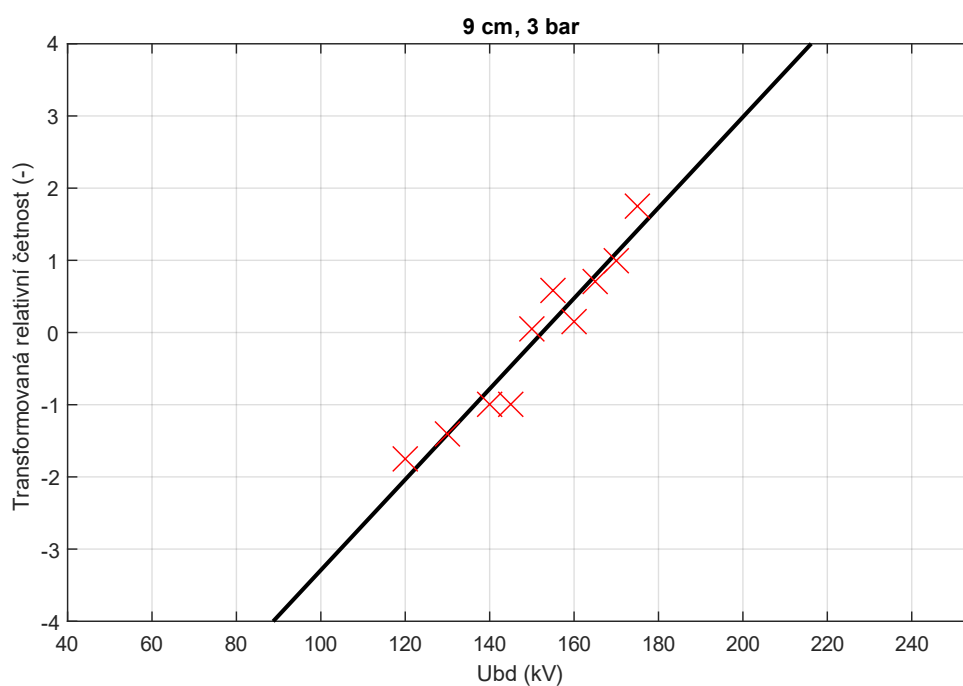
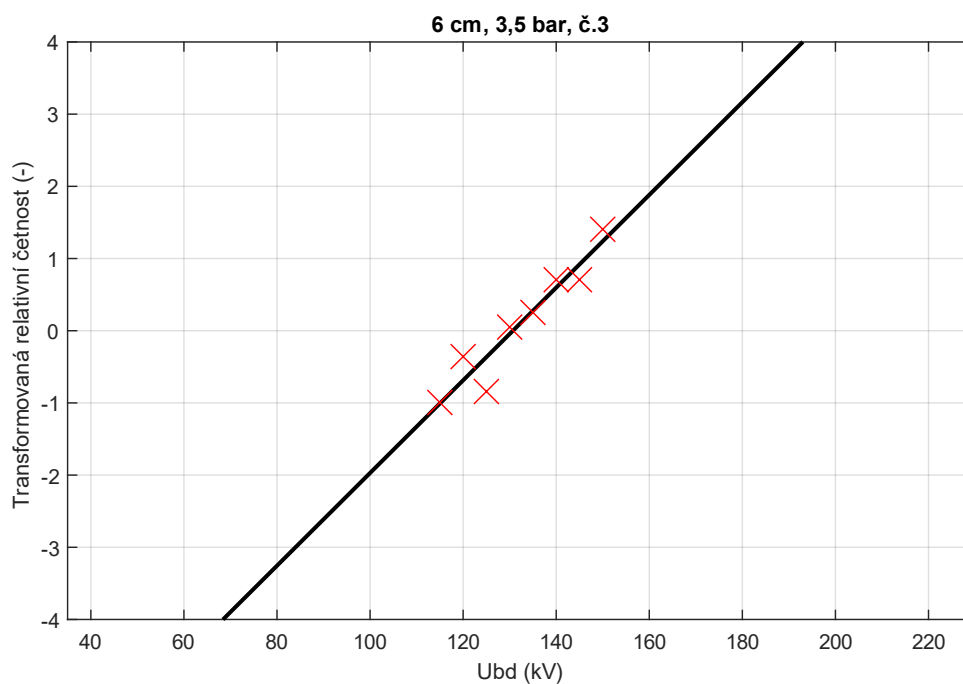
Příloha K – Statistické vyhodnocení impulzních zkoušek 2



Příloha L – Statistické vyhodnocení impulzních zkoušek 3



Příloha M – Statistické vyhodnocení impulzních zkoušek 4



Příloha N – Statistické vyhodnocení impulzních zkoušek 5