

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Katedra elektroenergetiky a ekologie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Elektrická pevnost plynného izolantu s izolační
bariérou v elektromagnetickém poli**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Lukáš VILHELM**
Osobní číslo: **E11N0154P**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Elektrická pevnost plynného izolantu s izolační barierou v elektromagnetickém poli**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Zpracujte obecnou problematiku chování dielektrik v elektrickém poli.
2. Charakterizujte chování plynných a pevných dielektrik v elektrickém poli.
3. Uskutečňte experimentální měření zkoumající vliv dielektrických barier na výslednou elektrickou pevnost elektroodového uspořádání.
4. Naměřené výsledky vyhodnoťte a popište zjištěné závislosti a tendence.

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


1. **Veverka, A.: Technika vysokých napětí, SNTL, 1982**
2. **IEE Xplore Digital Library - <http://ieeexplore.ieee.org>**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Martínek, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie
Konzultant diplomové práce: **Prof. Ing. Rainer Haller, Dr.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**


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




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

V Plzni dne 15. října 2012

Anotace

Cílem této diplomové práce je shrnutí chování dielektrik, která se vloží do elektromagnetického pole. V druhé části je popsána elektrická pevnost kapalných, pevných a plyných izolantů. Další dvě části se zabývají měřením, kde se měřila elektrická pevnost plynného izolantu v uzavřené nebo otevřené nádobě. Všechna měření probíhala nejdříve bez bariéry a poté s bariérou. V poslední části jsou zhodnoceny výsledky daných měření.

Klíčová slova

bariéra, dielektrikum, elektrická pevnost, elektrická vodivost, elektrický průraz, elektrický přeskok, izolant, polarizace, průrazné napětí, přeskokové napětí

Abstract

The aim of the diploma thesis is to summarize of the behavior of dielectrics, which are placed in an electromagnetic field. In the second part is described the electric strength of solid, liquid and gaseous insulators. The next two sections describe the measurements, we measured the electrical strength of the gaseous insulation in a closed or open container. First, all measurements were measured without barriers and then was used barrier. In the last part are evaluated results of all measurements.

Key words

barrier, dielectric, electrical strenght, electrical conductivity, electrical breakdown, electrical vault, insulator, polarization, breakdown voltage, flashover voltage

Prohlášení

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

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

Podpis

V Plzni dne 6.5.2013

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Martínkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Poté bych rád také poděkoval Doc. Ing. Evě Müllerové, Ph.D. za pomoc s praktickou částí a celé své rodině za dlouholetou trpělivost a finanční podporu.

Obsah

Seznam použitých zkratk	10
Úvod	12
1 Obecná problematika chování dielektrik	13
1.1 Rozdíl mezi dielektrikem a izolantem	13
1.2 Polarizace	14
1.2.1 Deformační polarizace	14
1.2.2 Relaxační polarizace	15
1.2.3 Migrační polarizace	15
1.3 Elektrická vodivost	16
1.3.1 Elektrická vodivost plynného izolantu	16
1.3.2 Elektrická vodivost kapalného izolantu	18
1.3.3 Elektrická vodivost pevného izolantu	19
1.4 Komplexní permitivita	20
1.5 Dielektrické ztráty	22
1.5.1 Ztrátový výkon	23
1.5.2 Dielektrické ztráty v plynném izolantu	23
1.5.3 Dielektrické ztráty v kapalném izolantu	23
1.5.4 Dielektrické ztráty v pevném izolantu	24
2 Elektrická pevnost	25
2.1 Elektrická pevnost plynného izolantu	27
2.1.1 Nesamostatný a samostatný výboj	27
2.1.2 Přeskokové napětí v homogenním poli	28
2.1.3 Přeskokové napětí v nehomogenním poli	30
2.1.4 Koróna u elektrod důležitých tvarů	31
2.2 Elektrická pevnost kapalného izolantu	32
2.3 Elektrická pevnost pevného izolantu	33
3 Zkoušky průrazným výbojem dle normy	34
3.1.1 Třída 1: Zkoušky více hladinami	34
3.1.2 Třída 2: Zkoušky metodou nahoru-dolů	35
3.1.3 Třída 3: Zkoušky postupným namáháním	36
4 Praktická část	36
4.1 Rázový generátor	37
4.2 Bariéra	37
4.3 Zhodnocení jednotlivých metod	38

Závěr	40
Použitá literatura	41
Seznam příloh	42
Příloha 1	1
Příloha 2	13
Příloha 3	15

Seznam použitých zkratek

φ	fázový úhel [°]
δ	ztrátový úhel [°]
ω	úhlová frekvence [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]
ρ	měrný elektrický odpor [$\Omega\cdot\text{m}$]
γ	měrná elektrická vodivost [$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$]
ϵ_0	permitivita vakua [$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$]
ϵ_r	relativní permitivita [-]
γ_p	povrchová vodivost [$\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$]
Δt	čas mezi měřeními [s]
ΔU	snižovací (zvyšovací) napětí použité při měření [kV]
\vec{D}	vektor elektrické indukce [$\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$]
\vec{E}	vektor elektrické intenzity [$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$]
a	vzdálenost vodičů [m]
C_0	kapacita vzorku bez izolace [F]
C_x	kapacita vzorku s izolací [F]
d	vzdálenost elektrod [mm]
d_1	průměr malé elektrody [mm]
d_2	průměr velké elektrody [mm]
E	elektrická intenzita [$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$]
E_{0m}	střídavá vrcholová elektrická intenzita [$\text{V}\cdot\text{m}^{-1}$]
E_p	elektrická pevnost [$\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1}$]
h	Planckova konstanta [J·s]
h	tloušťka vzorku [mm]
I	elektrický proud [A]
I_a	absorpční proud [A]
I_{aj}	jalová (bezeztrátová) složka proudu [A]
I_{aw}	činná (ztrátová) složka proudu [A]
I_{bzp}	proud odpovídající bezeztrátovým polarizacím [A]
I_{c0}	nabíjecí proud geometrické kapacity [A]
I_p	povrchový proud [A]
I_v	vodivostní proud [A]

l_e	.....	délka elektrod [mm]
m	.....	hmotnost ionizované částice [kg]
n	.....	počet pokusů
p	.....	pravděpodobnost (ppst) [%]
p	.....	tlak [Pa]
P_z	.....	ztrátový výkon [W]
R	.....	elektrický odpor [Ω]
r	.....	poloměr vodiče [mm]
R_p	.....	povrchový elektrický odpor [Ω]
S	.....	plocha elektrod [m ²]
T	.....	teplota [K]
T_1	.....	doba čela [μ s]
T_2	.....	doba půltýlu [μ s]
$\text{tg } \delta$	.....	ztrátový činitel [-]
U	.....	elektrické napětí [V]
U_{50}	.....	předpoklad napětí s 50% ppstí přeskočů [kV]
U_{50}^*	.....	odhad napětí s 50% ppstí přeskočů [kV]
U_p	.....	průrazné napětí [kV]
ν_f	.....	frekvence záření [Hz]
v	.....	rychlost částice [m.s ⁻¹]
W_i	.....	ionizační energie [J]

Úvod

Každé elektrické zařízení se skládá z vodivých materiálů a dielektrik. Dielektrika oddělují elektrické části různého potenciálu. Nevhodně zvolené dielektrikum má velký vliv na snížení celkové spolehlivosti a životnosti zařízení, jelikož jeho proražení či propálení může vést k celkové nebo částečné poruše. Abychom vhodně zvolili dielektrikum, je třeba znát jeho základní vlastnosti jak elektrické, které jsou popsány v této diplomové práci, tak i vlastnosti mechanické. Dále je potřeba znát, kde bude zařízení umístěno, jelikož závisí také na prostředí, teplotě apod. Mezi nejzákladnější a zároveň nejdůležitější elektrické vlastnosti dielektrika patří elektrická pevnost.

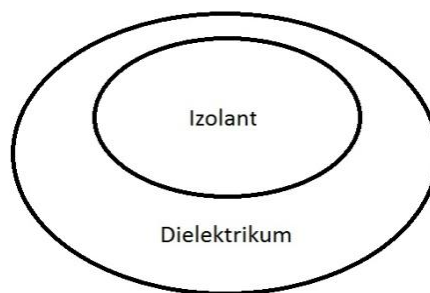
V praktické části mé diplomové práce jsem se zabýval elektrickou pevností plynného izolantu mezi dvěma elektrodami. Pro měření jsem si zvolil kulaté elektrody o rozdílném průměru. Průměr první elektrody byl $d_1 = 2\text{cm}$ a druhé $d_2 = 15\text{cm}$. Zkoumal jsem, jak ovlivní elektrickou pevnost uzavřená ($p = 1\text{bar}$) nebo otevřená nádoba. Dále jsem měřil, jaký vliv má bariéra umístěná mezi elektrodami na danou elektrickou pevnost. Použil jsem metody rázových zkoušek dle normy ČSN EN 60060-1. V normě se pro toto zkoušení uvádějí tři zkoušky, a to zkoušky více hladinami, zkoušky metodou nahoru-dolů a zkoušky postupným namáháním. Tyto zkoušky jsem prováděl vícekrát v různých časech mezi přeskoky, abych zjistil, jestli časový rozptyl při najíždění s napětím má velký či malý vliv na přeskokové napětí.

1 Obecná problematika chování dielektrik

Nejdříve je třeba vysvětlit si dva pojmy - dielektrikum a izolant, které jsou pro toto téma klíčové. Zásadní je objasnit si rozdíly mezi dielektrikem a izolantem. Mnoho lidí se domnívá, že jde o synonyma, jelikož v praxi je mnoho dielektrik izolantem. [1]

1.1 Rozdíl mezi dielektrikem a izolantem

Dielektrikum je materiál, který má schopnost polarizace tzn., že má vlastní vnitřní elektrické pole po vložení do vnějšího elektrického pole. Dielektrikum je aktivní prvek. Izolant má velký odpor a tím zabraňuje průchodu elektrického proudu a tím pádem je vlastně prvek pasivní. Ideální izolant má nekonečný odpor, proto nevede vůbec elektrický proud. Dielektrikum je nadřazené izolantu, tudíž každý izolant je dielektrikum, ale každé dielektrikum nemusí být izolant viz *obr. 1.1*. [1]



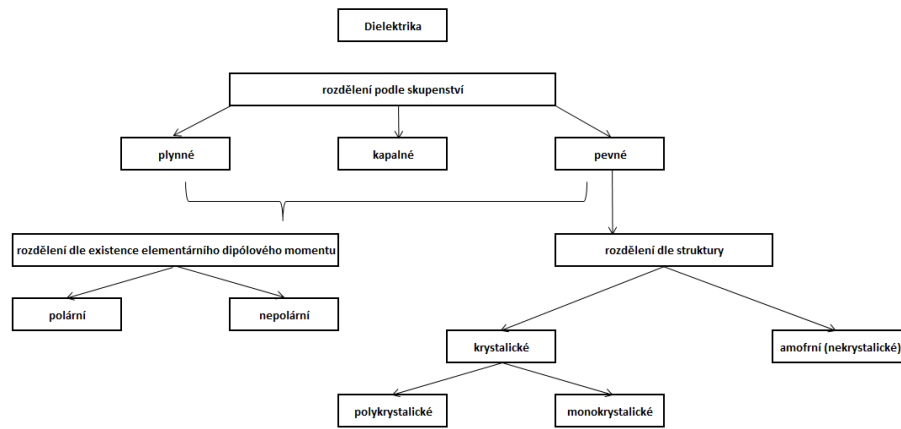
Obr. 1.1 Znárodnění dielektrika vs. izolant [1]

Dále dielektrika dělíme do tří skupin podle: [1, 2]

- skupenství - zohledňuje jak vlastnosti fyzikální, tak elektrické
- uspořádání - může být polární dielektrikum (má trvalé elementární momenty i bez působení elektrického pole) nebo nepolární
- struktury - rozdělení dielektrik na krystalické nebo amorfní (nekrystalické)

U krystalických látek je vnitřní stavba složena z částic (molekul, atomů, iontů), které jsou uspořádány pravidelně v prostoru. Pro nekrystalické látky je typické nepravidelné uspořádání částic (jsou uspořádány na velmi krátkou vzdálenost). Lze

převést amorfni látku na krystalickou a to tak, že budeme látku dlouhodobě udržovat na vysoké teplotě. Krystalické uspořádání je stabilnější. [2]



Obr. 1.2 Rozdělení dielektrika dle skupenství [1]

1.2 Polarizace

Polarizaci objevil Johann Carl Wilcke roku 1758 - je to děj, který vzniká vložením dielektrika do elektrického pole. Jak polarizace probíhá, záleží na struktuře a stavbě vloženého dielektrika, ale často probíhá v látce. Hlavní rozdělení mechanismů polarizace je s působením vnějšího elektrického pole a bez působení vnějšího elektrického pole. Dále se v mé práci budu věnovat jen polarizacím, na které působí vnější elektrické pole (např. iontová, relaxační, migrační atd.). [1,3,4,5]

1.2.1 Deformační polarizace

U této polarizace je nosičem elektron, iont nebo stálý dipól (ten je součástí struktury dielektrika). Tento nosič je tak silně vázaný, že po vložení do elektrického pole se posune z rovnovážné polohy o minimální vzdálenost. To může mít za následek ovlivnění relativní permitivity dielektrika, jelikož dochází k posunutí velkého množství nosičů. Po skončení působení elektrického pole se nosiče opět rychle vrátí do rovnovážné polohy (v rozmezí $10^{-16} - 10^{-13}$ s). Deformační polarizace jsou téměř bezetrátové a můžeme ji dále dělit na polarizaci elektronovou, iontovou a polarizaci s pružně vázanými dipólovými momenty. [1]

1.2.2 Relaxační polarizace

Na mechanismu relaxační polarizace se podílejí slabě vázané částice jako jsou kapalná a plynná dielektrika. U pevných dielektrik dochází k relaxační polarizaci v místech, kde jsou nečistoty nebo je narušená struktura látky. Tato polarizace se občas nazývá tepelná, jelikož závisí na teplotě a díky tepelnému pohybu částic mohou překonat potenciálovou bariéru. Pohyb částic je však chaotický, proto nedochází k polarizaci. Po vložení dielektrika do elektrického pole dojde ke změně potenciálových bariér tak, že pro některé částice je to energeticky výhodné, ale tento děj nenastane ihned. Časová konstanta se nazývá relaxační doba, která je závislá na okolních podmínkách. Relaxační doba je velmi důležitou charakteristickou hodnotou pro polarizaci. Čas ustálení polarizace je pomalý (v rozmezí 10^{-12} - 10^{-8} s) a tento druh je také ztrátový. Mezi relaxační polarizace patří iontová relaxační polarizace a dipólová relaxační polarizace. [1, 3]

1.2.3 Migrační polarizace

Kromě vázaných nosičů (ať už slabě či silně) se můžou zúčastnit polarizace i nosiče volné, což je právě u migrační polarizace. Volné nosiče vznikly díky makroskopickým nehomogenitám v dielektriku. Po vložení do elektrického pole se migrující volné nosiče na nich zachytávají. Mezi makroskopické nehomogenity patří např. bublina, prasklina nebo jiné defekty ve struktuře (např. při nesprávném používání nebo ve výrobě). Podmínkou pro vznik prostorového náboje je právě nehomogenita a volné nosiče. Dříve se tato polarizace považovala za vedlejší, ale v současné době je naopak prostorový náboj předmětem výzkumu, jelikož má velký vliv na chování dielektrik v elektrickém poli. Prostorový náboj se nejvíce projeví u rázového namáhání nebo u vysokonapěťových zařízení (buď u stejnosměrného napětí nebo u malých frekvencí). Prostorový náboj je buď homo-náboj či hetero-náboj. Při porovnání s ostatními polarizacemi je tato nejpomalejší a je stejně jako relaxační polarizace ztrátová. Migrační polarizace se často vyskytuje u kompozitních dielektrik. [1]

Kompozit je materiál ze dvou či více částí s různými vlastnostmi. Tyto části dohromady tvoří celek, který má lepší vlastnosti než jakýkoli materiál z nich složený. Nejčastěji jedna složka zlepšuje pevnost a druhá působí jako pojivo. Příklad kompozitu je např. lepenka, porcelán, impregnovaný papír atd.

1.3 Elektrická vodivost

Dokonalý izolant neexistuje, tudíž každý materiál má nějaké volné nosiče náboje, nečistoty nebo příměsi, a proto propouští nějaký minimální proud. Pro hodnocení elektrické vodivosti je důležitá konduktivita (měrná elektrická vodivost) nebo její převrácená hodnota rezistivita (měrný elektrický odpor). [1,6]

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (1.1)$$

Pro plochý vzorek pro výpočet měrného elektrického odporu v homogenním poli existuje vztah 1.2.

$$\rho = R \cdot \frac{S}{h} \quad (1.2)$$

Izolační odpor R se vypočte podle Ohmova zákona a poté ho přepočteme na rozměr zkoušenice, S znázorňuje obsah elektrod a h je tloušťka vzorku. Nelze porovnávat dielektrika dle izolačního odporu, pokud nejsou vzorky totožné, musíme je porovnávat podle rezistivity. [6]

1.3.1 Elektrická vodivost plynného izolantu

Jelikož v plynu je malé množství volných nosičů elektrického náboje, tak lze tvrdit, že za určitých podmínek (nízké teploty a slabého elektrického pole) je plyn výborný izolant. Koncentraci volných nosičů lze zvýšit pomocí ionizačního činidla (např. kosmického záření), jelikož se uvolní elektrony z neutrálního atomu a stanou se z nich volné nosiče náboje. Tomuto procesu se říká ionizace plynu. V plynu se můžou objevit tři druhy ionizace - nárazová, povrchová a fotoionizace. Vlivem těchto ionizací vznikají, ale i samozřejmě zanikají (rekombinací či neutralizací), volné nosiče náboje. [1,5,6]

1.3.1.1 Nárazová ionizace

O nárazové ionizaci hovoříme tehdy, když se iont (popř. elektron) „srazí“ s neutrální částicí. Iont (popř. elektron) musí mít dostatečnou kinetickou energii, tu zesílíme vlivem působení elektrického pole nebo zahříváním. Pod pojmem „srážka“ si nemůžeme představit, že do sebe částice přímo narazí, ale jedná se o vzájemné působení

sil při průletu kolem sebe a tím pádem vychýlení drah. Aby se neutrální částice mohla ionizovat, musí splnit následující podmínku, viz rovnice 1.3. [1,2,6]

$$W_i \geq \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (1.3)$$

Kde: [1]

m je hmotnost ionizované částice [kg]

v je rychlost této částice [m.s⁻¹]

1.3.1.2 Povrchová ionizace

Při povrchové ionizaci se uvolňují elektrony z elektrody vlivem zahřívání nebo krátkovlnným zářením. Tato ionizace je závislá i na materiálu elektrod. [1,5]

1.3.1.3 Fotoionizace

U této ionizace vznikají volné nosiče náboje tak, že neutrální částice absorbuje foton. Ionizačními činidly v tomto případě jsou kosmické, gama nebo rentgenové záření, pokud splní následující podmínku: [1,5]

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

Kde: [1]

h je Planckova konstanta (6,62256.10⁻³⁴ J.s)

ν_f je frekvence záření [Hz]

1.3.1.4 Zánik volného nosiče náboje

Neutralizace

Z názvu je patrné, že se při tomto zániku nosiče zneutralizují, tzn. že se z nich stane neutrální atom. K tomuto procesu dojde tak, že volné nosiče elektrického náboje dopadají na elektrodu s opačnou polaritou a vrací se zpět do prostoru elektrod jako zmíněný neutrální atom. [1]

Rekombinace

Rekombinace je proces, který probíhá současně s ionizací, kdy se srazí dvě opačně nabitě částice a vznikne buď neutrální atom nebo molekula. K většímu počtu

rekombinací dochází při malé relativní rychlosti částic, jelikož jsou delší čas „u sebe“.
[1]

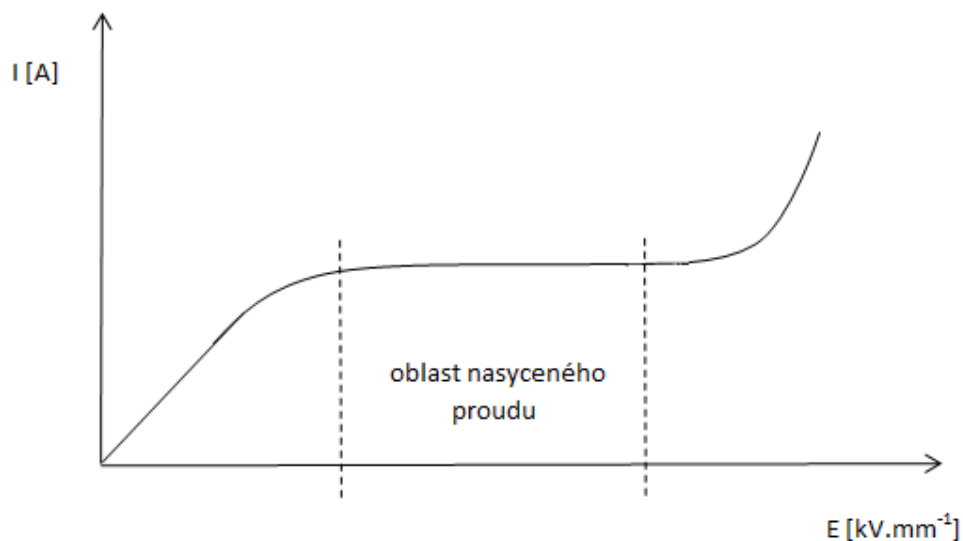
1.3.2 Elektrická vodivost kapalného izolantu

Kapalina vznikne tavením pevné látky nebo kondenzací plynu. Oproti plynné látce má bližší uspořádání molekul. To omezí pohyb molekul a utvoří pevnější, ale stále se měnící celky (klastry). Tyto klastry nebo částice se mohou pořád stále posouvat a to umožní látkám kapalného skupenství vyplnit nádobu dle jejího tvaru. Vodivost kapalného izolantu ovlivňuje struktura, složení látky (příměsí, nečistoty) a teplota. V praxi mají kapalně izolanty velké uplatnění, jelikož dobře odvádí teplo, vyplňují nerovnost materiálu a díky viskozitě a tepelné vodivosti se používají i jako chladicí médium. Kapalně izolanty můžeme podle jejich vodivosti rozdělit do dvou skupin extrémně čisté kapalně izolanty a technicky čisté kapalně izolanty. [2,3,6]

1.3.2.1 Extrémně čisté kapalně izolanty

Tyto kapalně izolanty vznikají ionizací (je potřeba ionizační činidlo např. záření), disociací molekul vlastní kapaliny a příměsí, tepelnou excitací nebo emisí elektronů

z katody. Dále se vyznačují malou konduktivitou (elektrickou vodivostí), která se pohybuje okolo $10^{-14} - 10^{-15} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$. [1]

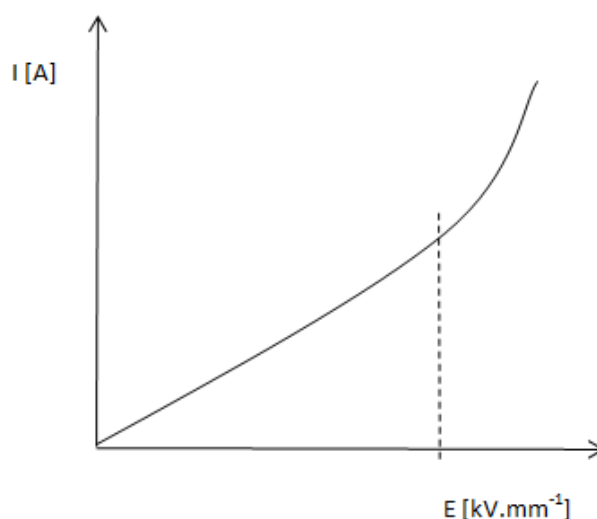


Obr. 1.3 Voltampérová charakteristika extrémně čistého kapalného izolantu [1]

Na *obr. 1.3* můžeme vidět oblast nasyceného proudu, kterou u technicky čistých kapalných izolantů nenajdeme. [1]

1.3.2.2 Technicky čisté kapalně izolanty

Technicky čisté kapalně izolanty mají o něco větší elektrickou vodivost oproti extrémně čistým kapalným izolantům, a to okolo $10^{-11} - 10^{-12} \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$. V těchto izolantech jsou dvě vodivosti, a to iontová a elektroforetická. Iontovou vodivost dále dělíme na vlastní a nevlastní iontovou vodivost. Rozdíl mezi nimi je takový, že u vlastní iontové vodivosti je pohyb iontů způsoben disociací molekul kapalného izolantu a u nevlastí je pohyb způsoben disociací příměsí. Elektroforetická vodivost se v podstatě moc neliší od iontové vodivosti, akorát se vyskytuje v koloidních systémech. [1,3,5]



Obr. 1.4 Voltampérová charakteristika technicky čistého kapalného izolantu [1]

1.3.3 Elektrická vodivost pevného izolantu

Elektrická vodivost u těchto izolantů je složitá, jelikož mají velké množství nehomogenit. U těchto izolantů za normálních podmínek je konduktivita malá, tzn. že mají dobré izolační vlastnosti. Jsou známy dva typy vodivostí - elektronová a iontová, přičemž vždy jedna vodivost převažuje. Jestliže nemáme extrémní podmínky (např. intenzitu elektrického pole mezi $10 - 100 \text{ kV}\cdot\text{mm}^{-1}$), tak je častější iontová vodivost. [5,6]

Kromě těchto vnitřních vodivostí se u pevných dielektrik objevuje ještě povrchová vodivost (popř. povrchová konduktivita). Povrchová konduktivita se dá vyjádřit pomocí proudu na povrchu I_p vztažený na jednotku délky elektrody a elektrické intenzity E . [6]

$$\gamma_p = \frac{I_p}{E} = \frac{I \cdot d}{U \cdot l_e} \quad (1.5)$$

Jednoduchou úpravou ze vztahu (1.5) odvodíme vzorec pro povrchovou rezistivitu. [1]

$$\rho_p = R_p \cdot \frac{l_e}{d} \quad (1.6)$$

Kde R_p je povrchový elektrický odpor (vyjádřený dle Ohmova zákona), l_e je délka elektrod na povrchu dielektrika a d je vzdálenost elektrod. [1]

Povrchová vodivost je závislá na počtu nosičů elektrického náboje na povrchu dielektrika, ale i na vlhkosti okolí. Nejvíce jsou vlhkostí ovlivňovány dielektrika s iontovým charakterem. Volné nosiče náboje na povrchu izolantu vznikají hlavně díky disociaci nečistot. [1,5,6]

1.4 Komplexní permitivita

Pro praktické aplikace charakteristiky polarizačních dějů se objevuje nejčastěji pojem permitivita. Z Maxwellových rovnic je patrné, že permitivita je konstantou úměrnosti mezi vektorem intenzity elektrického pole a vektorem elektrické indukce. [7]

$$\bar{D} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \bar{E} \quad (1.7)$$

Permitivita vakua je $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$ a relativní permitivita vzduchu při normálním tlaku a teplotě ($p=9,81 \cdot 10^4 \text{ Pa}$ a $T=293 \text{ K}$) je 1,00053. [7]

Zvýšením elektrické indukce v důsledku polarizace při konstantní intenzitě elektrického pole se zvýší náboj na elektrodách. Toho se využívá pro určení relativní permitivity. [7]

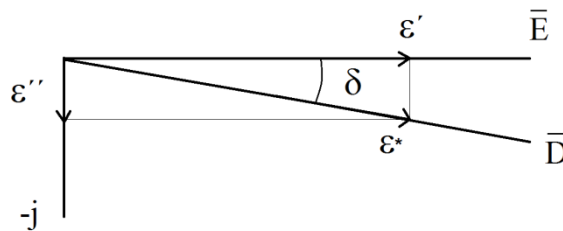
$$\varepsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (1.8)$$

Hodnota relativní permitivity vakua je rovna 1, jelikož nemůže dojít k polarizaci. Pro jinou látku je relativní permitivita vždy větší než 1. Polarizační mechanismy jsou určeny právě relativní permitivitou a ta je závislá na okolních podmínkách tzn., že bychom je měli vždy uvádět s relativní permitivitou. [7]

U střídavé polarizace dochází ke zpoždění elektrické indukce za intenzitou elektrického pole díky dielektrické relaxaci. [7]

$$\vec{D}(\omega) = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon^*(\omega) \cdot \vec{E}(\omega) \quad (1.9)$$

Relativní komplexní permitivita je kmitočtově závislá komplexní veličina se zápornou fází. Z obr. 1.5 je patrné, že se vypočítá, komplexním sečtením reálné ε' a imaginární ε'' . Imaginární složka je úměrná ztrátám v dielektriku a nazývá se ztrátové číslo. [8]



Obr. 1.5 Vektorový diagram [4]

Komplexní permitivita (kmitočtově závislá) se uvádí vztahem [8]

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j \cdot \varepsilon'' \quad (1.10)$$

Empirické funkce popisující komplexní permitivitu v kmitočtové oblasti je nutno rozložit na reálnou a imaginární část a tím separovat ε' a ε'' . Ztrátový činitel $\tan \delta$ je poté dán podílem ε' a ε'' . [8]

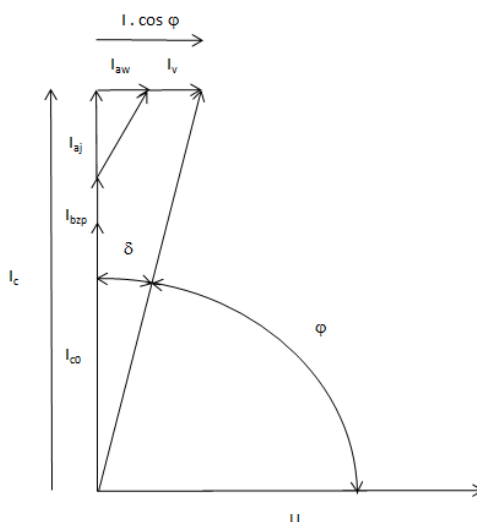
$$\varepsilon'' = \varepsilon' \cdot \tan \delta \quad (1.11)$$

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (1.12)$$

Podle ztrátového činitele můžeme na první pohled určit, jestli je materiál dobrým či špatným izolantem. Z elektroizolačního hlediska poznáme dobrý izolant tak, že má ztrátový činitel menší než 10^{-3} a špatný izolant má ztrátový činitel větší než 10^{-2} . [1]

1.5 Dielektrické ztráty

Dielektrické ztráty jsou vlastně přeměnou energie na energii nežádoucí, v našem případě většinou na tepelnou energii. Tuto tepelnou energii musíme odvést, aby nedošlo k přehřátí dielektrika. To by vedlo k dalším ztrátám a k opětovnému vzrůstu teploty, v nejhorším případě by mohlo dojít i k průrazu dielektrika. Dielektrické ztráty záleží na struktuře dielektrika, příměsích, skupenství nebo např. na obsahu nečistot, ale i na frekvenci, intenzitě elektrického pole a relativní permitivitě izolantu. V praxi hledáme vhodný kompromis. Pokud máme dielektrikum ve střídavém elektrickém poli, tak dielektrické ztráty tvoří ztráty vodivostní, ionizační a ztráty polarizací. Díky tomu ve skutečném dielektriku nepředbíhá proud před napětím o 90° , ale o úhel menší, viz *obr. 1.6*. [1, 9]



Obr. 1.6 Fázorový diagram reálného dielektrika [5]

Proudem I_{c0} se nabíjí geometrická kapacita dielektrika. Proud I_{bzp} jsou bezztrátové rychlé polarizace (elektronová a iontová). Absorpční proud I_a odpovídá ztrátovým pomalým polarizacím. Absorpční proud se dá rozložit na činnou složku I_{aw} , která je ztrátová, a na jalovou bezztrátovou složku I_j . Vodivostní proud I_v je způsoben nenulovou elektrickou vodivostí daného dielektrika a je ve fázi s napětím U . V praxi se zavádí pojem ztrátový činitel, a to je $\operatorname{tg} \delta$, který nám udává tepelné ztráty v reálném dielektriku. Ztráty v dielektriku můžeme ještě posoudit podle ztrátového výkonu. [1,6]

1.5.1 Ztrátový výkon

Výkon, který se ztratí v dielektriku, je nazýván ztrátovým výkonem P_z . Z uvedeného fázorového diagramu pro reálné dielektrikum jdou dielektrické ztráty v elektrickém střídavém poli vyjádřit pomocí těchto vztahů: [1,6]

$$P_z = U \cdot (I_{aw} + I_j) = U \cdot I \cdot \cos \varphi = U \cdot I \cdot \sin \delta \quad (1.13)$$

$$P_z = U \cdot I_c \cdot \operatorname{tg} \delta \quad (1.14)$$

Po úpravě těchto vztahů dostaneme výsledný vztah pro ztrátový výkon: [1]

$$P_z = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (1.15)$$

kde C je součtem geometrické řady C_0 a C_p . [1,6]

1.5.2 Dielektrické ztráty v plynném izolantu

Dielektrické ztráty jsou zvláště při malém napětí v plynném izolantu velmi malé, proto jsou plynné izolanty dobrými dielektriky. Ztráty jsou způsobené malou elektrickou vodivostí, jelikož tu polarizační můžeme zanedbat. Pokud zanedbáme polarizační ztráty (nebo se v dielektriku vůbec nevyskytují), můžeme použít vztah: [1]

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\gamma}{\omega \cdot \varepsilon' \cdot \varepsilon_0} \quad (1.16)$$

1.5.3 Dielektrické ztráty v kapalném izolantu

Kapalná dielektrika dělíme dle dielektrických ztrát do dvou skupin. Do první skupiny patří polární dielektrika a do druhé dielektrika nepolární. U čistých nepolárních dielektrik jsou ztráty zapříčiněné pouze elektrickou vodivostí, která je malá, tzn. budou tu i nízké dielektrické ztráty. Kdežto u polárních dielektrik musíme uvažovat

i polarizační ztráty. Dielektrické ztráty jsou větší než u čistých nepolárních dielektrik nejen díky polarizačním ztrátám, ale i kvůli větším ztrátám vodivostním. Vodivostní ztráty jsou vyšší, jelikož u polárních dielektrik jsou dipóly, které usnadňují disociaci a to má za následek zvýšení elektrického proudu a tím pádem i elektrické vodivosti. Dielektrické ztráty závisí také na míře nečistot či příměsí v dielektriku, ale i na frekvenci, teplotě a intenzitě elektrického pole. [1,5]

1.5.4 Dielektrické ztráty v pevném izolantu

V této kapitole existují ztráty vodivostní, polarizační nebo ionizační. Jestli tyto ztráty jsou zanedbatelné či nikoli, záleží na struktuře materiálu, chemickém složení či druhu nečistot. U pevných izolantů se předpokládají homogenní dielektrika, ale samozřejmě v praxi se vyskytují i dielektrika nehomogenní. Obecně tyto nehomogenity zvyšují dielektrické ztráty. Můžeme se jim vyvarovat už ve výrobě nebo při správném provozním namáhání. V praxi je pojem dielektrické ztráty důležitý, jelikož je to podstatný faktor při volbě izolantu. Těchto pevných izolantů se používá mnoho, proto je nutné tato dielektrika rozdělit podle popisu chování dielektrických ztrát do skupin. [1,6]

1.5.4.1 Nepolární pevné izolanty

U těchto dielektrik se uplatňují pouze vodivostní ztráty (pružné bezetrátové polarizace). Proto jsou dielektrické ztráty malé. V závislosti $\tan \delta$ na teplotě či frekvenci odpovídají nepolárním kapalným izolantům. Používají se pro vysokofrekvenční účely, díky jejich dobrým vlastnostem. [1,6]

Iontové izolanty

Mezi iontové izolanty patří anorganické látky (amorfní a krystalické). Dielektrické ztráty jsou závislé na těsnosti částic. Proto je dále dělíme na krystalické s těsným uložením iontů, s netěsným uložením iontů a iontové amorfní látky. [1]

Krystalické látky s těsným uložením iontů

Mezi tyto látky patří např. slída, křemen nebo korund. U těchto látek se projevují jen pružné bezetrátové polarizace. Po vložení do elektrického pole se krystalické látky

s těsným uložením iontů chovají jako látky nepolární a mají pouze vodivostní ztráty. Ty jsou způsobené poruchou mřížky nebo nečistotami dipólové povahy. [1,6]

Krystalické látky s netěsným uložením iontů

U této skupiny látek se projevují nejen pružné bezeztrátové polarizace, ale i polarizace relaxační. U krystalické látky s netěsným uložením iontů se uplatňují dielektrické ztráty vodivostního i polarizačního charakteru. [1]

Iontové amorfní látky

V této skupině látek mají velké zastoupení hlavně anorganická skla, ale patří sem i keramické izolanty (malé dielektrické ztráty). Dielektrické ztráty jsou vodivostní i polarizační. Poměr velikostí těchto složek je dán chemickým složením dané látky. [1,6]

Polární (dipólové) pevné izolanty

Polární pevná dielektrika mají asi největší dielektrické ztráty, jelikož se u nich mohou uplatnit vodivostní, polarizační, ale i ionizační složky. Ionizační ztráty vznikají v nehomogenitách materiálu jako např. v dutinkách. [1,6]

2 Elektrická pevnost

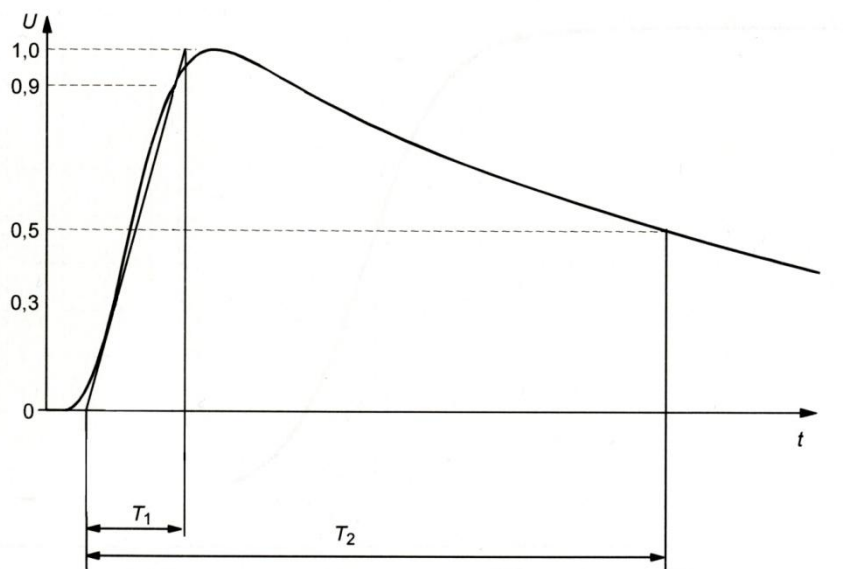
Dielektrikum si zachová své izolační vlastnosti jen do určité intenzity elektrického pole. Tato hranice se nazývá kritická, poté se rychle začínají uvolňovat volné nosiče náboje a dochází ke snížení rezistivity což má za následek zvýšení proudu. Dle skupenství dielektrika se rozlišují dva druhy porušení elektrické pevnosti - průraz nebo přeskok. Průraz nastává u pevných dielektrik a dojde-li k průrazu, pro daný materiál to znamená trvalou ztrátu elektrické pevnosti. Pokud nastane přeskok, který je u plynného či kapalného dielektrika, tak se elektrická pevnost obnoví. Tento jev můžeme vidět v praxi např. u venkovního vedení na izolátorech, kde se může objevit přeskok vlivem např. zvýšené vlhkosti a elektrická pevnost vzduchu se opět po přeskoku obnoví. [3,5]

Elektrická pevnost záleží na mnoha vnitřních či venkovních faktorech. K vnitřním faktorům patří např. polarizovatelnost, rozměry nebo chemická stálost. Jako venkovní faktory lze uvést teplotu, tlak nebo vlhkost. Elektrická pevnost je přímo úměrná přiloženému průraznému napětí na elektrodách U_p a tloušťce dielektrika d . [5,10]

$$E_p = \frac{U_p}{d} \quad (2.1)$$

Vztah 2.1 lze využít pouze pro homogenní pole, pro pole nehomogenní je výpočet daleko složitější. Jednotky nejsou uváděny podle soustavy SI, jelikož jednotky $V \cdot m^{-1}$ jsou v praxi příliš velké. [3,11]

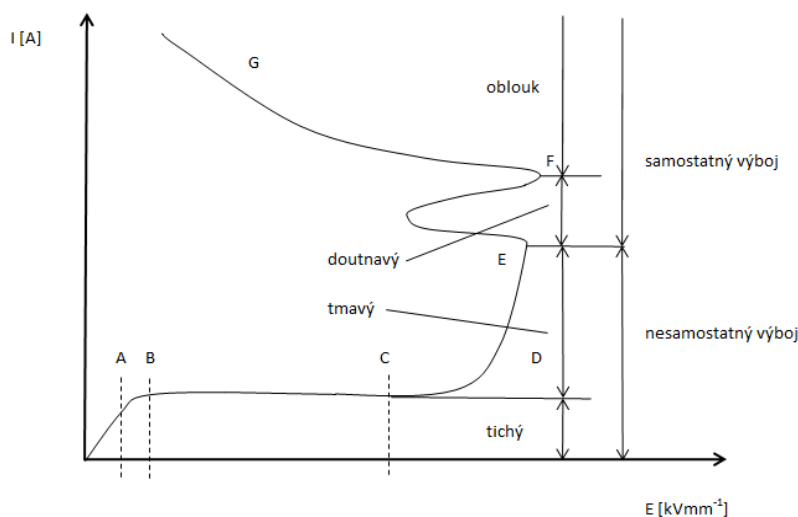
Jsou známy tři zkoušky elektrické pevnosti, kdy samozřejmě záleží na požadované funkci zařízení. První zkouška se provádí při střídavém napětí, druhá při stejnosměrném a třetí při rázovém napětí. Rázová vlna napětí je jednosměrná rychle vzrůstající vlna na nejvyšší napětí, poté pomalu klesá k nule, viz *obr. 2.1*. Dle normy je charakterizována dobou čela ($T_1=1,2\mu s \pm 30\%$) a dobou půltýlu ($T_2=50\mu s \pm 20\%$). V dnešní době už se provádí i zkoušky při vyšší frekvenci než 50Hz a jsou i různé tvary napětí (např. obdélníkový). [12,13,14]



Obr. 2.1 Rázová vlna napětí [14]

2.1 Elektrická pevnost plynného izolantu

Za normálních podmínek a poměrně malé intenzity v elektrickém poli má plynný izolant velkou elektrickou pevnost. Dochází v něm jak k samostatným výbojům, tak i k nesamostatným výbojům. To lze určit z následující úplné voltampérové charakteristiky, která je na *obr. 2.2*. Pro vznik nesamostatného výboje je potřeba ionizační činitel (např. záření). Poté v plynu vzniknou volné nosiče náboje. Plynný izolant ztrácí svou nevodivost a propouští měřitelné proudy. Pokud ionizační činitel zanikne, zanikne i nesamostatný výboj. Samostatné výboje mají vlastní zdroj (elektrické napětí). [1,10]



Obr. 2.2 Úplná voltampérová charakteristika plynného izolantu [1]

2.1.1 Nesamostatný a samostatný výboj

Výzkumem nesamostatných výbojů se zabýval irský fyzik John Edward Sealy Townsend, proto se jim také říká Townsendovy výboje. Předpokladem je deskový kondenzátor s plynným dielektrikem v homogenním časově neproměnném elektrickém poli. Tyto výboje vznikají při nízkých tlacích a při malé hustotě proudu. Zvyšujeme-li napětí, roste s ním i proud a následující výboj je výboj Townsendův. Pokud zvyšováním napětí překonáme kritické hodnoty, proud se zvětší za krátký čas a vznikne samostatný výboj. Pro samostatný výboj musí platit: [1,4,5]

$$\gamma \cdot (e^{\alpha \cdot d} - 1) = 1 \quad (2.2)$$

Kde:

$(e^{\alpha \cdot d} - 1)$ je počet kladných iontů vytvořené jediným elektronem, který je emitován z katody.

$\gamma \cdot (e^{\alpha \cdot d} - 1)$ udává počet elektronů uvolněných těmito ionty z katody.

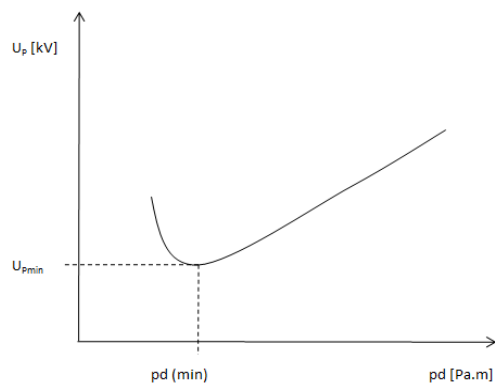
Po splnění této podmínky (občas nazývaná Townsendova podmínka pro regeneraci elektronů) se výboj udrží i bez působení ionizačního činidla, čili je samostatný. Toto napětí, při kterém vznikne samostatný výboj, se nazývá počáteční napětí výboje. [1,4]

2.1.2 Přeskokové napětí v homogenním poli

Teorie přeskokového napětí se v homogenním elektrickém poli liší od pole nehomogenního, proto si tyto kapitoly rozdělíme. V homogenním elektrickém poli se počáteční napětí výboje rovná napětí přeskokovému. Přeskokové napětí závisí na součinu tlaku a vzdálenosti elektrod při konstantní teplotě. Pokud zvětšíme tlak o x -násobek a o ten samý násobek zmenšíme vzdálenost elektrod, tak se přeskokové napětí nezmění. [1]

2.1.2.1 Paschenův zákon

Závislost přeskokového napětí na tlaku a vzdálenosti elektrod se nazývá Paschenův zákon. Na tento zákon přišel experimentálně německý profesor a fyzik Louis Paschen ještě před teorií nárazové ionizace. Průběh Paschenovy křivky je zobrazený na *obr. 2.3*. [4,5]



Obr. 2.3 Paschenova křivka [4]

Vypočtená a experimentálně změřená Paschenova křivka se liší jen v oblasti malých $p \cdot d$, kdy je uvažováno konstantní ionizační číslo, jinak jsou téměř totožné. Dno sedla (U_{Pmin} a $p d_{min}$) se pro různé plyny liší a vyjadřuje optimální podmínky pro výboj jak z hlediska vytvoření, tak i pro udržení výboje. [1,4,5]

2.1.2.2 Kanálový výboj

U rozvoje rychlých samostatných výbojů dochází k jiným mechanismům. Výzkum ukázal tzv. kanálové nebo také streamerové teorie přeskočení. Vývoj v počáteční fázi tvoří samostatné elektronové laviny, za kterými zůstanou kladné ionty. Ty jsou oproti elektronům téměř v klidu a vytvářejí prostorový náboj, který zhoršuje homogenní pole. Nesmíme tento prostorový náboj zaměnit za prostorový náboj v migrační polarizaci. V místě elektronové laviny, nazývané čelo, působí prostorový náboj v opačném směru než pole vnější. Před a za čelem laviny dojde k navýšení elektrické intenzity. Zvýšení elektrické intenzity má za následek zrychlení elektronů a i nárazové ionizace před čelem laviny. Tyto děje se podporují a tím urychlují postup čela laviny. Dalším rozhodujícím činitelem pro zkrácení času potřebného k překonání celé vzdálenosti mezi elektrodami je fotoionizace. Ta vychází z prvotní laviny, kde se sráží větší počet rychlých elektronů s molekulami plynu. Po fotoionizaci vzniká před čelem prvotní laviny nový elektron, ten odstartuje další lavinu a celý proces se opakuje. Nové laviny vznikají tam, kam prvotní lavina ještě nedošla. Sekundární laviny se spojí výbojovým kanálem (tvořený ionizovanou plazmou) a vzniká streamer. Tento streamer je katodový, jelikož je rostoucí od katody k anodě. Existuje i anodový streamer, který se pohybuje opačně. Obecně lze říci, že streamer vznikne někde mezi elektrodami a šíří se na obě strany. Vytvořený kanál vodivé plazmy spojí obě elektrody a dojde k přeskočení. [1,4]

2.1.2.3 Jiskrový výboj

Pro vznik jiskrového výboje je nutné mít homogenní či skoro homogenní pole a čisté elektrody (např. koule nebo desky). Po překročení určitého napětí vznikne jiskrový výboj. Jiskrový výboj může vzniknout i u pole nehomogenního, pokud zvyšujeme stále napětí u trsového výboje. Napětí, kdy se z trsového výboje stane jiskrový, se nazývá napětí jiskry. [4]

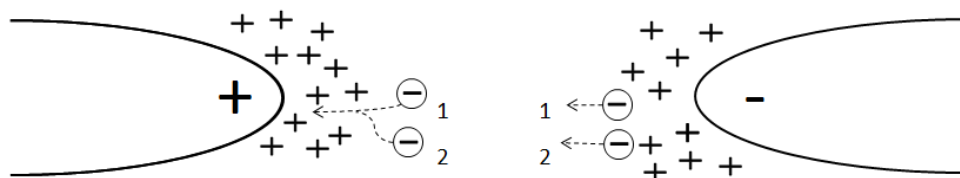
2.1.3 Přeskokové napětí v nehomogenním poli

Největší rozdíl oproti poli homogennímu je ten, že v poli silně nehomogenním se objevuje tzv. koróna. Zvyšováním napětí vzniká koróna mezi zakřivenými elektrodami, které jsou od sebe v silně nehomogenním poli (jako např. u vzduchu nebo v plynech s vyšším tlakem). [1,4]

2.1.3.1 Hrot - deska

Příklad vzniku silně nehomogenního pole jsou elektrody hrot-deska. U této kombinace lze vyzorovat rozdíl průrazného napětí, které ve stejnosměrném elektrickém poli závisí na polaritě elektrod. Po zvyšování napětí je nejsilnější elektrické pole na hrotu a vznikají tam volné elektrony a kladné ionty vlivem nárazové ionizace. Volné elektrony se šíří k desce a za sebou nechávají skoro nepohyblivé kladné ionty. Kladné ionty způsobí vznik prostorového náboje v oblasti hrotu a to má za následek deformaci pole. [1]

Pokud je hrot kladná elektroda, způsobí kladný prostorový náboj takovou deformaci jako by elektroda měla objem prostorového náboje. To má dva následky. První je ten, že poloměr elektrody se zvětšil, tudíž se intenzita v její blízkosti zmenší. Druhou možností je zmenšení vzdálenosti elektrod („prodloužení hrotu“), což intenzitu elektrického pole zvětšuje. Pokud převládá první situace, tak se výboj vzdálí dál od hrotu a vzniknou tryskový výboje, které se postupně přemění v korónu. Pokud budeme dále zvyšovat přiložené napětí, nastane druhá situace, kdy se zvětší intenzita elektrického pole a dojde k přeskoku dříve než při opačné polaritě elektrod. [1,10]



Obr. 2.4 Vytvoření hrotového výboje na kladném a záporném hrotu [10]

2.1.4 Koróna u elektrod důležitých tvarů

Koróna je neúplný samostatný výboj v oblasti elektrod. Korónu také ovlivňuje povrch elektrod nebo nečistoty, je charakteristická praskotem a šumem. Když budeme dále zvyšovat napětí, tak se bude vyvíjet výboj jako v poli homogenním. [1,4]

2.1.4.1 Rovnoběžné dráty (venkovní vedení)

U venkovního vedení, pokud je průměr vodičů vůči vzdálenosti malý, tak intenzita elektrického pole nezávisí na vzdálenosti vodičů, ale na jejich průměru. Bezpečný vznik koróny nastane, pokud splní následující vztah: [4]

$$\frac{a}{r} \geq 25 \quad (2.3)$$

Je-li venkovní vedení v jedné rovině, tak pro prostřední vodič platí, že napětí je asi o 4% nižší. Krajiní vodiče budou mít napětí asi o 6% vyšší než uvádí rovnice 2.4. Vznik koróny záleží také na typu povrchu a znečištění vodiče, jelikož např. u hladkých čistých vodičů nastane koróna téměř okamžitě, ale v praxi vznikají před korónou ještě nestabilní výboje. Pro omezení koróny u venkovních vedení vn a vvn se používají svazkové vodiče. [4]

$$U_0 = \delta \cdot \frac{E_{0m}}{\sqrt{2}} \cdot r \cdot \sqrt{3} \cdot \ln \frac{a}{r} \quad (2.4)$$

Korónu je nutné omezovat, jelikož způsobuje na venkovním vedení ztráty elektrické energie, dále pak poruchy v televizi, rozhlasu a ve vysokofrekvenční telefonii. Proto je koróna na venkovním vedení či izolátorech nežádoucí. Také nesmí vznikat ani pod porcelánovými materiály u bleskojistek, jelikož s korónou vzniká ozón a další oxidy dusíku, které společně s vlhkostí tvoří kyseliny naleptávající porcelánový materiál.[4]

2.1.4.2 Dva hroty

U tohoto uskupení je nastává koróny docela při malém napětí. Budeme-li napětí dále zvyšovat u doskoků pod 60mm, přejde koróna v jiskru a u doskoků nad 60mm bude trsový výboj. [4]

2.1.4.3 Dvě koule

Ke vzniku koróny dojde pouze u elektrod malých průměrů. Obvykle se téměř okamžitě promění v trsový výboj nebo dojde k přeskoku. [4]

2.1.4.4 Trsový výboj

Tento druh výboje nastává v divergentních elektrických polích. Divergentní elektrické pole můžeme vytvořit pomocí dvou koulí, dvěma hroty nebo u hladkých povrchů elektrod to může být příčinou prachu, pokud není nehomogenita pole mezi elektrodami moc velká. Je charakteristický praskotem a modrým rozvětveným trsovým výbojem. Tvar tohoto výboje je dán polaritou. Probíhá v něm nárazová ionizace a rekombinace. Trsy výboje se neustále objevují a mizí. Pokud se výboj ustálí, jde o sršení. [4]

2.2 Elektrická pevnost kapalného izolantu

Pro kapalné izolanty je specifická velká elektrická pevnost, jejich další výhodou je odvádění tepla sdílením (neboli konvencí) a tím např. chrání pevné izolanty před vlhkostí i vzduchem. Elektrická pevnost těchto izolantů se reálně může pohybovat samozřejmě v závislosti na jejich čistotě mezi 5 – 30kV/mm. Dále závisí na tvaru i znečištění elektrod, druhu napětí, rozložení elektrického pole, teplotě atd. Elektrická pevnost kapaliny je větší u rázového napětí než u napětí pomalu se zvyšujícího, jelikož u rázového impulsu se nestačí vytvořit vodivé můstky z nečistot. [1,4,11]

Dosud známé experimenty jsou nejednoznačné, jelikož existuje několik hypotéz. V čistých kapalných izolantech jsou dvě hypotézy mechanismu přeskoků. Do první patří ty teorie, kde hraje největší roli emise elektronů a nárazová ionizace. Druhou hypotézu představují teorie, v nichž největší roli má tvorba plynových buněk. Přesto se však výboje v kapalných izolantech chovají podle určitých rysů: [1]

- elektrická pevnost je vyšší než u plyných izolantů
- výboj se zpravidla tvoří v místech s vyšší koncentrací nečistot
- na voltampérové charakteristice technicky čistých kapalných izolantů většinou není oblast nasycení

- přeskokové napětí je ovlivňováno materiálem a povrchovou úpravou elektrod

2.3 Elektrická pevnost pevného izolantu

Největší rozdíl mezi pevným izolantem a kapalným (popř. plynným) je v nenávratnosti účinku průrazu. Plynné a kapalné izolanty mají schopnost regenerace, zatímco u pevných izolantů se vytvoří průrazem vodivá cesta, která je nevratná. Vlivem velkého elektrického namáhání dojde k průrazu, který se dělí do tří skupin čistě elektrický, tepelný nebo elektrochemický. [1]

Čistě elektrický průraz není závislý na teplotě ani na délce přiloženého napětí. Přiložené napětí má takovou energii, že dojde k okamžité destrukci v nejslabším místě izolantu. Naopak záleží na homogenitě pole, chemickém složení a struktuře izolantu. [1]

U tepelného průrazu výrazně záleží na závislosti průrazného napětí, na teplotě a délce jeho působení. Proto se tento průraz někdy nazývá elektrotepelný. Průraz nastává díky Jouelovým nebo dielektrickým ztrátám respektive jejich kombinací. [1]

O elektrochemickém průrazu můžeme uvažovat jen tehdy, pokud elektrické pole působí delší dobu. To nastartuje elektrochemické procesy a postupně dochází k zhoršování vlastností izolantu. [1]

Pevný izolant také může obsahovat různé nehomogenity materiálu jako např. dutinky různých velikostí (popř. tvarů) naplněné plynem, nejčastěji vzduchem. V dostatečně silném elektrickém poli může docházet u těchto nehomogenit k částečným výbojům. Výbojovým činnostem se u izolantů snažíme vyhnout, jelikož mají za následek jejich narušování. [10]

3 Zkoušky průrazným výbojem dle normy

Norma ČSN EN 60060-1 rozděluje zkoušky průrazným výbojem na tři třídy:
[14]

Třída 1: Zkoušky více hladinami

Třída 2: Zkoušky metodou nahoru-dolů

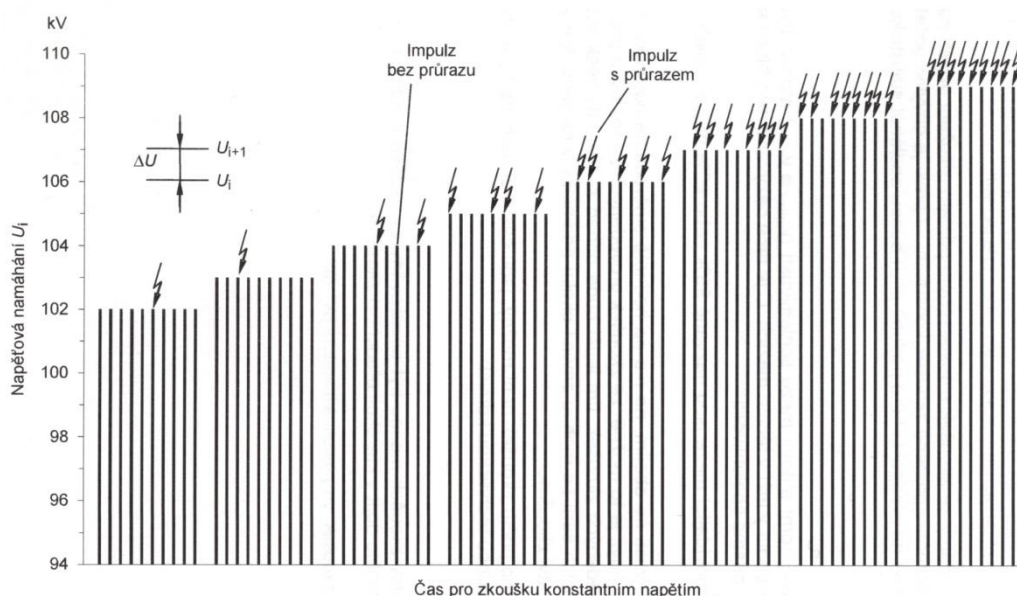
Třída 3: Zkoušky postupným namáháním

3.1.1 Třída 1: Zkoušky více hladinami

Zkoušky více hladinami se provádí tak, že n_i přiložených napětí na každé hladině (dle normy $n_i \geq 10$) má za příčinu výboj alespoň u 90 % z nich. Pro měření udává norma minimálně 5 hladin a zvyšování každé hladiny o ΔU .

$$\Delta U = (0,01 \text{ až } 0,06) \cdot U_{50} \quad (3.1)$$

Pro toto měření bylo použito 15 pokusů na jedné hladině a po 15 pokusech bylo zvyšováno napětí o hodnotu 5kV, dokud na jedné hladině nedošlo k minimálně 14 přeskokům (což odpovídá více jak 90 % přeskoků udávané normou). Výsledný graf udávaný v normě je na *obr. 3.1.* [14]



Obr. 3.1 Zkoušky více hladinami [14]

3.1.2 Třída 2: Zkoušky metodou nahoru-dolů

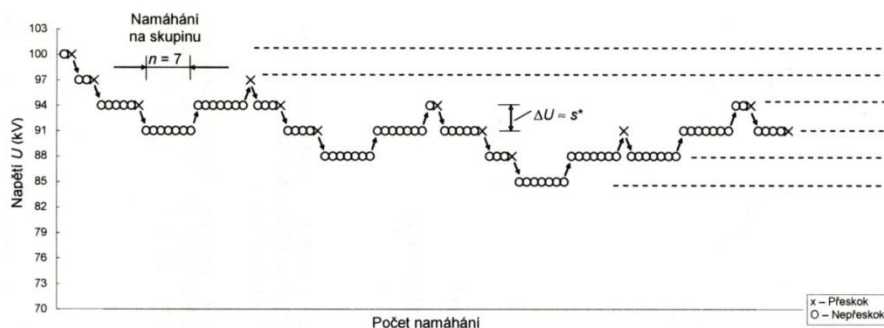
U této zkoušky se vybere vhodná n skupina začínajících stejných napět'ových hladin (norma udává n=7). Tato napět'ová hladina je pro každou skupinu hladin zvýšena či snížena o malý rozdíl ΔU . [14]

$$\Delta U = (0,01 \text{ až } 0,03) \cdot U_{50} \quad (3.2)$$

Norma udává i minimální počet 15 hladin. Touto metodou zjistíme desetiprocentní pravděpodobnost přeskoku a devadesátiprocentní pravděpodobnost (ppst) přeskoku. [14]

3.1.2.1 Určení desetiprocentní pravděpodobnosti přeskoku

V případě, že chceme určit desetiprocentní pravděpodobnost přeskoku, je nutné provést tuto zkoušku minimálně na 15 hladinách. Dojde-li v n skupině napětí k přeskoku, snížíme napětí o ΔU . Pokud na nové hladině dojde k dalšímu přeskoku, opět snížíme napětí o ΔU . Kdyby k přeskoku na této hladině nedošlo, napětí o stejnou hodnotu zvýšíme. Výsledný graf je zobrazený na obr. 3.2. [14]



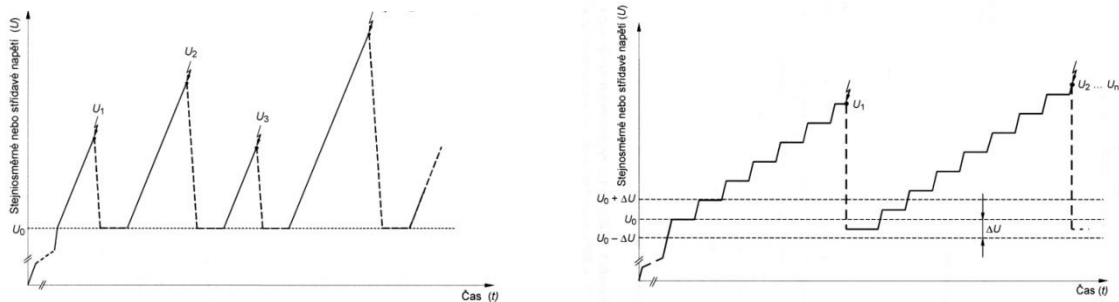
Obr. 3.2 Určení desetiprocentní ppsti přeskoku [14]

3.1.2.2 Určení devadesátiprocentní pravděpodobnosti přeskoku

K určení devadesátiprocentní pravděpodobnosti přeskoku použijeme opačný způsob. Napětí zvyšujeme o ΔU , dokud nedojde k přeskoku v dané skupině namáhání. Jakmile výboj proběhne, napětí snížíme o ΔU . Stejně jako u předchozí metody je potřeba zkoušku provést na 15 hladinách.[14]

3.1.3 Třída 3: Zkoušky postupným namáháním

U zkoušky třídy 3 vždy nastane průrazný výboj, který provedeme n -krát. Postup je jednoduchý, plynule nebo po krocích zvyšujeme napětí do hodnoty U_i , kdy nastane průrazný výboj. Pokud napětí nastavíme na konstantní hodnotu, čekáme, dokud nedojde k průrazu. Výsledkem měření je n -hodnot napětí U_i nebo čas t_i , ve kterém došlo k průrazu na určité hladině. Norma určuje $n \geq 10$. [14]



Obr. 3.3 Souvislé a postupné zvyšování napětí [14]

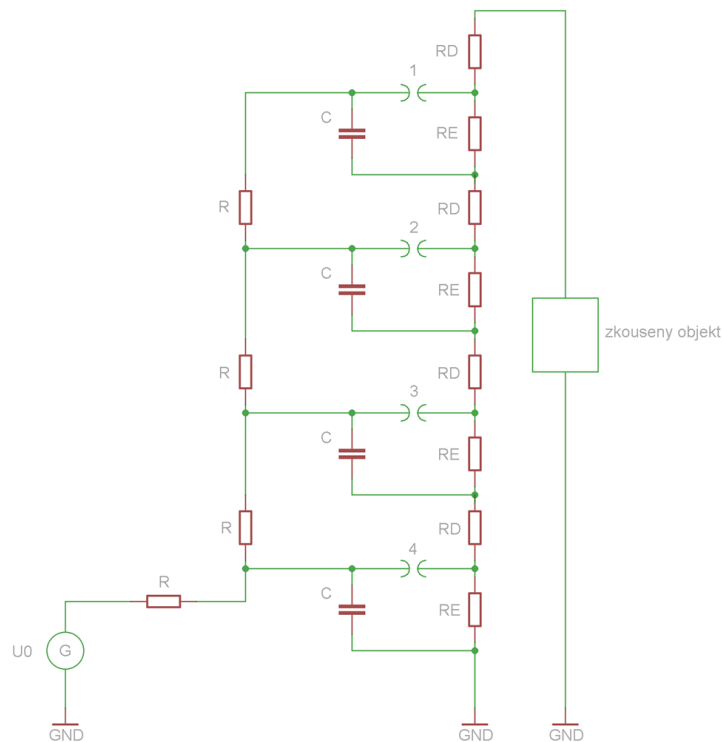
4 Praktická část

V praktické části jsem se zabýval elektrickou pevností mezi dvěma kulovými elektrodami v plynném prostředí. Nejdříve jsem jako plynné prostředí použil vzduch za normálního atmosférického tlaku při otevřené nádobě. Jako druhou variantu plynného prostředí jsem zvolil vzduch v hermeticky uzavřené nádobě. Tlak v uzavřené nádobě byl 1bar. Kromě otevřené a zavřené nádoby jsem testoval, jak ovlivní elektrickou pevnost mezi dvěma elektrodami bariéra. Pro tyto případy jsem použil zkoušky metodou více hladinami, zkoušky metodou nahoru-dolů a zkoušky postupným namáháním, které jsou popsány v kapitole 3.

Pro zkoušky byl použit rázový generátor (zdroj atmosférických impulzů) od švýcarské firmy Haefely. Tento zdroj je osmistupňový a zvládne kladné či záporné impulzní napětí. Tvar vlny je $1,2/50\mu s$ o maximální amplitudě 620 kV a energii 4 kJ. Potřebné výstupní napětí lze vytvořit díky vhodným uspořádáním kovových spojek a tak jednotlivé stupně řadit do sério-paraletlních skupin. Libovolné stupně můžeme odstranit nabíjecími odpory čímž dosáhneme dobře nastavitelné nižší napětí. [15]

4.1 Rázový generátor

Elektrický obvod rázového generátoru poprvé popsal německý elektrotechnik Erwin Otto Marx v r. 1924, který pracoval v Braunschweigu od r. 1918 do r. 1950. Cílem bylo vytvořit vysokonapěťový impulz. V dnešní době se rázový generátor využívá pro simulaci blesků např. pro rázové zkoušky elektrotechnických zařízení či u zkoušek elektrické pevnosti různých dielektrik nebo v letectví. Schéma čtyřstupňového rázového generátoru je na *obr. 4.1*, které se od osmistupňového liší pouze v tom, že je schéma zapojení poloviční. [16,17]



Obr. 4.1 Schéma čtyřstupňového rázového generátoru [17]

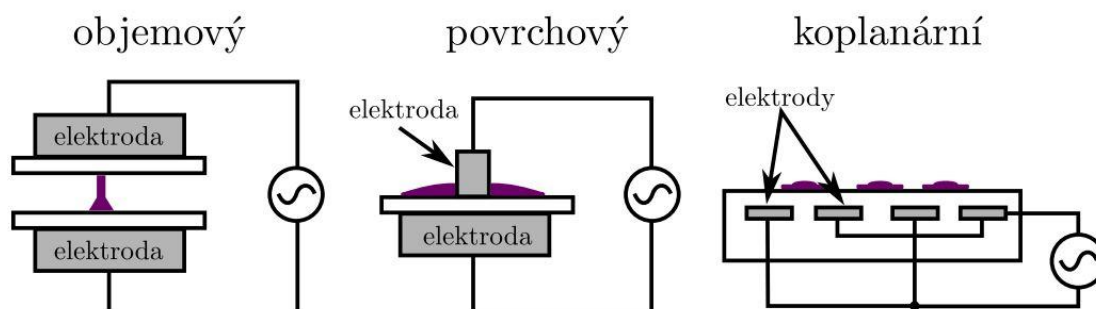
4.2 Bariéra

Bariéra se vkládá mezi elektrody pro zvýšení elektrické pevnosti. Je to tenké dielektrikum, na kterém se tvoří elektrický náboj, který má za následek rozložení pole. Po zvýšení napětí zabraňuje průchodu pomalých iontů, které nabíjí bariéru a tvoří homogenní pole. Na zvýšení elektrické pevnosti nemá vliv elektrická pevnost bariéry, ale elektrické pole na ní vytvořené. [18,19]

Dielektrický bariérový výboj vzniká v oblasti tehdy, pokud se mezi elektrodami nachází minimálně jedna bariéra. Na tento typ výboje přišel německý vynálezce

Ernst Werner von Siemens v roce 1857. Jde o krátký výboj, jelikož po zapálení se na bariéře usazuje elektrický náboj, který odstiňuje elektrické pole a výboj zhasne. Tento výboj není obloukový, jelikož za tento krátký čas nestačí ohřát okolí natolik, aby přešel na výboj obloukový. Dle uspořádání elektrod a bariéry lze tento dielektrický bariérový výboj rozdělit do tří skupin: [18, 19]

- objemový výboj
- povrchový výboj
- koplánární výboj



Obr. 4.2 Rozdělení bariérového výboje [19]

Pro své měření jsem použil bariéru o velikosti 200x200mm. Bariéra je z Ultramidu vyztužená skelným vláknem kvůli zpomalování hoření. Má výborné elektrické i mechanické vlastnosti.

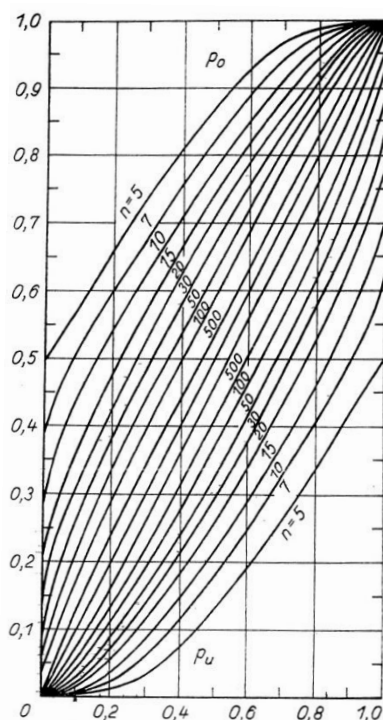
4.3 Zhodnocení jednotlivých metod

Jelikož měření probíhalo v několika dnech, přepočtl jsem všechna vypočtená napětí z různých metod měření na tlak $p_0=101,3\text{kPa}$ a teplotu $t_0=20^\circ\text{C}$, abych mohl metody navzájem porovnávat. Korekci jsem provedl dle rovnic 4.1 a 4.2. Korekční činitel hustoty vzduchu δ je považován za spolehlivý, pokud jeho hodnota je mezi 0,8 – 1,05. [14]

$$\delta = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{273 + t_0}{273 + t} \quad (4.1)$$

$$U_{real} = \frac{U_{změřené}}{\delta} \quad (4.2)$$

Zkoušky více hladinami jsou podle mého názoru pro toto testování nejvhodnější, jelikož si u nich můžeme určit skoro jakoukoli pravděpodobnost přeskočení. V praxi se chceme přeskočení vyhnout, tzn. je potřeba co nejmenší pravděpodobnost přeskočení a tu si snadno zjistíme z přímky na pravděpodobnostním papíru viz *příloha 1*. Tato přímka je obklopena horní a dolní mezí spolehlivosti. Meze spolehlivosti jsem určil z *obr. 4.3*.



Obr. 4.3 Určení mezí spolehlivosti

U zkoušky metodou nahoru-dolů můžeme určit jen padesátiprocentní nebo desetiprocentní pravděpodobnost přeskočení. V některých případech je tak vysoká pravděpodobnost nepřijatelná. Pro otevřenou nádobu bez bariéry jsem vypočítal, že dojde k přeskočení na 79,75kV s desetiprocentní pravděpodobností. U uzavřené nádoby bez bariéry je samozřejmě tato hodnota nižší ($U_{10}=65,53\text{kV}$), jelikož je pomalejší regenerace elektrické pevnosti.

Výsledkem zkoušky postupným namáháním je souhrnná funkce, ze které lze také určit jen odhad padesátiprocentní pravděpodobnosti (U_{50}^*). U této zkoušky jsem došel k výsledku, že odhad padesátiprocentní pravděpodobnosti přeskočení u otevřené nádoby bez bariéry na napětí 113kV. Po vložení bariéry mezi elektrody, napětí se zvýšilo na 137,92kV. Tyto hodnoty se určí z *rovnice 4.3*. [14]

$$U_{50}^* = \frac{\sum U_i}{n} \quad (4.3)$$

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vysvětlení pojmu dielektrikum a objasnění, co se s ním stane, pokud ho vložíme do elektrického pole. Poté jsem zkoumal elektrickou pevnost vzduchu mezi dvěma elektrodami. Obě elektrody byly uloženy do otevřené nebo uzavřené nádoby ($p=1\text{bar}$) (s nebo bez bariéry). V normě ČSN EN 60060-1 jsou postupy rázových zkoušek rozděleny dle statického vyhodnocování do tří typů zkoušek. K prvnímu typu zkoušky patří zkoušky více hladinami, dále zkoušky metodou nahoru-dolů a poslední typ zkoušek jsou zkoušky postupným namáháním.

Nejlepším typem zkoušky podle mého názoru jsou zkoušky více hladinami, jelikož si u ní můžeme určit jakoukoli pravděpodobnost přeskočení. U zkoušky metodou nahoru-dolů určíme pouze padesátiprocentní nebo desetiprocentní pravděpodobnost přeskočení. To může být pro nějaké zařízení velká pravděpodobnost. Pro otevřenou nádobu bez bariéry jsem vypočetl, že dojde k přeskočení na 79,75kV s desetiprocentní pravděpodobností. U uzavřené nádoby bez bariéry je samozřejmě tato hodnota nižší ($U_{p10\%}=65,53\text{kV}$), jelikož je pomalejší regenerace elektrické pevnosti.

Metodou zkoušky více hladinami jsem z grafu určil (viz *příloha 1*) např. že s pětiprocentní pravděpodobností přeskočení v uzavřené nádobě bez bariéry dojde na napětí 80kV. Pokud jsem mezi elektrody vložil bariéru, napětí vzrostlo na 146kV se stejnou pravděpodobností přeskočení. Ověřil jsem teoretické předpoklady, že vložením bariéry mezi elektrody zvýšíme elektrickou pevnost.

Výsledkem zkoušky postupným namáháním je pouze odhad padesátiprocentní pravděpodobnosti přeskočení, který určíme průměrem všech napětí, na kterých byl přeskok. U otevřené nádoby bez bariéry je odhad přeskočení s padesátiprocentní pravděpodobností 113kV a po vložení bariéry napětí vzrostlo na 137,92kV.

Použitá literatura

- [1] MENTLÍK, Václav. *Dielektrické prvky a systémy*. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [2] EVA KUČEROVÁ. *Elektrotechnické materiály*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-7082-940-0.
- [3] PALKO, Radek. *Teoretický rozbor elektrického průrazu*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. Západočeská univerzita.
- [4] VEVERKA, Antonín. *Technika vysokých napětí*. Praha: SNTL a ALFA, 1982.
- [5] CHARVÁT, Jakub. *Degradace elektrických izolací vysokým napětím*. Plzeň, 2010. Diplomová práce. Západočeská univerzita.
- [6] ULRYCH, Jan. *Dielektrická spektrologie v elektrotechnologické diagnostice*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. Západočeská univerzita.
- [7] <http://www.stanley.du.cz> [online]. [cit. 2013-04-11].
- [8] FRYBERT, Jan. *Počítačové modelování průběhu složek komplexní permitivity*. Brno, 2007. Bakalářská práce. Vysoké učení technické.
- [9] PETR, J. *Struktura a vlastnosti i materiálu II – Izolanty*. Praha: ČVUT, 1989.
- [10] HELLER, Bedřich a Antonín VEVERKA. *Elektrická pevnost*. Praha: ČSAV, 1957.
- [11] KUBÍK, Marek. *Elektrická pevnost a její zpracování dat*. Plzeň, 2008. Diplomová práce. Západočeská univerzita.
- [12] ČSN EN 60243-3 (346463). *Elektrická pevnost izolačních materiálů - Zkušební metody - Část 3: Dodatečné požadavky na impulzní zkoušky (1,2/50 μs)*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zastupitelství, 2002.
- [13] TRNKA, Pavel a Radek POLANSKÝ. *Elektrotechnika v praxi. Elektrotechnika v praxi*. 2008.
- [14] ČSN EN 60060-1. *Technika zkoušek vysokým napětím – Část 1: Obecné definice a požadavky na zkoušky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zastupitelství, 2011.
- [15] [Http://home.zcu.cz/~laurenc/zarizeni-vn.php](http://home.zcu.cz/~laurenc/zarizeni-vn.php) [online]. [cit. 2013-04-11].
- [16] CIGLBAUER, David. *Návrh laboratorního rázového generátoru*. Plzeň, 2011. Diplomová práce. Západočeská univerzita.
- [17] RODEWALD, ARNOLD. *Increasing the Trigger Range of a Marx Generator by means of Auxiliary Spark Gaps*. Switzerland.

- [18] JONÁŠOVÁ, EVA. *Plazmová příprava textilí a antiroztočovou povrchovou úpravou*. Brno 2011. Diplomová práce. Masarykova univerzita.
- [19] KLOC, PETR. *Studium vlastností bariérových výbojů ve směsích plynů*. Brno 2012. Disertační práce. Masarykova univerzita.

Seznam příloh

Příloha 1 Naměřené a vypočtené hodnoty zkoušky více hladinami

Příloha 2 Naměřené a vypočtené hodnoty zkoušky metodou nahoru-dolů

Příloha 3 Naměřené a vypočtené hodnoty zkoušky postupným namáháním

Příloha 1

Tab. 5.1 Zkoušky více hladinami pro otevřenou nádobu bez bariéry $\Delta t=12s$

p=97,6kPa, t=27,5°C (v tabulce uváděné U_{real} je zkorigované na $p_0=101,3kPa$ a $t_0=20°C$)																
Δt [s]	12															
počet přeskoků / počet pokusů	0/15	0/15	2/15	0/15	2/15	0/15	2/15	3/15	1/15	5/15	7/15	4/15	7/15	8/15	11/15	13/15
$U_{zmeřené}$ [V]	30,30	32,00	32,70	33,00	35,50	36,90	38,30	40,70	42,20	45,10	48,70	51,50	53,70	56,40	60,00	64,10
U_{real} [kV]	68,18	72,01	73,58	74,26	79,88	83,03	86,18	91,58	94,96	101,48	109,58	115,88	120,83	126,91	135,01	144,24
$U_{zmeřené}$ [V]	30,30	31,80	32,70	33,20	35,50	36,90	38,40	40,70	42,20	45,00	49,00	51,30	53,40	56,40	60,00	63,90
U_{real} [kV]	68,18	71,56	73,58	74,71	79,88	83,03	86,41	91,58	94,96	101,26	110,26	115,43	120,16	126,91	135,01	143,79
$U_{zmeřené}$ [V]	30,30	32,00	32,70	32,70	35,50	37,00	38,50	40,60	42,00	45,00	49,00	51,50	53,60	56,40	60,10	63,80
U_{real} [kV]	68,18	72,01	73,58	73,58	79,88	83,26	86,63	91,36	94,51	101,26	110,26	115,88	120,61	126,91	135,24	143,56
$U_{zmeřené}$ [V]	30,30	32,20	32,70	32,90	35,30	36,90	38,50	40,60	42,00	45,00	48,90	51,30	53,60	56,30	60,00	64,10
U_{real} [kV]	68,18	72,46	73,58	74,03	79,43	83,03	86,63	91,36	94,51	101,26	110,03	115,43	120,61	126,68	135,01	144,24
$U_{zmeřené}$ [V]	30,20	32,10	32,60	33,10	35,20	36,90	38,50	40,70	42,10	45,00	48,90	51,30	53,80	56,30	59,90	64,10
U_{real} [kV]	67,96	72,23	73,36	74,48	79,21	83,03	86,63	91,58	94,73	101,26	110,03	115,43	121,06	126,68	134,79	144,24
$U_{zmeřené}$ [V]	30,20	31,90	32,80	32,90	35,50	36,70	38,40	40,60	42,20	45,00	48,80	51,30	53,50	56,40	60,00	64,00
U_{real} [kV]	67,96	71,78	73,81	74,03	79,88	82,58	86,41	91,36	94,96	101,26	109,81	115,43	120,38	126,91	135,01	144,01
$U_{zmeřené}$ [V]	30,10	31,80	32,80	32,90	35,10	36,80	38,40	40,70	42,20	45,10	49,00	51,50	53,50	56,40	59,80	64,00
U_{real} [kV]	67,73	71,56	73,81	74,03	78,98	82,81	86,41	91,58	94,96	101,48	110,26	115,88	120,38	126,91	134,56	144,01
$U_{zmeřené}$ [V]	30,20	32,00	32,70	33,10	35,50	36,90	38,50	40,70	42,10	44,90	48,80	51,60	53,40	56,50	60,10	64,10
U_{real} [kV]	67,96	72,01	73,58	74,48	79,88	83,03	86,63	91,58	94,73	101,03	109,81	116,11	120,16	127,13	135,24	144,24
$U_{zmeřené}$ [V]	30,20	32,10	32,60	33,00	35,20	36,90	38,40	40,60	42,20	44,90	48,80	51,50	53,80	56,30	59,90	64,40
U_{real} [kV]	67,96	72,23	73,36	74,26	79,21	83,03	86,41	91,36	94,96	101,03	109,81	115,88	121,06	126,68	134,79	144,91
$U_{zmeřené}$ [V]	30,30	31,90	32,70	32,80	35,30	36,70	38,40	40,70	42,20	45,20	48,80	51,30	53,80	56,40	59,90	64,30
U_{real} [kV]	68,18	71,78	73,58	73,81	79,43	82,58	86,41	91,58	94,96	101,71	109,81	115,43	121,06	126,91	134,79	144,69
$U_{zmeřené}$ [V]	30,30	31,90	32,70	33,00	35,30	36,60	38,40	40,70	42,10	45,20	48,90	50,80	53,50	56,30	59,90	64,10
U_{real} [kV]	68,18	71,78	73,58	74,26	79,43	82,36	86,41	91,58	94,73	101,71	110,03	114,31	120,38	126,68	134,79	144,24
$U_{zmeřené}$ [V]	30,20	31,80	32,70	32,90	35,10	36,80	38,50	40,50	42,40	45,10	48,90	51,40	53,50	56,30	60,00	64,30
U_{real} [kV]	67,96	71,56	73,58	74,03	78,98	82,81	86,63	91,13	95,41	101,48	110,03	115,66	120,38	126,68	135,01	144,69
$U_{zmeřené}$ [V]	30,30	32,00	32,70	32,90	35,00	36,80	38,40	40,60	42,30	45,00	48,90	51,50	53,60	56,30	59,90	64,30
U_{real} [kV]	68,18	72,01	73,58	74,03	78,76	82,81	86,41	91,36	95,18	101,26	110,03	115,88	120,61	126,68	134,79	144,69
$U_{zmeřené}$ [V]	30,40	32,00	32,60	32,90	35,20	36,80	38,50	40,80	42,30	45,10	49,00	51,40	53,70	56,30	60,00	64,20
U_{real} [kV]	68,41	72,01	73,36	74,03	79,21	82,81	86,63	91,81	95,18	101,48	110,26	115,66	120,83	126,68	135,01	144,46
$U_{zmeřené}$ [V]	30,20	31,90	32,70	33,00	35,20	36,80	38,20	40,50	42,10	45,20	48,80	51,50	53,50	56,40	60,00	64,10
U_{real} [kV]	67,96	71,78	73,58	74,26	79,21	82,81	85,96	91,13	94,73	101,71	109,81	115,88	120,38	126,91	135,01	144,24

Tab. 5.2 Zkoušky více hladinami pro otevřenou nádobu s bariérou $\Delta t < 10s$

p=96,7kPa, t=25,6°C (v tabulce uváděné U_{real} je zkorigované na $p_0=101,3kPa$ a $t_0=20°C$)											
Δt [s]	<10										
počet přeskoků / počet pokusů	0/15	0/15	0/15	0/15	4/15	0/15	3/15	6/15	8/15	12/15	
$U_{zmeřené}$ [V]	47,2	50,7	52,9	54,2	58,2	60,4	62,5	63,6	66,3	69,1	
U_{real} [kV]	106,2	114,0	118,8	121,7	130,5	135,4	140,0	142,5	148,4	154,6	
$U_{zmeřené}$ [V]	47,2	50,2	52,8	55,2	58,2	60,6	62,0	64,1	66,2	69,0	
U_{real} [kV]	106,2	112,9	118,6	123,9	130,5	135,8	138,9	143,6	148,2	154,4	
$U_{zmeřené}$ [V]	47,2	50,4	52,7	54,4	58,7	60,5	62,3	63,6	66,4	68,9	
U_{real} [kV]	106,2	113,3	118,4	122,1	131,6	135,6	139,6	142,5	148,6	154,2	
$U_{zmeřené}$ [V]	47,2	50,4	53,0	54,6	58,3	60,1	62,1	64,1	66,2	68,9	
U_{real} [kV]	106,2	113,3	119,0	122,6	130,8	134,7	139,1	143,6	148,2	154,2	
$U_{zmeřené}$ [V]	47,2	50,1	53,0	55,6	58,4	60,3	62,3	64,2	65,8	69,6	
U_{real} [kV]	106,2	112,6	119,0	124,8	131,0	135,2	139,6	143,8	147,3	155,7	
$U_{zmeřené}$ [V]	47,2	50,3	52,8	55,0	58,6	60,0	61,8	64,0	65,5	69,0	
U_{real} [kV]	106,2	113,1	118,6	123,5	130,5	135,8	139,8	142,9	147,8	156,2	
$U_{zmeřené}$ [V]	47,2	50,2	52,8	55,3	58,0	60,2	62,1	64,0	66,4	69,6	
U_{real} [kV]	106,2	112,9	118,6	124,1	130,1	134,9	139,1	143,3	148,6	155,7	
$U_{zmeřené}$ [V]	47,2	50,3	53,0	54,8	58,0	60,3	62,0	64,3	66,1	69,5	
U_{real} [kV]	106,2	113,1	119,0	123,0	130,1	135,2	138,9	144,0	148,0	155,5	
$U_{zmeřené}$ [V]	47,2	50,4	53,1	55,4	58,2	60,6	62,4	63,9	65,9	69,2	
U_{real} [kV]	106,2	113,3	119,3	124,3	130,5	135,8	139,8	143,1	147,5	154,8	
$U_{zmeřené}$ [V]	47,8	50,5	53,1	54,7	58,3	60,6	62,5	64,1	66,1	69,1	
U_{real} [kV]	107,6	113,5	119,3	122,8	130,8	135,8	140,0	143,6	148,0	154,6	
$U_{zmeřené}$ [V]	47,1	50,5	52,7	55,1	58,1	60,3	62,5	64,0	66,1	69,5	
U_{real} [kV]	106,0	113,5	118,4	123,7	130,3	135,2	140,0	143,3	148,0	155,5	
$U_{zmeřené}$ [V]	47,4	50,3	53,0	55,7	57,9	60,7	62,5	63,9	66,0	69,5	
U_{real} [kV]	106,7	113,1	119,0	125,0	129,9	136,1	140,0	143,1	147,8	155,5	
$U_{zmeřené}$ [V]	47,3	50,6	52,4	55,1	58,2	59,9	62,2	64,1	66,1	69,7	
U_{real} [kV]	106,5	113,7	117,7	123,7	130,5	134,3	139,4	143,6	148,0	155,9	
$U_{zmeřené}$ [V]	47,8	50,1	52,7	55,0	58,4	60,5	62,5	63,6	66,0	69,3	
U_{real} [kV]	107,6	112,6	118,4	123,5	131,0	135,6	140,0	142,5	147,8	155,0	

Příloha 1

Tab. 5.3 Zkoušky více hladinami pro otevřenou nádobou s bariérou Δt=20s

p=96,9kPa, t=25,5°C (v tabulce uváděné U _{real} je zkorigované na p ₀ =101,3kPa a t ₀ =20°C)																			
Δt [s]	20																		
Počet přeskoků / počet pokusů	0/15	0/15	0/15	0/15	0/15	0/15	0/15	0/15	0/15	0/15	1/15	0/15	3/15	2/15	8/15	9/15	6/15	6/15	12/15
U _{změřené} [V]	41,00	42,90	44,30	45,50	46,70	48,30	49,60	51,50	53,10	54,70	56,30	58,20	59,90	62,10	64,90	66,00	68,20	70,90	73,20
U _{real} [kV]	92,32	96,50	99,59	102,23	104,88	108,40	111,27	115,45	118,98	122,50	126,03	130,22	133,96	138,81	144,98	147,40	152,25	158,20	163,27
U _{změřené} [V]	41,10	43,20	44,10	45,70	46,90	48,30	49,80	51,20	53,10	54,70	56,30	58,00	60,20	62,20	64,80	66,00	68,00	71,00	73,30
U _{real} [kV]	92,54	97,16	99,15	102,67	105,32	108,40	111,71	114,79	118,98	122,50	126,03	129,78	134,62	139,03	144,76	147,40	151,81	158,42	163,49
U _{změřené} [V]	41,10	43,20	44,10	45,30	46,90	48,30	49,80	51,40	53,00	54,80	56,00	58,00	60,20	62,00	64,70	66,20	68,20	71,30	73,40
U _{real} [kV]	92,54	97,16	99,15	101,79	105,32	108,40	111,71	115,23	118,76	122,72	125,37	129,78	134,62	138,59	144,54	148,51	152,25	159,08	163,71
U _{změřené} [V]	41,10	42,60	44,30	45,60	46,90	48,20	49,90	51,40	53,00	54,90	56,30	58,10	60,20	61,90	64,80	66,00	68,00	71,20	73,40
U _{real} [kV]	92,54	96,28	99,59	102,45	105,32	108,18	111,93	115,23	118,76	122,95	126,03	130,00	134,62	138,37	144,70	147,40	151,81	158,86	163,71
U _{změřené} [V]	41,00	42,90	44,10	45,40	47,00	48,40	49,70	51,30	53,00	54,60	56,50	58,20	60,20	62,10	65,00	66,10	68,10	71,30	73,50
U _{real} [kV]	92,32	96,50	99,15	102,01	105,54	108,62	111,49	115,01	118,76	122,28	126,47	130,22	134,62	138,81	145,20	147,62	152,03	159,08	163,93
U _{změřené} [V]	41,00	42,90	44,20	45,50	47,00	48,50	50,00	51,20	52,90	54,70	56,40	58,30	60,00	62,10	64,60	66,50	68,30	71,30	73,50
U _{real} [kV]	92,32	96,50	99,37	102,23	105,54	108,84	112,15	114,79	118,54	122,50	126,25	130,44	134,18	138,81	144,32	148,51	152,47	159,08	163,93
U _{změřené} [V]	41,00	42,80	43,90	45,30	47,00	48,40	50,00	51,40	53,00	54,90	56,20	58,30	60,20	62,10	65,10	66,40	68,10	71,30	73,60
U _{real} [kV]	92,32	96,28	98,71	101,79	105,54	108,62	112,15	115,45	118,98	122,95	125,81	130,44	134,62	138,81	145,42	148,29	152,03	159,08	164,15
U _{změřené} [V]	40,90	42,80	44,10	45,40	47,00	48,40	49,60	51,30	53,00	54,70	56,60	58,30	60,20	62,10	65,10	66,00	68,00	71,20	73,70
U _{real} [kV]	92,10	96,28	99,15	102,01	105,54	108,62	112,15	115,01	118,76	122,50	126,69	130,44	134,62	138,81	145,10	147,60	151,81	158,86	164,37
U _{změřené} [V]	40,80	42,90	44,50	45,50	47,00	48,20	50,00	51,40	53,10	54,70	56,40	58,30	60,20	62,10	65,00	66,00	68,00	71,30	73,50
U _{real} [kV]	91,88	96,50	100,03	102,23	105,54	108,18	112,15	115,23	118,98	122,50	126,25	130,44	134,62	138,81	145,20	147,40	151,81	159,08	163,93
U _{změřené} [V]	40,70	42,80	44,10	45,50	47,10	48,30	49,90	51,40	53,00	54,80	56,40	58,10	60,30	62,00	65,10	66,00	68,10	71,30	73,50
U _{real} [kV]	91,65	96,28	99,15	102,23	105,76	108,40	111,93	115,23	118,76	122,72	126,25	130,00	134,84	138,59	145,42	147,40	152,03	159,08	163,93
U _{změřené} [V]	40,90	42,90	44,20	45,50	46,90	48,50	50,00	51,50	53,10	54,80	56,30	58,30	60,00	62,00	64,70	66,10	68,10	71,40	73,50
U _{real} [kV]	92,10	96,50	99,37	102,23	105,32	108,84	112,15	115,45	118,98	122,72	126,03	130,44	134,18	138,59	144,54	147,62	152,03	159,30	163,93
U _{změřené} [V]	40,90	42,60	44,10	45,40	47,00	48,50	49,80	51,40	53,10	54,60	56,50	58,40	59,70	61,90	64,90	66,20	68,10	71,30	73,30
U _{real} [kV]	92,10	95,84	99,15	102,01	105,54	108,84	111,71	115,23	118,98	122,28	126,47	130,66	133,52	138,37	144,98	147,62	152,03	159,08	163,49
U _{změřené} [V]	40,80	42,70	44,00	45,40	47,00	48,50	49,50	51,50	53,10	54,70	56,40	58,40	60,00	62,00	65,10	66,00	68,20	71,20	73,40
U _{real} [kV]	91,88	96,06	98,93	102,01	105,54	108,84	111,05	115,45	118,98	122,50	126,25	130,66	134,18	138,59	145,42	147,40	152,25	158,86	163,71
U _{změřené} [V]	40,80	42,90	43,90	45,40	47,00	48,40	49,80	51,40	53,10	54,90	56,40	58,30	60,00	62,00	64,50	66,10	68,10	71,20	73,30
U _{real} [kV]	91,88	96,50	98,71	102,01	105,54	108,62	111,71	115,23	118,98	122,95	126,25	130,44	134,18	138,59	144,30	147,62	152,03	158,86	163,49
U _{změřené} [V]	40,80	42,80	44,10	45,40	46,80	48,60	49,70	51,40	53,20	54,70	56,50	58,40	60,00	61,90	65,10	66,00	68,20	71,30	73,70
U _{real} [kV]	91,88	96,28	99,15	102,01	105,10	109,06	111,49	115,23	119,20	122,50	126,47	130,66	134,18	138,37	145,42	147,40	152,25	159,08	164,37

Tab. 5.4 Zkoušky více hladinami pro otevřenou nádobou s bariérou Δt=60s

p=97,33kPa, t=26,1°C (v tabulce uváděné U _{real} je zkorigované na p ₀ =101,3kPa a t ₀ =20°C)																
Δt [s]	60															
počet přeskoků / počet pokusů	0/15	0/15	0/15	0/15	0/15	6/15	3/15	2/15	4/15	3/15	7/15	8/15	10/15	9/15	10/15	12/15
U _{změřené} [V]	46,80	48,60	51,00	53,60	56,20	58,60	61,40	64,40	66,70	69,70	72,30	74,00	75,00	75,40	78,40	79,50
U _{real} [kV]	104,84	108,80	114,07	119,79	125,51	130,78	136,94	143,53	148,59	155,18	160,90	164,63	166,83	167,71	174,31	176,72
U _{změřené} [V]	46,50	48,70	51,00	53,50	56,20	58,70	61,40	64,10	66,90	69,60	72,10	74,00	75,30	76,70	78,50	79,30
U _{real} [kV]	104,18	109,02	114,07	119,57	125,51	131,00	136,94	142,87	149,03	154,96	160,46	164,63	167,49	167,71	174,53	176,28
U _{změřené} [V]	46,40	48,60	51,00	53,50	56,40	58,90	61,60	64,20	66,80	69,60	72,40	74,10	75,00	75,20	78,40	79,30
U _{real} [kV]	103,96	108,80	114,07	119,57	125,95	131,44	137,38	143,09	148,81	154,96	161,12	164,85	166,83	167,27	174,31	176,28
U _{změřené} [V]	46,30	48,70	50,90	53,60	56,40	58,90	61,60	64,20	66,90	69,90	72,20	74,20	75,00	75,10	78,30	79,40
U _{real} [kV]	103,74	109,02	113,86	119,79	125,95	131,44	137,38	143,09	149,03	155,62	160,68	165,07	166,83	167,05	174,09	176,50
U _{změřené} [V]	46,40	48,70	51,10	53,50	56,40	58,90	61,60	64,20	66,90	69,80	72,30	74,00	75,30	75,30	78,50	79,50
U _{real} [kV]	103,96	109,02	114,29	119,57	125,95	131,44	137,38	143,09	149,03	155,40	160,90	164,63	167,49	167,49	174,53	176,72
U _{změřené} [V]	46,50	48,60	50,90	53,70	56,40	58,70	61,70	64,10	67,30	70,00	72,10	74,20	75,00	75,20	78,50	79,30
U _{real} [kV]	104,18	108,80	113,86	120,01	125,95	131,00	137,60	142,87	149,91	155,84	160,46	165,07	166,83	167,27	174,53	176,28
U _{změřené} [V]	46,50	48,60	51,00	53,70	56,30	58,90	61,70	64,40	67,20	70,00	72,40	74,50	74,80	75,20	78,20	79,40
U _{real} [kV]	104,18	108,80	114,07	120,01	125,73	131,44	137,60	143,53	149,69	155,84	161,12	165,73	166,39	167,27	173,87	176,50
U _{změřené} [V]	46,50	48,60	51,00	53,80	56,40	58,90	61,40	64,50	67,20	69,70	72,40	74,00	75,20	75,70	78,60	79,30
U _{real} [kV]	104,18	108,80	114,07	120,23	125,95	131,44	136,94	143,75	149,69	155,18	161,12	164,63	167,27	168,37	174,75	176,28
U _{změřené} [V]	46,40	48,70	51,00	53,70	56,40	58,60	61,80	64,50	67,30	70,00	72,40	74,00	74,90	75,20	78,70	79,20
U _{real} [kV]	103,96	109,02	114,07	120,01	125,95	130,78	137,82	143,75	149,91	155,84	161,12	164,63	166,61	167,27	174,97	176,06
U _{změřené} [V]	46,40	48,60	51,10	53,70	56,50	58,60	61,70	64,50	67,30	69,90	72,30	74,00	74,90	75,20	78,40	79,20
U _{real} [kV]	103,96	108,80	114,29	120,01	126,17	130,78	137,60	143,75	149,91	155,62	160,90	164,63	166,61	167,27	174,31	176,06
U _{změřené} [V]	46,50	48,70	51,10	53,50												

Příloha 1

Tab. 5.5 Zkoušky více hladinami pro uzavřenou nádobu (p=1bar) bez bariéry Δt=20s

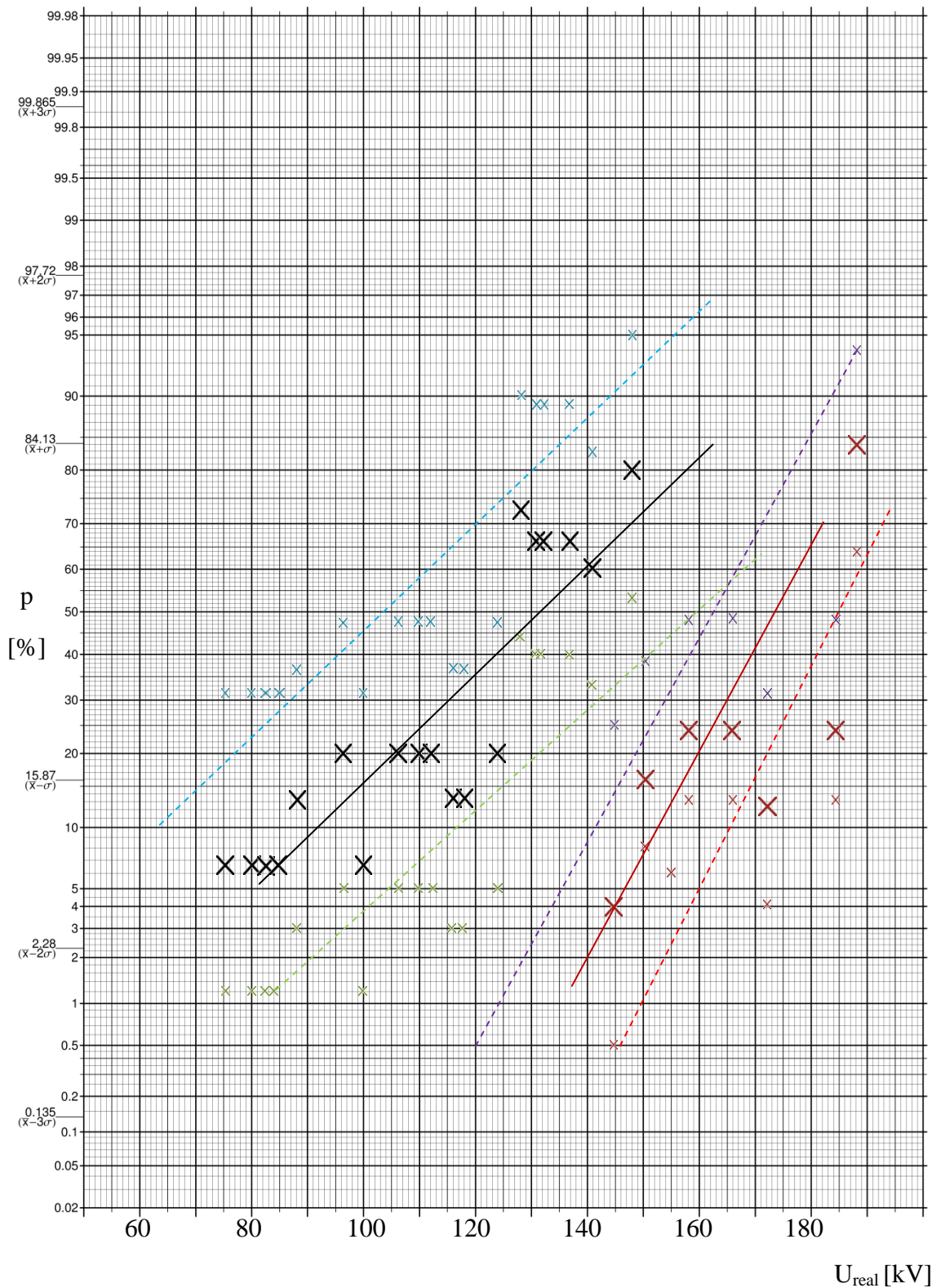
p=97,21kPa, t=26,6°C (v tabulce uváděné U _{real} je zkorigované na p ₀ =101,3kPa a t ₀ =20°C)																							
Δt [s]	20																						
počet přeskoků / počet pokusů	0/15	0/15	1/15	1/15	1/15	1/15	2/15	0/15	3/15	1/15	3/15	3/15	9/15	1/15	2/15	2/15	3/15	11/15	10/15	10/15	10/15	9/15	12/15
U _{změřené} [kV]	29,10	32,40	34,00	35,90	37,20	38,20	39,70	41,80	43,40	45,00	47,80	49,30	50,10	50,10	52,00	53,30	56,10	57,50	59,00	59,80	61,80	63,70	66,70
U _{real} [kV]	65,12	72,50	76,08	80,33	83,24	85,48	88,83	93,53	97,11	100,69	106,96	110,32	112,11	112,11	116,36	119,27	125,53	128,66	132,02	133,81	138,29	142,54	149,25
U _{změřené} [kV]	29,10	32,30	34,00	36,00	37,20	38,10	39,40	41,70	43,30	45,10	47,90	49,30	50,20	50,10	52,10	53,40	55,90	57,70	58,80	59,70	61,70	63,70	66,60
U _{real} [kV]	65,12	72,28	76,08	80,56	83,24	85,25	88,16	93,31	96,89	100,92	107,18	110,32	112,33	112,11	116,58	119,49	125,08	129,11	131,57	133,59	138,06	142,54	149,03
U _{změřené} [kV]	29,10	32,30	34,00	36,00	37,30	38,30	39,30	41,90	43,30	44,90	47,60	49,20	50,50	50,00	52,10	53,50	55,90	57,80	58,90	59,70	61,60	63,80	67,00
U _{real} [kV]	65,12	72,28	76,08	80,56	83,46	85,70	87,94	93,76	96,89	100,47	106,51	110,09	113,00	111,88	116,58	119,71	125,08	129,34	131,80	133,59	137,84	142,76	149,92
U _{změřené} [kV]	29,10	32,20	33,80	35,70	37,20	38,20	39,50	41,90	43,20	44,90	47,90	49,30	50,20	50,10	52,00	53,30	55,80	57,20	59,00	59,70	61,60	63,80	67,00
U _{real} [kV]	65,12	72,05	75,63	79,88	83,24	85,48	88,39	93,76	96,67	100,47	107,18	110,32	112,33	112,11	116,36	119,27	124,86	127,99	132,02	133,59	137,84	142,76	149,92
U _{změřené} [kV]	29,20	32,10	33,80	36,00	37,20	38,30	39,40	42,00	43,30	44,90	47,60	49,20	50,20	50,10	51,90	53,40	55,70	57,50	59,00	59,80	61,60	63,80	67,00
U _{real} [kV]	65,34	71,83	75,63	80,56	83,24	85,70	88,16	93,98	96,89	100,47	106,51	110,09	112,33	112,11	116,13	119,49	124,64	128,66	132,02	133,81	137,84	142,76	149,92
U _{změřené} [kV]	29,10	32,40	33,90	35,80	37,20	38,10	39,40	42,00	43,20	44,80	47,60	49,10	50,30	50,10	51,90	53,30	55,80	57,50	59,10	59,60	61,50	63,80	66,30
U _{real} [kV]	65,12	72,50	75,86	80,11	83,24	85,25	88,16	93,98	96,67	100,25	106,51	109,87	112,55	112,11	116,13	119,27	124,86	128,66	132,25	133,36	137,62	142,76	148,36
U _{změřené} [kV]	29,10	32,20	33,90	36,00	37,00	38,10	39,30	41,90	43,20	45,00	47,70	49,20	50,10	50,00	51,90	53,50	55,90	57,40	59,70	59,80	61,30	63,60	66,60
U _{real} [kV]	65,12	72,05	75,86	80,56	82,79	85,25	87,94	93,76	96,67	100,69	106,74	110,09	112,11	111,88	116,13	119,71	125,08	128,44	133,59	133,81	137,17	142,31	149,03
U _{změřené} [kV]	29,20	32,20	33,90	35,90	37,10	38,50	39,40	41,80	43,20	45,00	47,80	49,10	50,30	50,10	52,20	53,30	55,90	57,40	59,10	59,90	61,50	63,70	66,60
U _{real} [kV]	65,34	72,05	75,86	80,33	83,02	86,15	88,16	93,53	96,67	100,69	106,96	109,87	112,55	112,11	116,81	119,27	125,08	128,44	132,25	134,04	137,62	142,54	149,03
U _{změřené} [kV]	29,00	32,20	33,80	35,90	37,20	38,30	39,40	41,90	43,20	44,90	47,70	49,10	50,00	50,10	52,10	53,30	55,90	57,40	58,70	60,00	61,10	63,80	66,10
U _{real} [kV]	64,89	72,05	75,63	80,33	83,24	85,70	88,16	93,76	96,67	100,47	106,74	109,87	111,88	112,11	116,58	119,27	125,08	128,44	131,35	134,26	136,72	142,76	147,91
U _{změřené} [kV]	29,00	32,30	33,90	35,70	37,20	38,30	39,20	41,90	43,30	44,90	47,70	49,10	50,30	50,30	52,20	53,40	55,90	57,50	58,90	59,90	61,60	63,70	66,60
U _{real} [kV]	64,89	72,28	75,86	79,88	83,24	85,70	87,72	93,76	96,89	100,47	106,74	109,87	112,55	112,55	116,81	119,49	125,08	128,66	131,80	134,04	137,84	142,54	149,03
U _{změřené} [kV]	29,00	32,30	33,90	35,90	37,10	38,20	39,40	41,90	43,20	45,00	47,70	49,30	50,10	50,20	52,00	53,30	55,90	57,70	59,40	59,80	61,80	63,70	66,60
U _{real} [kV]	64,89	72,28	75,86	80,33	83,02	85,48	88,16	93,76	96,67	100,69	106,74	110,32	112,11	112,33	116,36	119,27	125,08	129,11	132,92	133,81	138,29	142,54	149,03
U _{změřené} [kV]	29,00	32,30	33,90	35,90	37,20	38,20	39,30	41,80	43,20	45,00	47,50	49,10	50,30	50,00	51,90	53,50	55,80	57,40	59,10	59,90	61,70	63,90	66,50
U _{real} [kV]	64,89	72,28	75,86	80,33	83,24	85,48	87,94	93,53	96,67	100,69	106,29	109,87	112,55	111,88	116,13	119,71	124,86	128,44	132,25	134,04	138,06	142,99	148,80
U _{změřené} [kV]	29,00	32,30	33,90	35,90	37,10	38,20	39,30	41,70	43,20	44,90	47,70	49,10	50,40	50,20	52,20	53,40	55,70	57,50	59,40	60,30	61,70	63,60	66,80
U _{real} [kV]	64,89	72,28	75,86	80,33	83,02	85,48	87,94	93,31	96,67	100,47	106,74	109,87	112,78	112,33	116,81	119,49	124,64	128,66	132,92	134,93	138,06	142,31	149,47
U _{změřené} [kV]	29,00	32,30	33,90	35,80	37,10	38,40	39,30	41,90	43,20	45,00	47,70	49,10	50,10	49,90	52,00	53,30	55,70	57,40	59,70	60,20	61,80	63,60	66,50
U _{real} [kV]	64,89	72,28	75,86	80,11	83,02	85,93	87,94	93,76	96,67	100,69	106,74	109,87	112,11	111,66	116,36	119,27	124,64	128,44	133,59	134,71	138,29	142,31	148,80
U _{změřené} [kV]	29,00	32,40	33,90	35,80	37,30	38,20	39,30	41,90	43,30	44,90	47,90	49,10	50,00	50,10	52,00	53,30	55,80	57,90	59,30	60,40	61,50	63,50	66,50
U _{real} [kV]	64,89	72,50	75,86	80,11	83,46	85,48	87,94	93,76	96,89	100,47	107,18	109,87	111,88	112,11	116,36	119,27	124,86	129,56	132,69	135,15	137,62	142,09	148,80

Příloha 1

Tab. 5.6 Zkoušky více hladinami pro uzavřenou nádobu (p=1bar) s bariérou $\Delta t=20s$

p= 96,4kPa, t=26,7°C (v tabulce uváděné U_{real} je zkorigované na $p_0=101,3kPa$ a $t_0=20°C$)									
Δt [s]	20								
Počet přeskoků / počet pokusů	0/25	0/25	1/25	4/25	6/25	6/25	3/25	6/25	21/25
$U_{zmeřené}$ [V]	57,80	59,90	64,00	66,50	70,00	73,60	76,30	81,40	83,70
U_{real} [kV]	130,47	135,21	144,46	150,10	158,00	166,13	172,22	183,74	188,93
$U_{zmeřené}$ [V]	57,80	60,00	64,50	66,40	70,00	73,40	76,80	82,10	83,60
U_{real} [kV]	130,47	135,43	145,59	149,88	158,00	165,68	173,35	185,32	188,70
$U_{zmeřené}$ [V]	57,50	59,70	63,90	66,50	70,50	73,60	76,30	81,80	83,80
U_{real} [kV]	129,79	134,76	144,24	150,10	159,13	166,13	172,22	184,64	189,15
$U_{zmeřené}$ [V]	57,80	59,90	63,80	66,90	69,70	73,40	76,00	82,20	83,80
U_{real} [kV]	130,47	135,21	144,01	151,01	157,33	165,68	171,55	185,54	189,15
$U_{zmeřené}$ [V]	57,10	60,10	64,10	66,70	69,90	73,60	76,60	82,10	83,60
U_{real} [kV]	128,89	135,66	144,69	150,56	157,78	166,13	172,90	185,32	188,70
$U_{zmeřené}$ [V]	57,40	59,40	63,90	66,60	69,80	73,50	76,30	81,60	83,90
U_{real} [kV]	129,56	134,08	144,24	150,33	157,55	165,90	172,22	184,19	189,38
$U_{zmeřené}$ [V]	57,30	60,10	64,20	66,80	70,00	73,60	76,00	81,90	83,90
U_{real} [kV]	129,34	135,66	144,91	150,78	158,00	166,13	171,55	184,87	189,38
$U_{zmeřené}$ [V]	57,10	60,10	64,00	66,90	70,20	73,20	76,40	82,00	84,00
U_{real} [kV]	128,89	135,66	144,46	151,01	158,46	165,23	172,45	185,09	189,61
$U_{zmeřené}$ [V]	57,40	60,00	64,20	66,60	69,60	73,70	76,60	81,70	84,10
U_{real} [kV]	129,56	135,43	144,91	150,33	157,10	166,36	172,90	184,41	189,83
$U_{zmeřené}$ [V]	57,40	59,80	64,00	66,70	70,20	73,60	75,60	82,00	84,10
U_{real} [kV]	129,56	134,98	144,46	150,56	158,46	166,13	170,64	185,09	189,83
$U_{zmeřené}$ [V]	57,40	60,10	64,20	67,00	70,80	73,10	76,60	81,40	83,90
U_{real} [kV]	129,56	135,66	144,91	151,23	159,81	165,00	172,90	183,74	189,38
$U_{zmeřené}$ [V]	57,40	59,90	63,70	66,40	70,00	73,30	76,50	81,80	83,20
U_{real} [kV]	129,56	135,21	143,78	149,88	158,00	165,45	172,68	184,64	187,80
$U_{zmeřené}$ [V]	57,20	60,00	64,30	66,70	70,40	73,50	76,20	82,00	83,50
U_{real} [kV]	129,11	135,43	145,14	150,56	158,91	165,90	172,00	185,09	188,48
$U_{zmeřené}$ [V]	57,20	60,00	63,70	66,90	70,40	73,40	76,80	81,80	83,20
U_{real} [kV]	129,11	135,43	143,78	151,01	158,91	165,68	173,35	184,64	187,80
$U_{zmeřené}$ [V]	57,20	59,90	64,30	66,90	70,30	73,50	76,40	81,50	83,10
U_{real} [kV]	129,11	135,21	145,14	151,01	158,68	165,90	172,45	183,96	187,57
$U_{zmeřené}$ [V]	57,20	60,00	63,90	67,10	70,10	73,60	75,90	81,80	83,00
U_{real} [kV]	129,11	135,43	144,24	151,46	158,23	166,13	171,32	184,64	187,35
$U_{zmeřené}$ [V]	57,10	60,20	64,20	66,80	69,90	73,90	76,90	81,90	83,50
U_{real} [kV]	128,89	135,88	144,91	150,78	157,78	166,81	173,58	184,87	188,48
$U_{zmeřené}$ [V]	57,30	59,50	64,30	66,80	70,00	73,60	76,60	81,50	83,10
U_{real} [kV]	129,34	134,30	145,14	150,78	158,00	166,13	172,90	183,96	187,57
$U_{zmeřené}$ [V]	57,30	60,20	64,20	66,80	70,40	73,50	76,50	81,70	83,20
U_{real} [kV]	129,34	135,88	144,91	150,78	158,91	165,90	172,68	184,41	187,80
$U_{zmeřené}$ [V]	57,40	60,10	64,20	66,90	69,50	73,30	76,40	81,40	83,90
U_{real} [kV]	129,56	135,66	144,91	151,01	156,88	165,45	172,45	183,74	189,38
$U_{zmeřené}$ [V]	57,20	59,80	64,20	66,90	70,80	73,60	76,70	81,70	83,00
U_{real} [kV]	129,11	134,98	144,91	151,01	159,81	166,13	173,13	184,41	187,35
$U_{zmeřené}$ [V]	57,10	60,10	63,70	67,20	69,30	73,60	75,90	81,90	83,90
U_{real} [kV]	128,89	135,66	143,78	151,68	156,42	166,13	171,32	184,87	189,38
$U_{zmeřené}$ [V]	57,10	59,80	64,20	66,80	69,40	73,40	76,80	81,80	83,70
U_{real} [kV]	128,89	134,98	144,91	150,78	156,65	165,68	173,35	184,64	188,93
$U_{zmeřené}$ [V]	57,20	60,10	64,60	66,60	70,20	73,50	76,60	81,70	83,30
U_{real} [kV]	129,11	135,66	145,82	150,33	158,46	165,90	172,90	184,41	188,03
$U_{zmeřené}$ [V]	57,20	60,10	63,90	67,30	70,10	73,40	76,30	81,80	83,40
U_{real} [kV]	129,11	135,66	144,24	151,91	158,23	165,68	172,22	184,64	188,25

Příloha 1

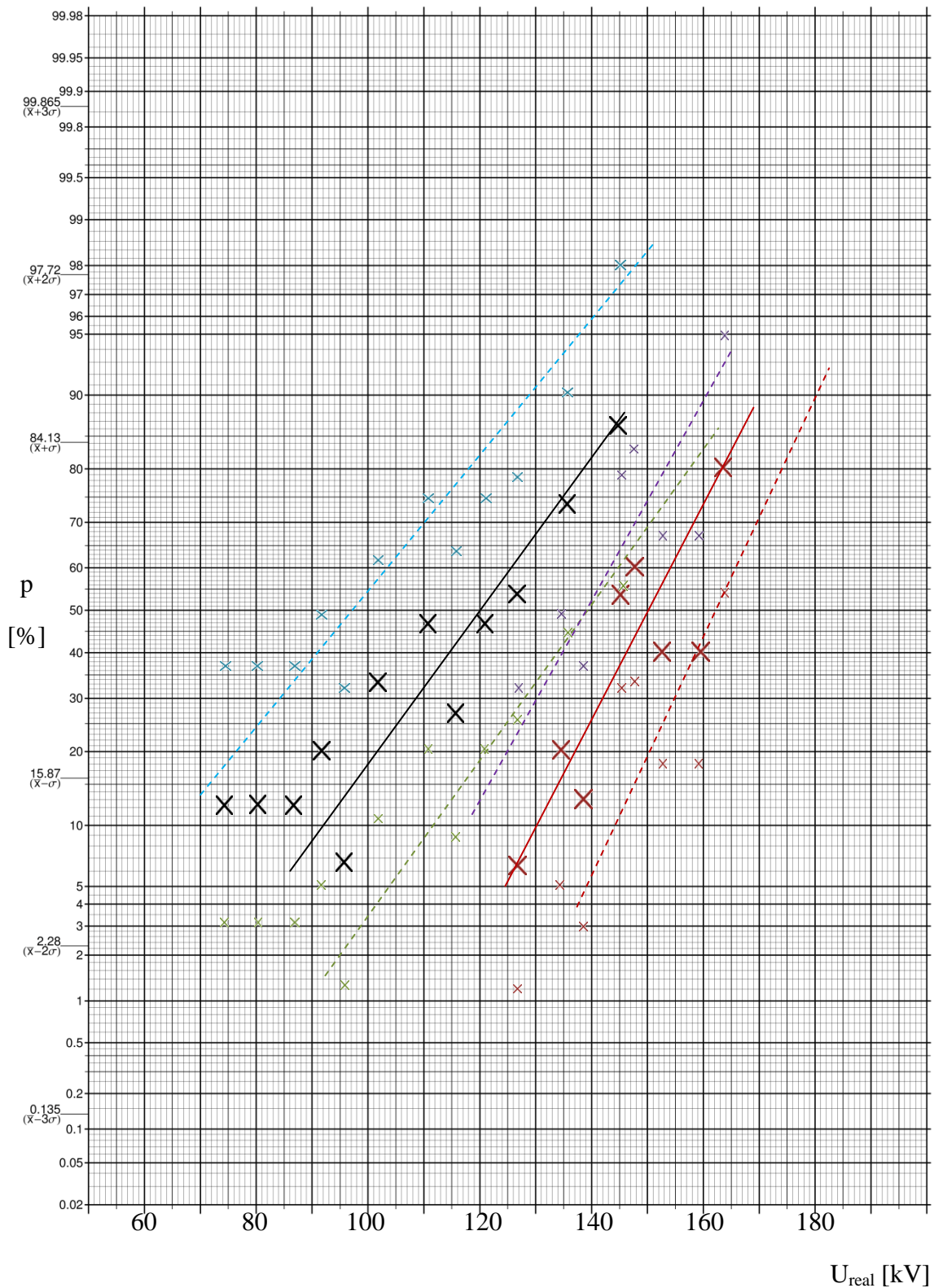


× zavřená nádoba bez bariéry (× horní mez ; × dolní mez)

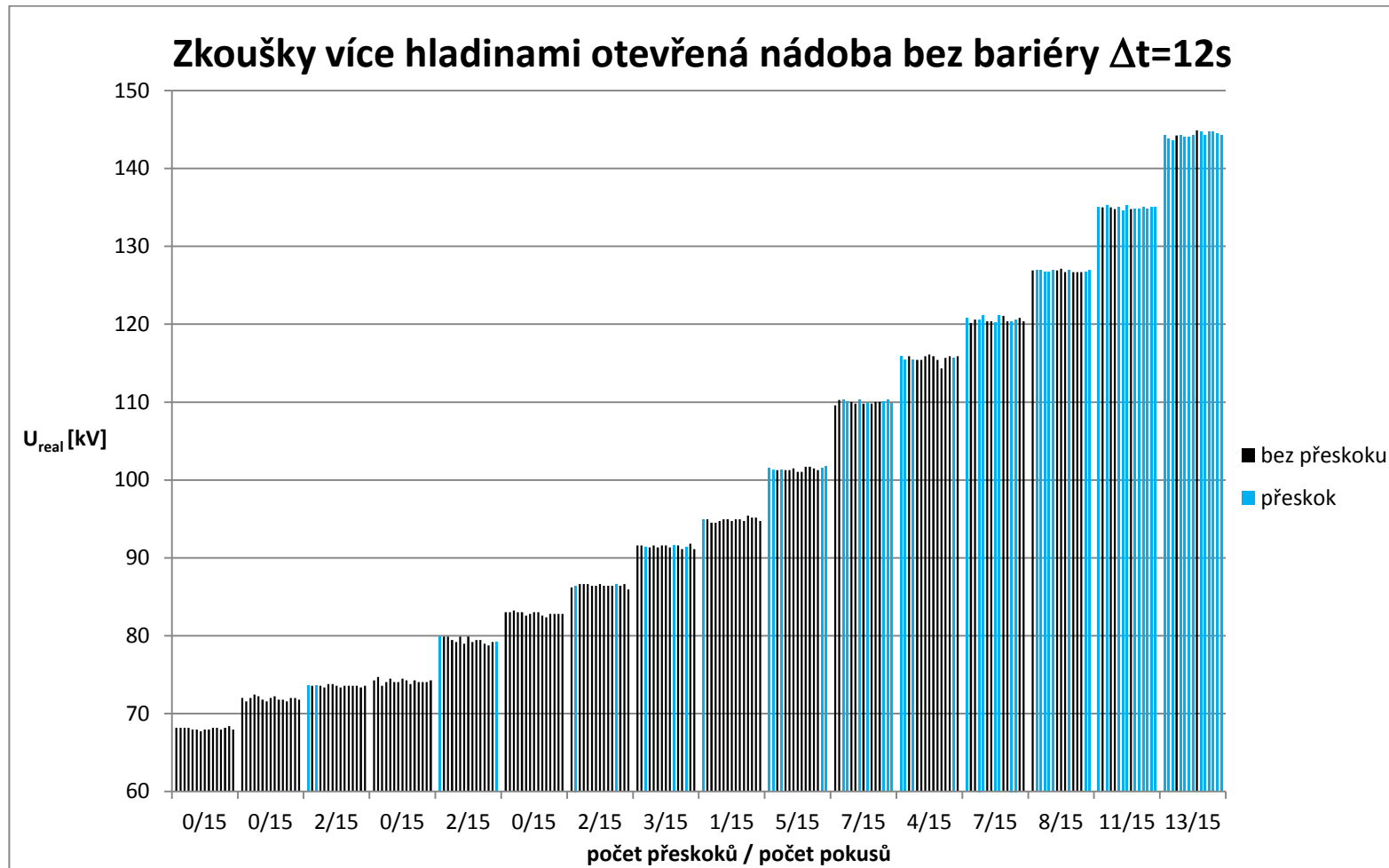
× zavřená nádoba s bariérou (× horní mez ; × dolní mez)

Obr. 5.1 Pravděpodobnost přeskočení v uzavřené nádobě bez a s bariérou

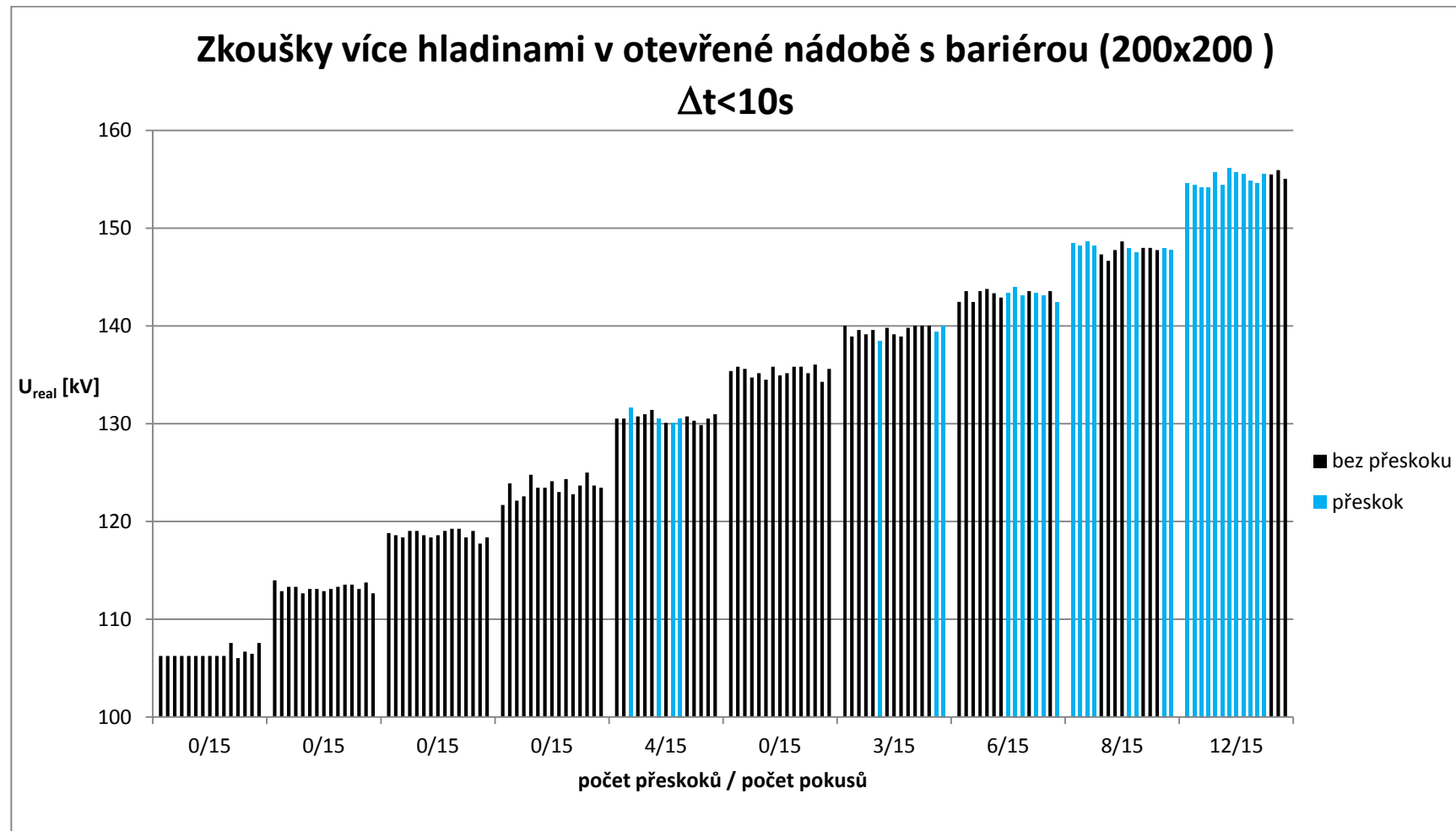
Příloha 1



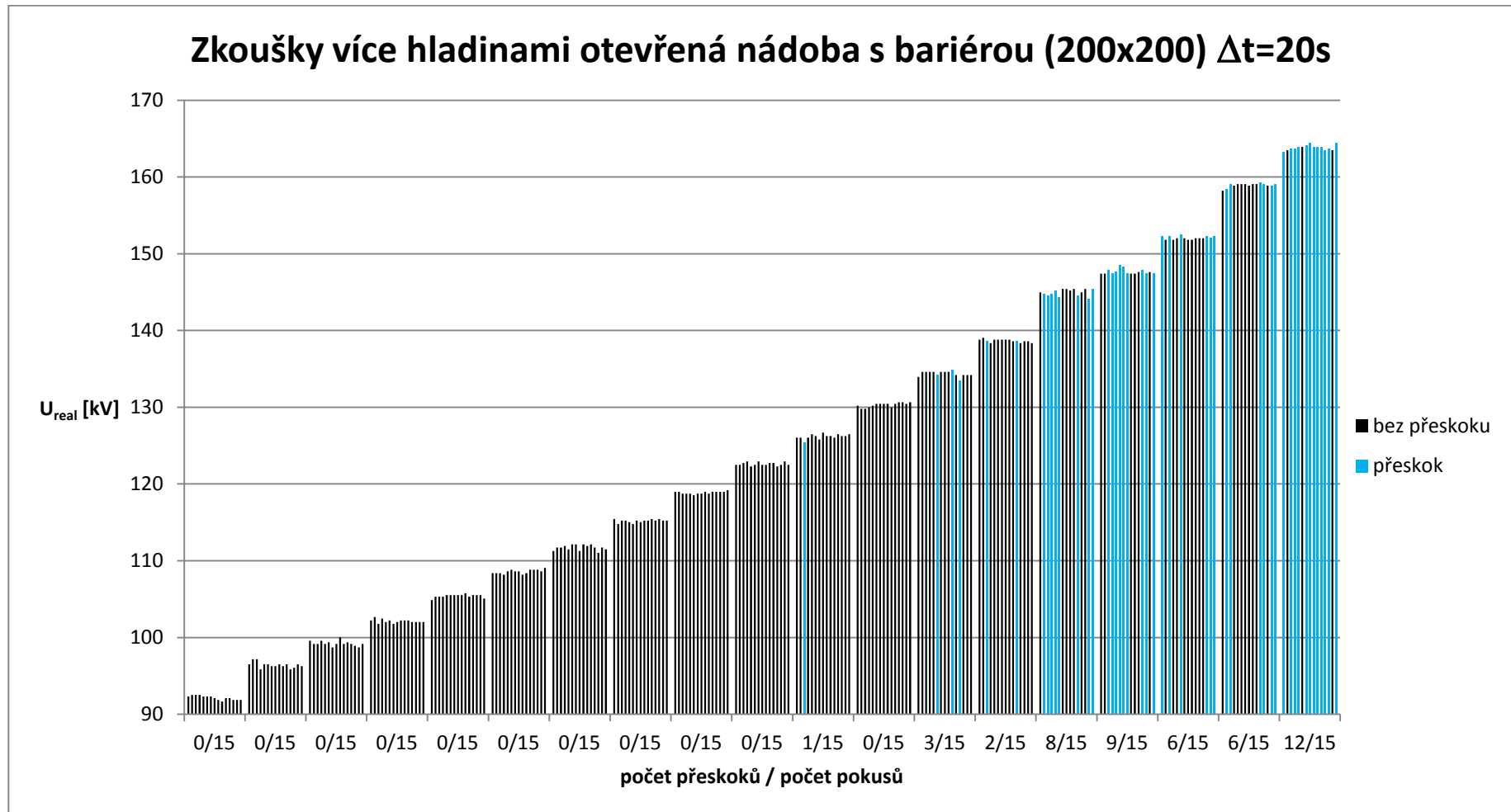
Obr. 5.2 Pravděpodobnost přeskočů v otevřené nádobě bez a s bariérou



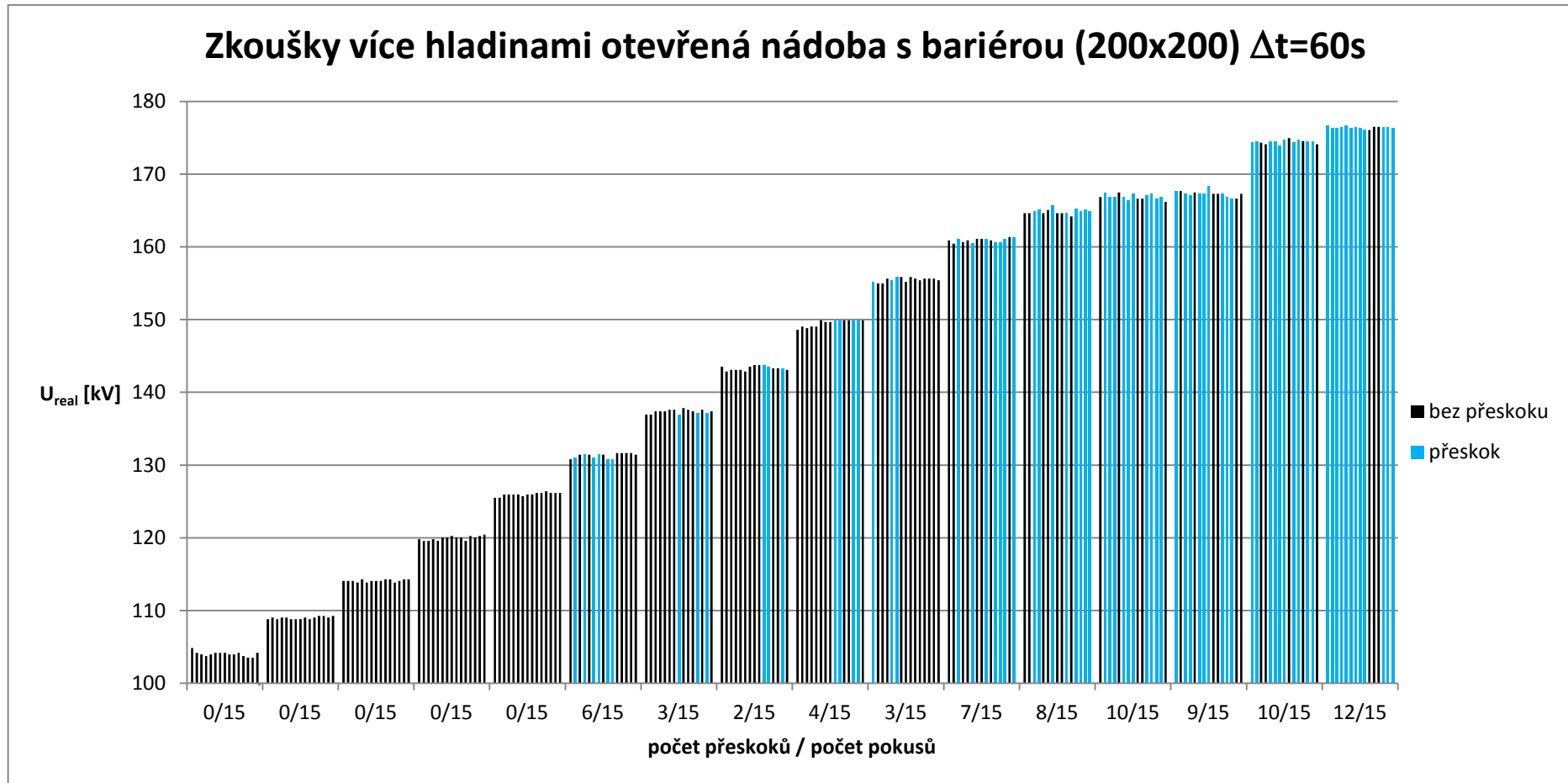
Obr. 5.3 Zkoušky více hladinami pro otevřenou nádobu bez bariéry $\Delta t=20s$



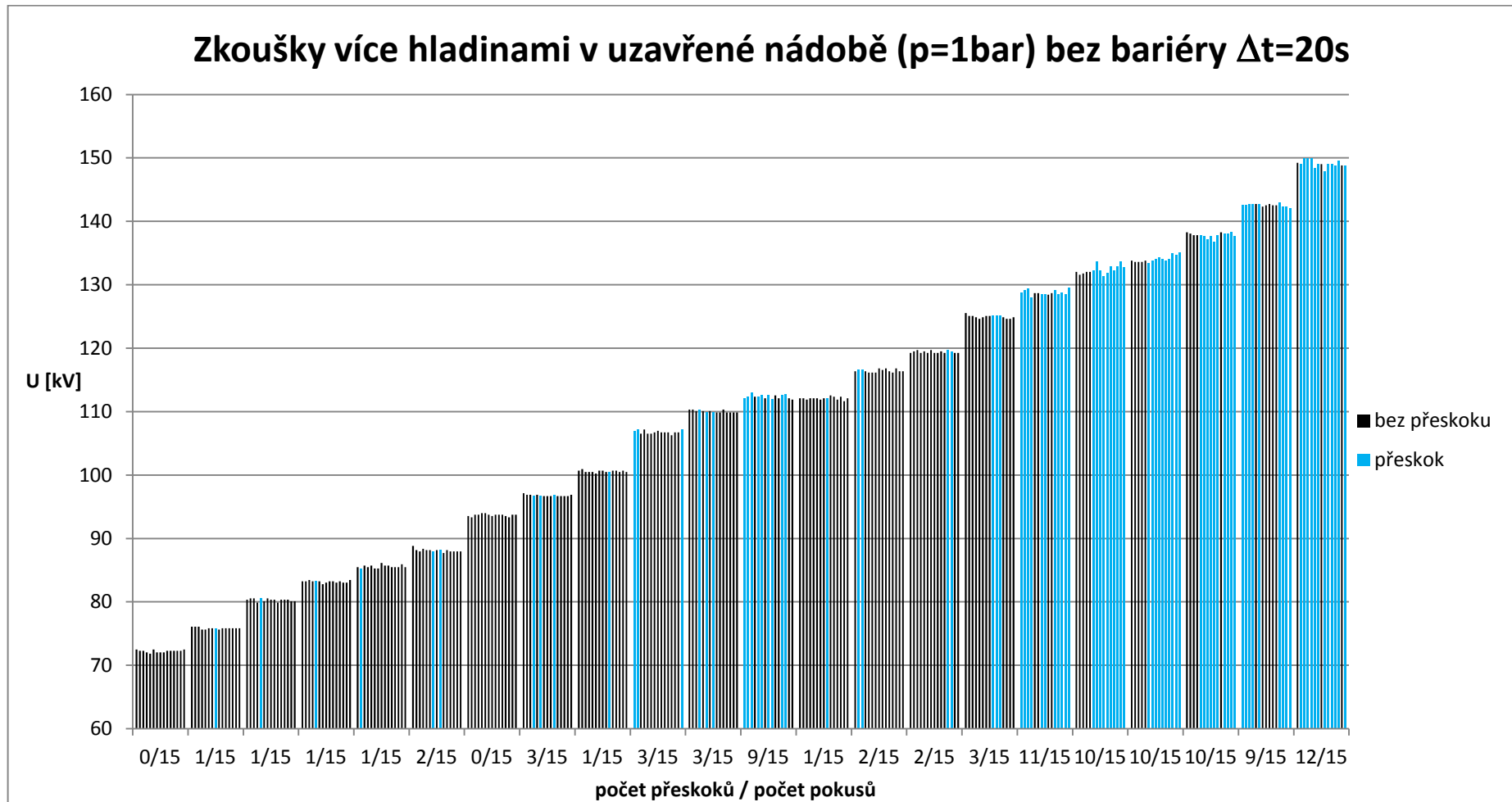
Obr. 5.4 Zkoušky více hladinami pro otevřenou nádobu s bariérou $\Delta t < 10s$



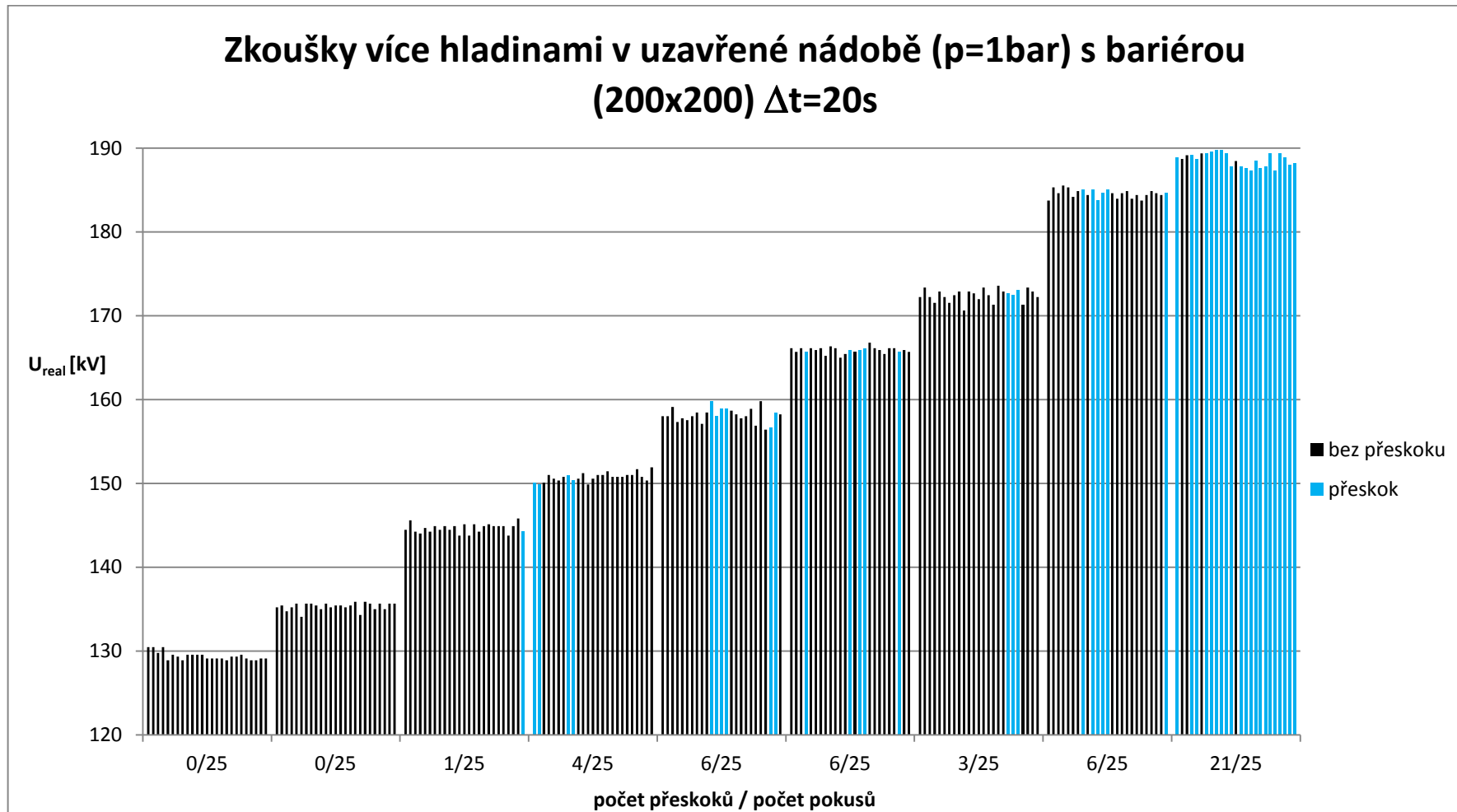
Obr. 5.5 Zkoušky více hladinami pro otevřenou nádobu s bariérou $\Delta t=20s$



Obr. 5.6 Zkoušky více hladinami pro otevřenou nádobu s bariérou $\Delta t=60s$



Obr. 5.7 Zkoušky více hladinami pro uzavřenou nádobu bez bariéry $\Delta t=20\text{s}$



Obr. 5.8 Zkoušky více hladinami pro uzavřenou nádobu s bariérou $\Delta t=20\text{s}$

Příloha 2

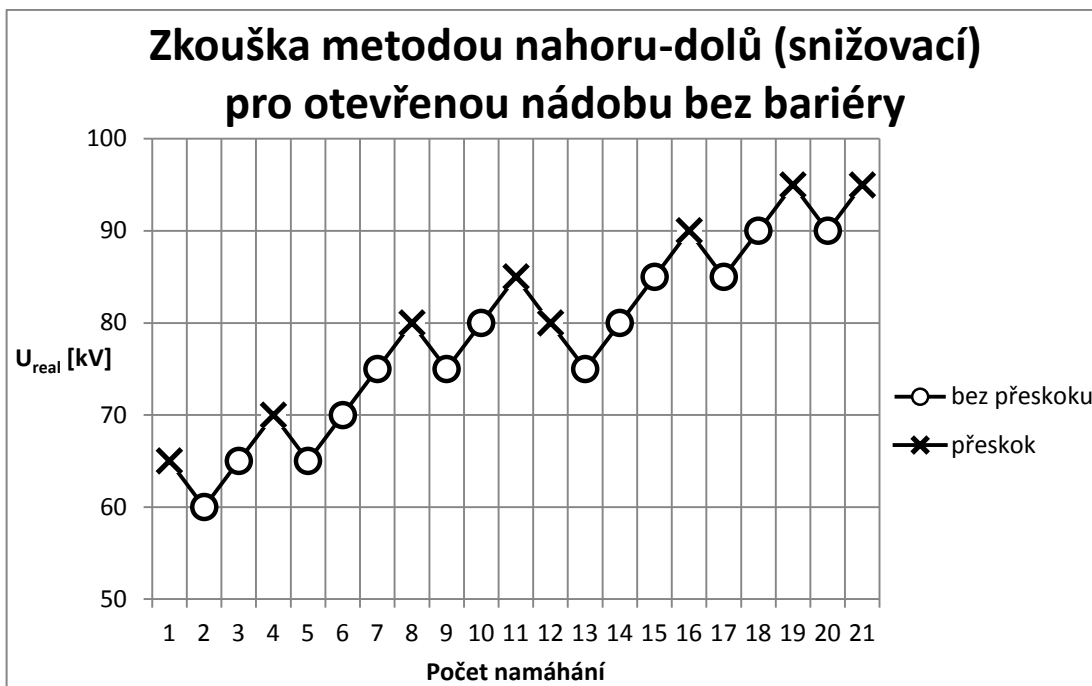
Příloha 2

Tab. 5.7 Zkouška metodou nahoru-dolů (snižovací) pro otevřenou nádobu bez bariéry

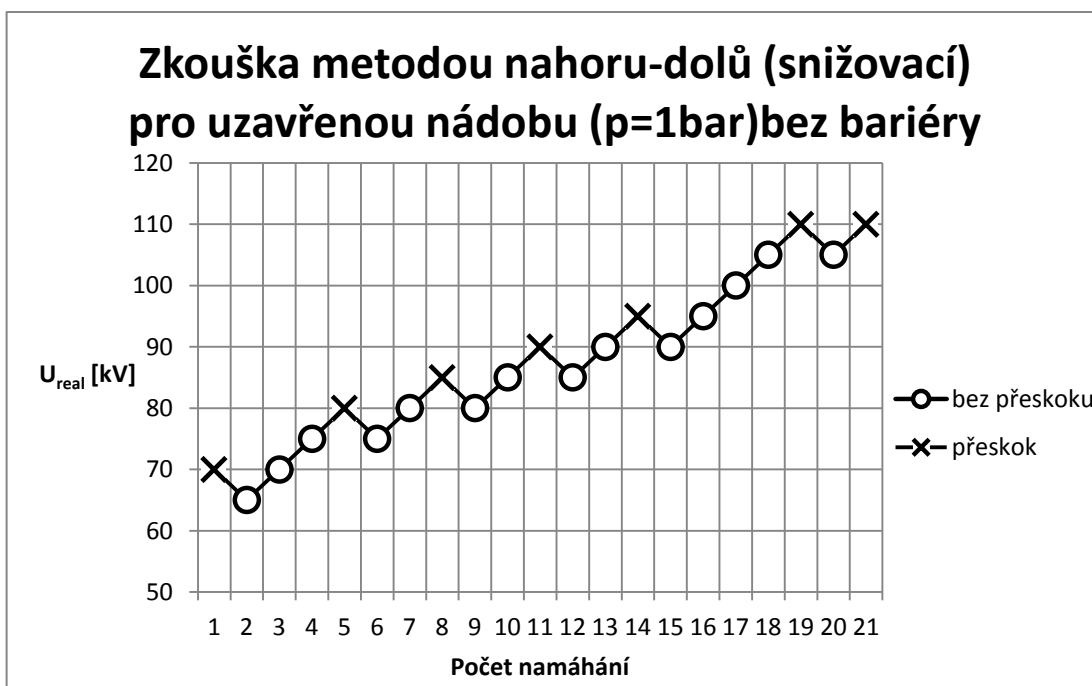
p= 96,5kPa, t=27,1°C (v tabulce uváděné U _{ref} je zkorigované na p ₀ =101,3kPa a t ₀ =20°C)																									
počet namáhání na skupinu	napětí přijatých skupin	U _{ref} [kV]	U _{naobjekt} [V]	U _{vrcholové} [kV]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0	60	21	27																					
3	195	65	22,8	29,3	x	0																			
2	140	70	24,5	30,9			0		0																
3	225	75	26,3	33,2				x		0															
4	320	80	28	35,4																					
3	255	85	29,8	37,7								x		0		x		0							
3	270	90	31,5	39,8											x			0		0				0	
2	190	95	33,3	41,8															x			0		x	0
p _{10%} = 79,75																									

Tab. 5.8 Zkouška metodou nahoru-dolů (snižovací) pro zavřenou nádobu bez bariéry

p= 96,5kPa, t=27,1°C (v tabulce uváděné U _{ref} je zkorigované na p ₀ =101,3kPa a t ₀ =20°C)																									
počet namáhání na skupinu	napětí přijatých skupin	U _{ref} [kV]	U _{naobjekt} [V]	U _{vrcholové} [V]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0	65	22,8	29,4																					
2	140	70	24,5	31,1	x	0																			
2	150	75	26,3	33,6			0																		
3	240	80	28	35,5					x		0														
3	255	85	29,8	37,5								x		0											
3	270	90	31,5	39,7											x		0		0						
2	190	95	33,3	41,8														x		0					
1	0	100	35	43,6																0					
2	210	105	36,8	45,9																	0			0	
2	220	110	38,5	48,1																			x		x
p _{10%} = 66,53																									



Obr. 5.9 Zkouška metodou nahoru-dolů (snižovací) pro otevřenou nádobu bez bariéry



Obr. 5.10 Zkouška metodou nahoru-dolů (snižovací) pro uzavřenou nádobu (p=1bar) bez bariéry

Příloha 3

Příloha 3

Tab. 5.9 Zkoušky postupným namáháním pro otevřenou nádobu bez bariéry $\Delta t=30s$

p= 96kPa, t=27°C (v tabulce uváděné U_{real} je zkorigované na $p_0=101,3kPa$ a $t_0=20°C$)																		
Pokusy			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Δt [s]	$U_{vrcholové}$ [V]	U_{real} [kV]																
30	18,3	41,52	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	
	21,1	47,87	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	
	22,9	51,96	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	
	26	58,99	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	
	28,8	65,34	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	
	31,8	72,15	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	
	34,5	78,28	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	x	o	
	37,6	85,31	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	
	40,4	91,66	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	
	43,7	99,15	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	x	o	o	o	
	46	104,37	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	
	48,7	110,49	o	o	x	x	o	o	o	o	o	o	o	o	x	o	o	
	51	115,71	o	x	o	o	x	x	x	o	o	o	o	o	o	o	o	x
	52	117,98	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	54,7	124,11	o	o	o	o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o	o	o
	57,1	129,55	o	o	o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o	o	o	o
	58,8	133,41	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
61,9	140,44	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	
64,2	145,66	o	o	o	o	o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o	o	

Příloha 3

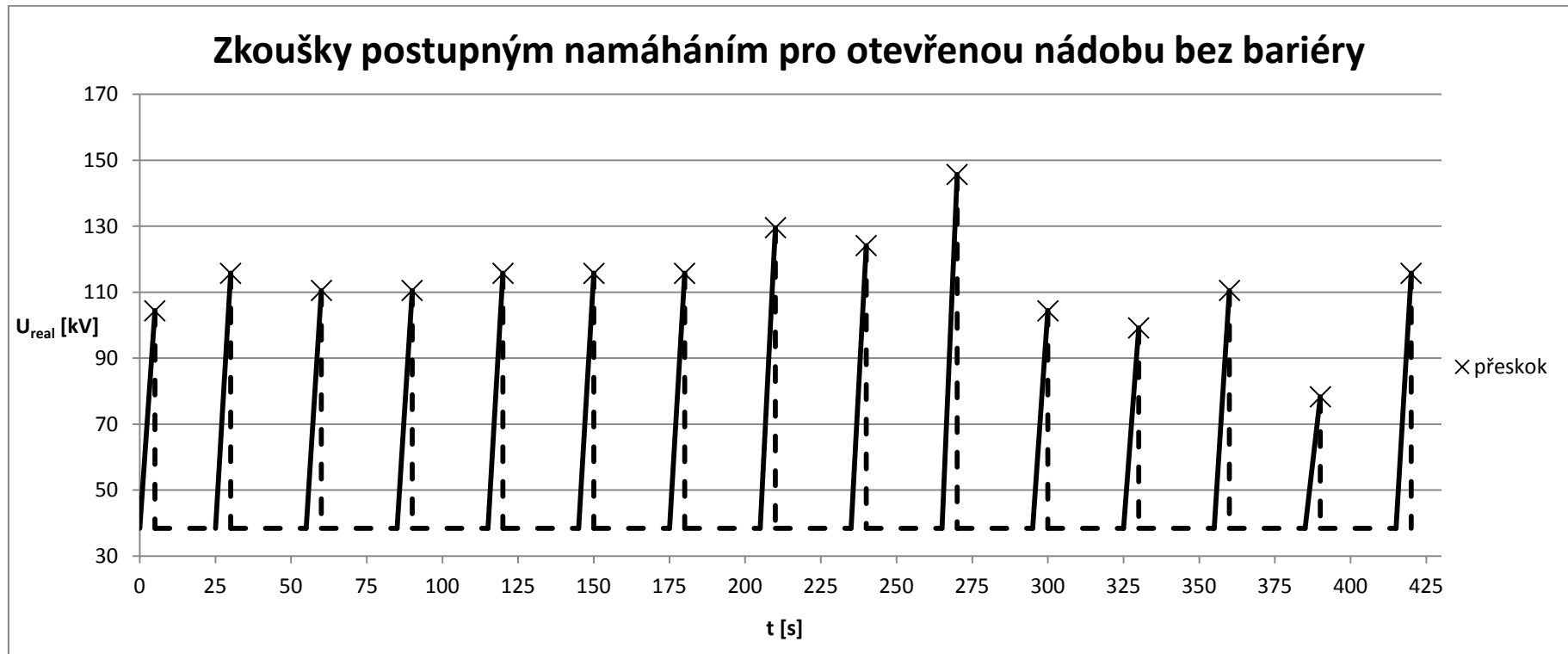
Tab. 5.10 Zkoušky postupným namáháním pro otevřenou nádobu s bariérou $\Delta t=30s$

p=96,9kPa, t=25,5°C (v tabulce uváděné U_{real} je zkorigované na $p_0=101,3kPa$ a $t_0=20°C$)																	
Pokusy			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Δt [s]	$U_{vrcholové}$ [V]	U_{real} [kV]															
30	26,9	60,16	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	28,4	63,52	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	30,3	67,77	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	32	71,57	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	33,6	75,15	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	35,1	78,50	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	36,7	82,08	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	38,2	85,44	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	39,9	89,24	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	41,5	92,82	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	42,8	95,73	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	44,4	99,30	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	46	102,88	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	47,3	105,79	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	48,8	109,14	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	50,2	112,28	o	o	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	x	o
	51,9	116,08	o	o		o	o	o	o	o	o	o	o	o	o		o
	53,5	119,66	o	o		o	o	o	o	o	o	o	o	o	o		o
	54,8	122,56	o	o		o	o	o	o	o	o	o	o	o	x		o
	56,3	125,92	o	o		o	o	o	o	o	o	o	o	o			o
	58	129,72	x	x		o	x	x	o	o	o	o	o	o			o
	59,4	132,85				x			o	o	o	o	o	o			o
	61,5	137,55							o	x	o	o	o	o			o
	63,3	141,57								o	o	x	o	o			o
64,9	145,15								x		o	o	o			o	
66,3	148,28									o		o	o			o	
68	152,09									o		o	x			o	
69,8	156,11									o		x				o	
71,7	160,36									o						o	
73,7	164,83									o						x	
75,4	168,64									o							
77,2	172,66									x							

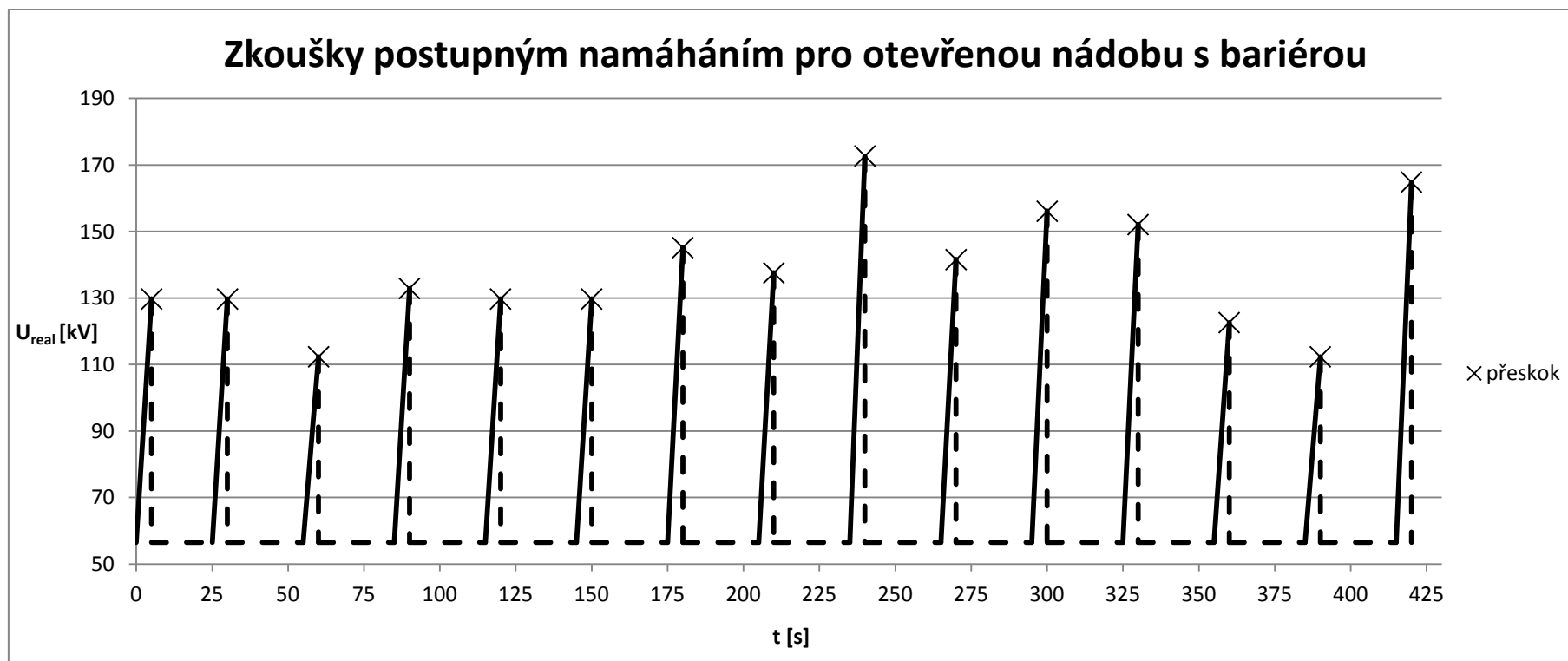
Příloha 3

Tab. 5.11 Zkoušky postupným namáháním pro uzavřenou nádobu bez bariéry $\Delta t=30s$

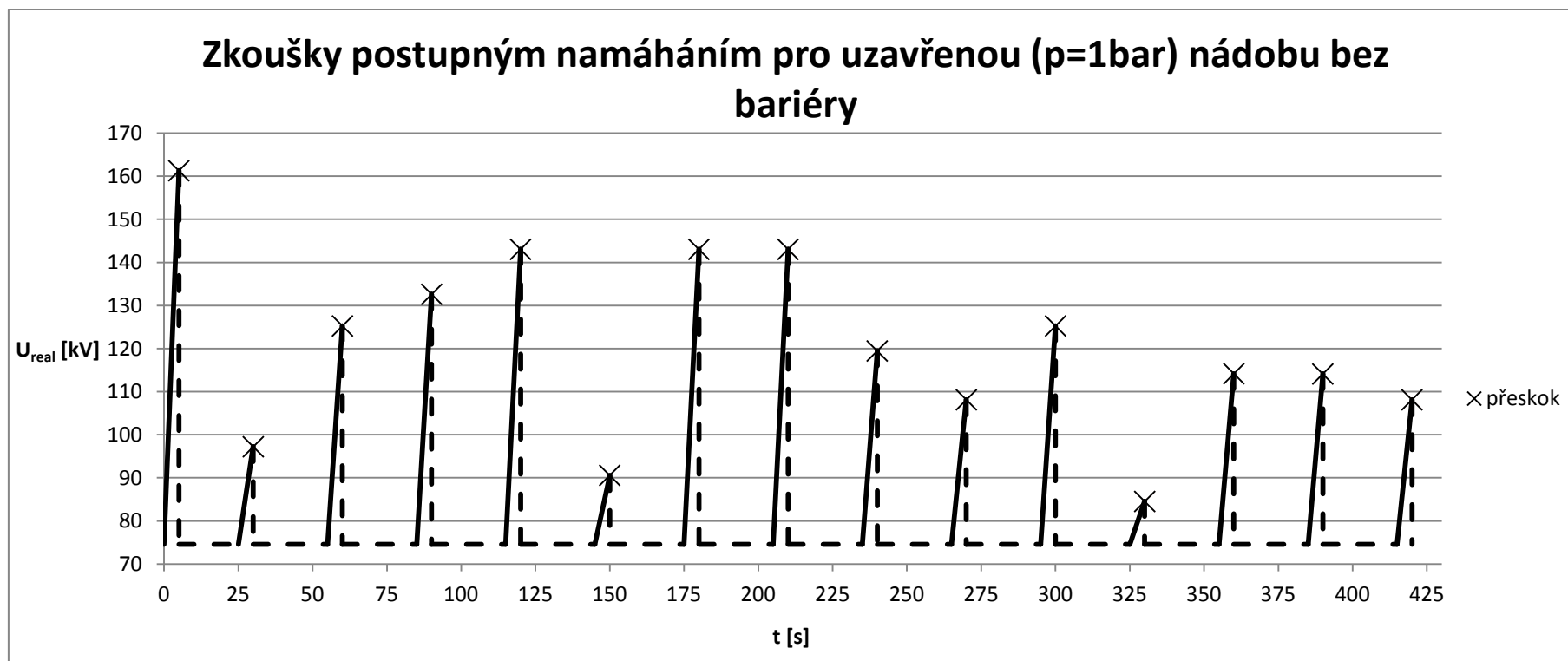
p= 98,1kPa, t=27,6°C (v tabulce uváděné U_{real} je zkorigované na $p_0=101,3kPa$ a $t_0=20^\circ C$)																	
Pokusy			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Δt [s]	$U_{vrcholové}$ [V]	U_{real} [kV]															
30	35,5	78,98	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	38	84,54	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	x	o	o	o
	40,7	90,55	o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	43,7	97,22	o	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	46	102,34	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	48,6	108,12	o	o	o	o	o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	x
	51,3	114,13	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	x	x	o	o
	53,7	119,47	o	o	o	o	o	o	o	o	x	o	o	o	o	o	o
	56,3	125,25	o	o	x	o	o	o	o	o	o	o	x	o	o	o	o
	59,6	132,60	o	o	o	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	61,6	137,04	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	64,3	143,05	o	o	o	o	x	o	x	x	o	o	o	o	o	o	o
	67,2	149,50	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	69,1	153,73	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o
	72,5	161,29	x	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o	o



Obr. 5.11 Zkoušky postupným namáháním pro otevřenou nádobu bez bariéry $\Delta t=30s$



Obr. 5.12 Zkoušky postupným namáháním pro otevřenou nádobu s bariérou $\Delta t=30s$



Obr. 5.13 Zkoušky postupným namáháním pro uzavřenou nádobu bez bariéry $\Delta t=30\text{s}$