

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Metody měření a vyhodnocení elektrostatických vlastností
textilií**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej KRČMÁŘ**
Osobní číslo: **E10B0057P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Metody měření a vyhodnocení elektrostatických vlastností
textilií**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Seznamte se s problematikou ESD.
2. Popište metody měření povrchového a vnitřního odporu na textiliích z hlediska ESD.
3. Popište "Metodu zkoušení pro měření snížení náboje" na textiliích z hlediska elektrostatických vlastností.
4. Prakticky otestujte vybrané vzorky a proveďte zhodnocení výsledků.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


- 1. ČSN EN 1149**
- 2. ČSN EN 61 340**
- 3. Elektronické informační zdroje.**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Karel Hromadka**
Katedra technologií a měření

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**


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

L.S.


Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá metodami měření a vyhodnocení elektrostatických vlastností textilií. Cílem práce je popsat parametry, podle kterých se vybírají textilní materiály pro praktická použití. Hlavní důraz je kladen na metody měření snížení náboje, které jsou v práci náležitě popsány a zhodnoceny. Praktická část se zabývá měřením povrchového odporu textilních vzorků a určením, kde je možné dané vzorky použít v praxi. V poslední části je popsáno měření vodivých cest natisknutých na vybraných textiliích a je zde provedeno jejich vyhodnocení.

Klíčová slova

Elektrostatický výboj, povrchový odpor, vnitřní odpor, snížení náboje, metody měření snížení náboje, triboelektrické nabíjení, nabíjení korónovým výbojem

Abstract

My bachelor thesis deals with the methods of measurement and evaluation of electrostatic properties of textiles. The aim of my thesis is to describe the parameters which are crucial in selecting of textile materials for practical use. The main emphasis is put on methods for charge decay measurement. These methods are properly described and evaluated in my thesis. The practical part deals with the measurement of surface resistance of the textile samples and also with the determination of possible use of these samples in practice. The last part includes the measurement of conductive paths on chosen textiles and also their evaluation.

Key words

Electrostatic discharge, surface resistance, volume resistance, charge decay, methods for measurement of charge decay, tribocharging, corona charging

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 6.6.2013

Ondřej Krčmář

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování Ing. Karlu Hromádkovi za jeho trpělivost a mnoho cenných rad při vedení mé bakalářské práce.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| OBSAH | 7 |
| SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK | 9 |
| ÚVOD | 10 |
| 1 VZNIK ELEKTROSTATICKEHO VÝBOJE | 11 |
| 2 ELEKTROSTATICKE VLASTNOSTI MATERIÁLŮ | 13 |
| 2.1 TRIBOELEKTRICKÉ ŘADY | 13 |
| 2.2 IZOLAČNÍ MATERIÁLY..... | 14 |
| 2.3 VODIVÉ MATERIÁLY | 14 |
| 2.4 MATERIÁLY ROZPTYLUJÍCÍ STATICKÝ NÁBOJ..... | 14 |
| 3 PORUCHY ZPŮSOBENÉ ESD | 16 |
| 3.1 FATÁLNÍ PORUCHY | 16 |
| 3.1.1 Průraz dielektrika | 17 |
| 3.1.2 Roztavení vodivých spojů..... | 17 |
| 3.1.3 Poškození polovodičových přechodů | 17 |
| 3.2 LATENTNÍ PORUCHY | 17 |
| 4 CITLIVOST SOUČÁSTEK NA ESD | 19 |
| 5 POVRCHOVÝ ODPOR | 20 |
| 6 VNITŘNÍ ODPOR | 23 |
| 7 MĚŘENÍ SNÍŽENÍ NÁBOJE | 24 |
| 7.1 METODY PRO MĚŘENÍ SNÍŽENÍ NÁBOJE..... | 25 |
| 7.1.1 Metoda zkoušení nabíjením korónovým výbojem..... | 25 |
| 7.1.2 Federal Test Standard 101C..... | 27 |
| 7.1.3 ITV Denkendorf..... | 27 |
| 7.1.4 Metoda vyvinutá v NASA..... | 28 |
| 7.1.5 Metoda vyvinutá BTG..... | 29 |
| 7.1.6 Metoda využívající tření..... | 30 |
| 7.1.7 Metoda zkoušení indukčním nabíjením | 31 |
| 7.1.8 Charge plate monitor (CPM)..... | 32 |
| 7.2 POROVNÁNÍ METOD | 32 |
| 8 PRAKTICKÁ ČÁST | 35 |
| 8.1 MĚŘENÍ POVRCHOVÉHO MĚRNÉHO ODPORU TEXTILIÍ | 35 |
| 8.1.1 Ovzduší pro kondicionání a zkoušení..... | 35 |
| 8.1.2 Popis zkušebních vzorků | 35 |
| 8.1.3 Použité měřicí přístroje..... | 38 |
| 8.1.4 Postup měření | 38 |
| 8.1.5 Výsledky měření | 40 |
| 8.1.6 Zhodnocení výsledků měření povrchového odporu | 40 |
| 8.2 ODPOR VODIVÝCH CEST..... | 41 |
| 8.2.1 Složení vodivé pasty | 41 |
| 8.2.2 Složení izolující vrstvy..... | 42 |
| 8.2.3 Materiály nosných textilií..... | 42 |
| 8.2.4 Použité měřicí přístroje..... | 42 |
| 8.2.5 Postup měření | 43 |

| | | |
|--|--|-----------|
| 8.2.6 | <i>Výsledky měření</i> | 43 |
| 8.2.7 | <i>Zhodnocení výsledků měření odporu vodivých cest</i> | 44 |
| ZÁVĚR | | 45 |
| SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ | | 46 |

Seznam symbolů a zkratek

| | |
|--------------|--|
| ESD | Electrostatic discharge (elektrostatický výboj) |
| ESDS..... | Electrostatic Discharge Sensitivity (citlivost součástek na elektrostatický výboj) |
| R_s | Povrchový odpor [Ω] |
| R_1 | Poloměr vnitřní elektrody [mm] |
| R_2 | Vnitřní poloměr vnější elektrody [mm] |
| ρ | Měrný povrchový elektrický odpor [Ω] |
| I_v | Elektrický objemový proud [A] |
| I_s | Elektrický povrchový proud [A] |

Úvod

Statická elektřina byla vážným problémem v průmyslu již po staletí. Výboj vyvolaný statickou elektřinou může poškozovat součástky či přístroje, nebo dokonce ohrožovat lidské životy, pokud by se jednalo o výbušné prostředí. Elektrostatickým výbojům by bylo nejlepší se úplně vyvarovat, ale bohužel to není ve většině případů možné. Proto jsou důležitá všechna opatření, která umožňují tyto výboje omezit nebo jim předcházet.

Nejběžnější výskyt elektrostatického výboje se objevuje v místech souvisejících s lidskou interakcí. Člověk sám o sobě dokáže naakumulovat poměrně velké množství náboje a po kontaktu s dalším objektem je jeho vybití pomocí elektrostatického výboje téměř nevyhnutelné. Vhodnou volbou pracovního či ochranného oděvu lze však množství náboje snížit. Materiály pro takovéto oděvy jsou vybírány pomocí jejich elektrostatických vlastností, které se dají zjistit pouze praktickým testováním a měřením. Pro měření snížení náboje existuje několik velmi rozdílných metod a hlavní cílem této práce bude metody popsat a zhodnotit jejich vhodnost využití.

V první části bakalářské práce je popsána teorie vzniku elektrostatického náboje a dále druhy poškození součástek, které mohou nastat v případě elektrostatického výboje. V následující části jsou popsány metody měření povrchového a vnitřního odporu textilních materiálů. Další náplní je popis jednotlivých metod zkoušení pro měření snížení náboje na textiliích z hlediska elektrostatických vlastností. V poslední části je konkrétně otestováno několik předložených textilních vzorků.

1 Vznik elektrostatického výboje

Kolem 14. století používali v evropských a karibských pevnostech postupy a zařízení, aby zabránili elektrostatickému výboji, který by mohl zapálit skladovaný střelný prach. V letech 1860 používaly papírny v USA různé procesy, aby zabránily elektrostatickému výboji. Jednalo se o uzemnění, ionizaci pomocí plamene a také parní bubny, tyto postupy pomáhaly rozptýlit náboj, který vznikal při průchodu pásu papíru sušícím procesem. [1]

Člověk je schopen cítit výboj od 2 až 4kV, ale necítí mnohem menší napětí, které dokáže poškodit citlivé elektronické součástky. V posledních letech se polovodičový průmysl vyvíjí obrovskou rychlostí. Obvody jsou stále rychlejší, roste jejich integrace, mají čím dál menší spotřebu a menší rozměry. Díky tomu jsou obvody více náchylnější na poškození nebo zničení vlivem elektrostatického výboje. Proto je v poslední době velmi důležitá prevence proti tomuto poškození nebo zničení. [2]

Statická elektřina je definována jako elektrický náboj způsobený nerovnováhou elektronů na povrchu materiálu. Tato nerovnováha elektronů produkuje elektrické pole, které může ovlivňovat okolní objekty. Elektrostatický výboj je definovaný jako přenos náboje mezi tělesy o různých elektrických potenciálech. [3]

Elektrostatický výboj může měnit elektrické vlastnosti materiálu, zhoršovat je nebo materiál zničit. Také může rušit činnost elektronického systému, způsobit jeho špatnou funkci nebo dokonce selhání. Nabitě povrchy materiálů přitahují nečistoty, tím pádem bude jejich odstranění velice obtížné. [1]

Elektrostatický náboj je nejčastěji vytvořen kontaktem a oddělením dvou materiálů. Vytvoření elektrostatického náboje kontaktem a oddělením je známé jako triboelektrické nabíjení. To zahrnuje přenos elektronů mezi materiály. Atomy materiálu, který nemá žádný statický náboj, mají stejné množství protonů v jádrech a elektronů na orbitalech kolem jádra. Když jsou dva materiály k sobě přiloženy a pak odděleny, negativně nabitě elektrony jsou přeneseny z povrchu jednoho materiálu na druhý. Materiál, který ztratí elektrony, se stane kladně nabitým, zatímco materiál, který elektrony získává, je nabit negativně. Množství náboje vytvořeného triboelektrickým nabíjením je ovlivněné styčnou plochou, rychlostí

oddělení materiálů, relativní vlhkostí vzduchu a chemickým složením materiálu. Náboj na materiálu zůstává, tím pádem se dá hovořit o elektrostaticky nabitým materiálu. Tento náboj může být přenesen z materiálu elektrostatickým výbojem (ESD). Odpor vybíjecího obvodu a přechodový odpor v mezifloše mezi dotekovými plochami, to jsou přídavné faktory, které také ovlivňují přenos náboje. Typické případy vytvoření náboje a jejich napěťová hodnota jsou uvedené v Tab. 1, jsou zde zaznamenány hodnoty při 20% a 80% vlhkosti vzduchu. [1]

Tab. 1 Elektrostatické napětí, jako funkce relativní vlhkosti [1]

| Elektrostatické napětí (kV) | 20 %RH | 80 %RH |
|---|---------------|---------------|
| Chůze po podlahové krytině z PVC | 5 | 3 |
| Chůze po syntetickém koberci | 15 | 7,5 |
| Vyjmutí IO (DIP) z plastové přepravky | 0,7 | 0,4 |
| Zdvihnutí plastové tašky | 20 | 0,6 |
| Posun polystyrénové krabice po koberci | 18 | 1,5 |
| Přiložení odsávačky cínu | 8 | 1 |
| Použití mrazícího spreje na plošný spoj | 15 | 5 |

Elektrostatický náboj může vzniknout také indukci, ionizací nebo stykem s dalším nabitým objektem. Nejběžnější je však triboelektrické nabíjení.

2 Elektrostatické vlastnosti materiálů

Chování elektrostatického náboje je značně ovlivněné charakterem materiálů. Materiály dělíme na izolační, vodivé a disipativní. Polaritu náboje vytvořeného na materiálu třením určují triboelektrické řady.

2.1 Triboelektrické řady

Když se dva materiály dotknou a oddělí, polarita a velikost náboje je indikována pozicemi materiálů v triboelektrických řadách. Triboelektrické řady znázorňují, jak jsou náboje generovány na různých materiálech viz. Tab. 2. Materiál blíže vrcholu tabulky bude nabit kladným nábojem a materiál umístěný v tabulce níže bude nabit záporným nábojem. Pokud jsou materiály v tabulce více vzdáleny, znamená to, že se nabijí větším nábojem než materiály, které jsou naopak u sebe blíže.

Tab. 2 Triboelektrické řady [1]

| Typické triboelektrické řady | |
|------------------------------|-------------------|
| + | Králičí kožešina |
| Kladný | Sklo |
| | Slída |
| | Lidské vlasy |
| | Nylon |
| | Vlna |
| | Kožešina |
| | Olovo |
| | Hedvábí |
| | Hliník |
| | Papír |
| | Bavlna |
| | Ocel |
| | Dřevo |
| | Jantar |
| | Pečetní vosk |
| | Nikl, měď |
| | Mosaz, stříbro |
| | Zlato, platina |
| | Síra |
| | Acetátové hedvábí |
| Polyester | |
| Celulóza | |
| Záporný | Křemík |
| | - |

Je však mnoho jiných vlivů, které ovlivňují triboelektronické nabíjení, proto musíme brát tabulku pouze jako vodítko. Prakticky všechny materiály, včetně nečistot ve vzduchu a ve vodě, mohou být triboelektricky nabity. Jaké množství náboje je vytvořeno, kde se náboj objeví a jak rychle se vytvoří, to je ovlivněno fyzikálními, chemickými a elektrickými vlastnostmi materiálů. [1]

2.2 Izolační materiály

Materiál, který zabraňuje nebo omezuje tok elektronů přes jeho povrch nebo tok jeho objemem, se nazývá izolant. Izolanty mají velmi vysoký elektrický odpor, obecně větší než $1 \cdot 10^{11} \Omega$ (povrchový odpor) a $1 \cdot 10^{11} \Omega \cdot m$ (objemový odpor). Značná část náboje může být vytvořena na povrchu izolantu, protože izolační materiál značně znemožňuje volný tok elektronů. Kladné i záporné náboje mohou být na povrchu izolantu ve stejný čas, i když na různých místech. Elektrony se po povrchu téměř nemohou pohybovat, takže oba náboje mohou zůstat na materiálu poměrně dlouhou dobu. [1]

2.3 Vodivé materiály

Vodivé materiály mají nízký elektrický odpor, proto jimi mohou elektrony volně procházet jak po povrchu, tak v celém objemu. Vodivé materiály mají malý elektrický odpor, menší než $1 \cdot 10^4 \Omega$ (povrchový odpor) a $1 \cdot 10^4 \Omega \cdot m$ (objemový odpor). Jakmile se vodivý materiál nabije, bude náboj rozprostřen po celém povrchu materiálu. Když se nabitý vodivý materiál dostane do kontaktu s jiným vodivým materiálem, elektrony se mezi nimi budou snadno pohybovat. Pokud druhý vodič bude uzemněn, budou se všechny elektrony pohybovat směrem k zemi a vodič tak získá neutrální náboj. Elektrostatický náboj může být vytvořen na vodiči třením stejně jako na izolátoru. Dokud bude nabitý vodič izolován od ostatních vodičů, tak dlouho na něm bude setrvávat elektrostatický náboj. Po uzemnění se samozřejmě náboje zbaví a stane se neutrálním. Pokud se dotkne dalšího neuzemněného vodiče, tak mezi nimi bude náboj volně proudit. [1]

2.4 Materiály rozptylující statický náboj

Disipativní materiály mají odpor mezi izolujícími a vodivými materiály, čili od $1 \cdot 10^4 \Omega$ do $1 \cdot 10^{11} \Omega$ povrchového nebo objemového odporu. Na disipativním materiálu mohou být volné elektrony, ale jejich pohyb bude omezen povrchovým odporem. Stejně jako u předešlých dvou materiálů, může i zde na disipativních materiálech vzniknout náboj pomocí

tření. Jako vodivý materiál může disipativní materiál předat náboj do země nebo do jiného vodivého objektu. Přenos náboje z disipativního materiálu obecně trvá déle než přenos náboje z vodivého materiálu stejné velikosti, ale naopak je rychlejší než přenos náboje z izolantu. [1]

3 Poruchy způsobené ESD

Poškození vlivem ESD se může objevit v průběhu celé výroby zařízení. Například při automatickém osazování desek plošných spojů či při automatickém testování. Nejčastěji je ovšem elektrostatický výboj spojen s lidskou interakcí. Jeho následkem může dojít k funkčnímu poškození obvodu nebo součástky, které by se dalo označit jako fatální poškození. Dalším případem může být poškození latentní, které se projeví až po určité době používání. V Tab. 3 jsou konkrétní napětí elektrostatického výboje, která může vyvolat nabitá osoba. Tato napětí mohou poškodit nebo přímo zničit některé polovodičové součástky. Proto je nutné součástky chránit proti ESD a zároveň minimalizovat množství náboje na člověku, případně na jeho oděvu. [1, 4]

Tab. 3 Odolnost polovodičových součástek proti ESD vyvolané člověkem [4]

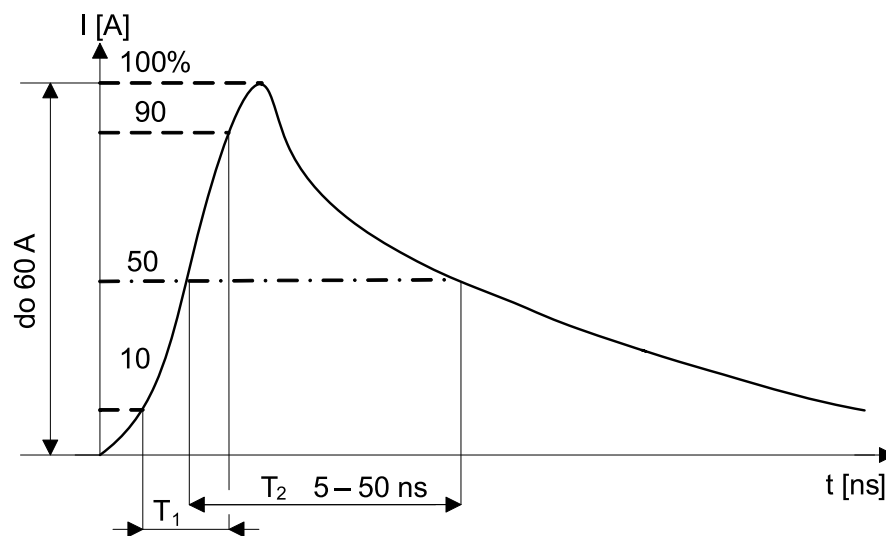
| Typ součástky | Maximální odolnost vůči napětí |
|-----------------------|--------------------------------|
| VMOS | > 30 V až ≤ 1800 V |
| MOSFET | > 100 V až ≤ 200 V |
| GaAsFET | > 100 V až ≤ 300 V |
| EPROM | ≤ 100 V |
| JFET | > 140 V až ≤ 7000 V |
| SAW | > 150 V až ≤ 500 V |
| OP AMP | > 190 V až ≤ 2500 V |
| CMOS | > 250 V až ≤ 3000 V |
| Schottkyho diody | > 300 V až ≤ 2500 V |
| Povrchové odpory | > 300 V až ≤ 3000 V |
| Bipolární tranzistory | > 380 V až ≤ 7000 V |
| ECL | > 500 V až ≤ 1500 V |
| SCR | > 680 V až ≤ 1000 V |
| Schottkyho TTL obvody | > 1000 mV až ≤ 2500 V |

3.1 Fatální poruchy

Mezi fatální poškození patří průraz dielektrika, roztavení vodivých spojů nebo poškození polovodičových přechodů. Pokud nastane takováto porucha, pak zařízení nebo součástka přestane trvale fungovat.

3.1.1 Průraz dielektrika

Tento jev nastane, když napětí na izolaci během elektrostatického výboje překročí dielektrickou pevnost, pak nastane průraz. Vzniká především u výboje, který má vysokou a zároveň velmi rychlou náběžnou hranu proudu, která způsobí vznik vysokého napětí. Na *Obr. 1*, můžeme vidět průběh impulsu proudu při vybití lidského těla pro 5 kV. Je patrné, že náběžná hrana je opravdu rychlá (T_1) a může dosahovat hodnot až 60 A, proto je velice důležité předcházet takovýmto výbojům např. uzemněním nabitě osoby. [5]



Obr. 1 Průběh rázového vybití lidského těla pro $U = 5$ kV [6]

3.1.2 Roztavení vodivých spojů

Velké proudy, které vznikají z ESD a protékají tenkými spoji z kovů nebo z polovodivých materiálů, se vlivem Jouleova tepla ohřívají. Pokud teplota překročí teplotu tavení konkrétního materiálu, tak dojde k nevratnému poškození. [5]

3.1.3 Poškození polovodičových přechodů

K poškození polovodičových přechodů (např. přechod emitor-báze u bipolárních tranzistorů) dojde v případě lavinového průrazu. Napětí na závěrně polarizovaném přechodu překročí hodnotu napětí lavinového průrazu, proud prudce naroste a nastane destruktivní průraz. [5]

3.2 Latentní poruchy

Tento druh poruchy je mnohem těžší identifikovat. Jedná se totiž o částečnou degradaci součástky, čili neovlivňuje jeho funkci při expedici. Součástka nebo zařízení, jehož je

součástí, má však sníženou životnost, spolehlivost a hlavně sníženou odolnost proti ESD. Latentní poruchy jsou velmi ekonomicky nevýhodné na opravy, proto se častěji přistupuje k výměně. [1]

4 Citlivost součástek na ESD

Porucha součástky nastane, když je součástka nedostatečně odolná proti ESD, nebo když není schopna výboj rozptýlit. Citlivost součástky se uvádí jako ESDS, je to maximální napětí, při kterém součástka ještě není poškozena. Klasifikace citlivosti součástek probíhá pomocí tří normalizovaných základních modelů, jsou jimi:

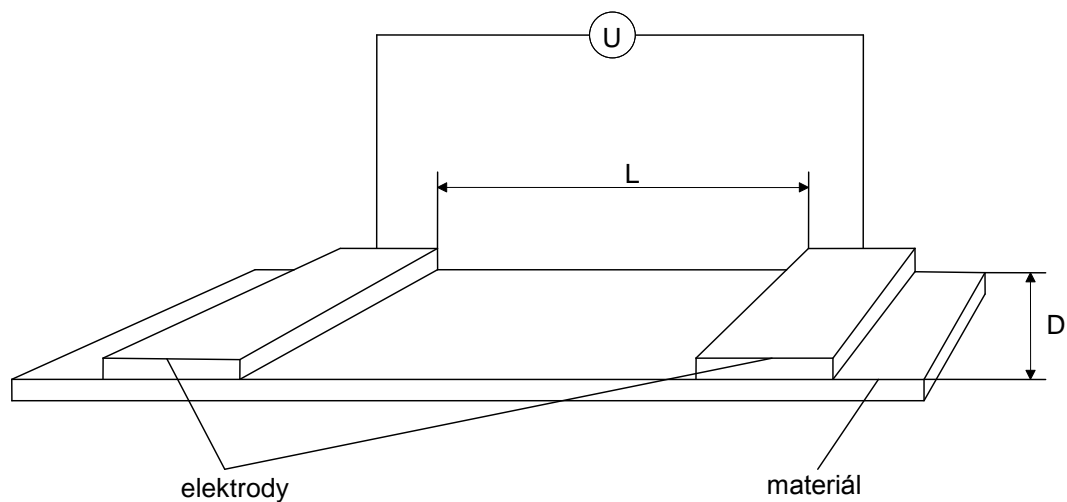
- HBM – Human Body Model (model lidského těla)
- MM – Machine Model (strojový model)
- CDM – Charged Device Model testing (model nabíjené součástky)

Tyto modely pokrývají 95% všech reálných poruch vlivem ESD. Pro klasifikaci citlivosti ESDS součástky je třeba znát všechny tři odolnosti podle modelů HBM, MM, CDM. [1]

5 Povrchový odpor

Nabíjení povrchu tělesa souvisí s povrchovým odporem. Pokud je povrchový odpor vysoký, dochází ke značnému nabíjení. Při nízkých povrchových odporech je nabíjení naopak nepatrné. Proto je důležité povrchový odpor měřit. Nejpoužívanější metodou pro měření povrchového odporu je měření pomocí dvou elektrod *Obr. 2*, nejčastěji se však setkáváme s prstencovými elektrodami. Povrchový odpor je definován jako:

$$R_s = \frac{U}{I_s} \quad (1)$$



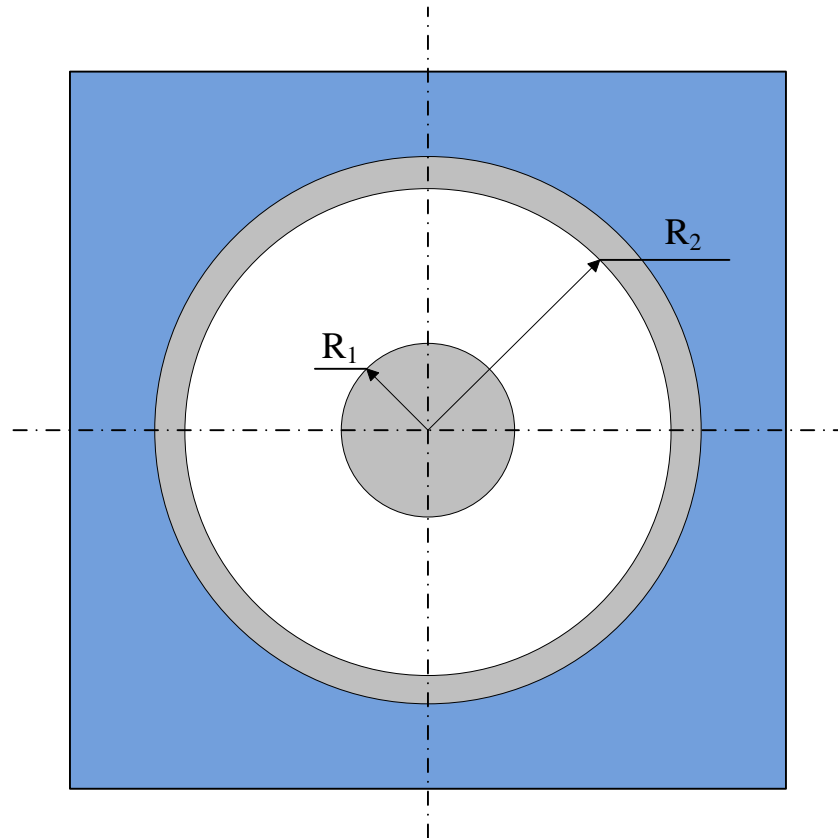
Obr. 2 Základní konfigurace pro měření povrchového odporu [7]

Povrchový měrný odpor ρ_s se měří stejně jako povrchový odpor, ale do jeho rovnice je započtená šířka a délka materiálu:

$$\rho_s = \frac{U}{\frac{L}{I_s} D} \quad (2)$$

Jak povrchový odpor, tak povrchový měrný odpor mají jednotku ohm (Ω). Pro přehlednější je povrchový měrný odpor uváděn v ohmech na čtverec ($\Omega/\text{čtverec}$). Pokud je nám známá povrchová proudová hustota (1.3) mezi soustřednými prstencovými elektrodami *Obr. 5.3*, tak mezi nimi můžeme zjistit intenzitu elektrického pole.

$$J_s = \frac{I_s}{2\pi \cdot r} \quad (3)$$



Obr. 3 Soustředné prstencové elektrody [7]

Je třeba brát na vědomí, že při měření povrchového odporu (povrchového měrného odporu) se předpokládá, že všechny proudy tečou mezi elektrodami po povrchu materiálu a nepronikají do materiálu. Podle Ohmova zákona je popsán vztah mezi povrchovou proudovou hustotou J_s a intenzitou elektrického pole E :

$$J_s = \frac{E}{\rho_s} \quad (4)$$

Pomocí rovnic (3) – (4) lze vyjádřit intenzitu elektrického pole:

$$E = \frac{\rho_s J_s}{2\pi \cdot r} \quad (5)$$

Napětí mezi elektrodami je získáno integrací E od R_1 do R_2 :

$$U_{R_1, R_2} = \int_{R_1}^{R_2} E \, dr = \int_{R_1}^{R_2} \frac{\rho_s J_s}{2\pi \cdot r} \, dr = \frac{\rho_s J_s}{2\pi} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (6)$$

Dosazení do rovnice (1):

$$R_s = \frac{\rho_s}{2\pi} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right) \quad (7)$$

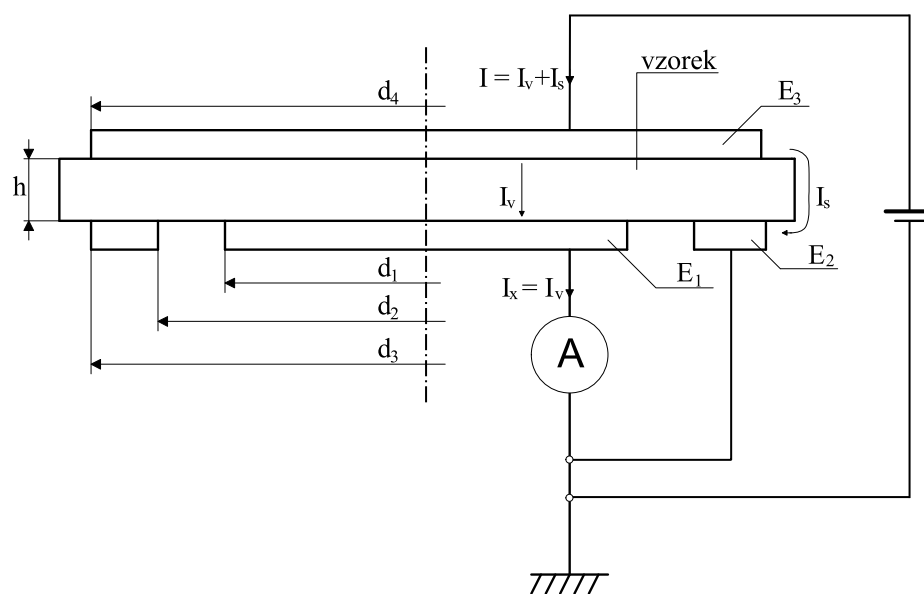
Po vyjádření je zjištěno, že ρ_s závisí na povrchovém odporu a na konstantě, která je ovlivněná pouze geometrií elektrod.

$$\rho_s = R_s \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} = R_s \cdot k \quad (8)$$

Při samotném měření je potřeba zvážit, že povrchový odpor závisí na různých vnějších faktorech. Nejvíce ho ovlivňuje teplota, relativní vlhkost vzduchu a obsah vlhkosti v povrchu měřeného materiálu. Dalo by se říci, že mezi povrchovým odporem a vlhkostí platí nepřímá úměrnost. Dalším důležitým aspektem je zajištění řádného kontaktu mezi elektrodami a zkoušeným materiálem. Odpor je také závislý na hodnotě přiloženého stejnosměrného napětí a na časovém rozpětí, během kterého byl vzorek pod napětím. Přesný postup měření povrchového odporu textilií, rozměry elektrod a předepsané klimatické podmínky určuje norma ČSN EN 1149-1 [28]. [7, 8]

6 Vnitřní odpor

Vnitřní odpor někdy označovaný také jako objemový odpor, se nejčastěji měří pomocí tříelektrodivého systému zapojení. Stejně jako u měření povrchového odporu se jedná o prstencové elektrody. Elektrody se umístí na protilehlé povrchy zkoušeného materiálu, připojí se na ně stejnosměrné napětí a měří se odpor při průchodu proudu materiálem. Konkrétní zapojení je na *Obr. 4*.



Obr. 4 Zapojení pro měření vnitřního odporu [10]

Proud změřený ampérmetrem I_x se rovná přímo I_v , protože I_s je sveden do elektrody E_2 po povrchu měřeného materiálu. Proto se používá výhradně tříelektrodivé a ne dvouelektrodivé zapojení. Měření vnitřního odporu textilií přesně popisuje norma ČSN EN 1149-2 [29].

7 Měření snížení náboje

Statická elektřina přináší nebezpečí a problémy, kterým je třeba se vyhnout. Proto je výběr konkrétních materiálů velmi důležitý. Hlavním kritériem je tradičně měření povrchového odporu. Posuzování podle povrchového odporu je vhodné, pokud je požadován odvod náboje z vodivého materiálu při kontaktu se zemí, například člověka s podlahou. Takto lze například vyhodnotit vhodnost podlahových krytin nebo obuvi. Ovšem kde problém statické elektřiny vychází z náboje uchovaného na povrchu materiálu, tam je měření povrchového odporu celkem nevhodné. Toto platí hlavně pro nehomogenní materiály, ale je velký problém ověřit, zda materiál je nebo není homogenní. Problémy vycházející ze statické elektřiny jsou nejčastěji zapříčiněny nábojem naakumulovaným na povrchu materiálu. Takovýto náboj vzniká třením nebo kontaktem s nabitým zařízením nebo materiálem. Je důležité vědět, že poměrně velké povrchové napětí se může objevit i na materiálech s nízkou rezistivitou a naopak poměrně nízké napětí se může vyskytnout na materiálech, které jsou dobrými izolanty. Proto by povrchová rezistivita neměla být majoritním kritériem. Dalším důležitým důvodem je, že měření povrchové rezistivity jednoznačně neurčuje schopnost materiálu odvádět náboj, nebo ho případně rozptýlit na povrchu materiálu.

- Měření povrchové rezistivity určí pouze nejrychlejší cestu pro pohyb náboje. Pokud je materiál nehomogenní, tak nejnižší hodnoty odporu budou naměřeny ve vodivějších částech materiálu. Měřením lze zjistit odpor vláken, ale ten nijak nepopisuje, jak se bude náboj pohybovat mezi vlákny.
- Použití měření povrchové rezistivity pro kategorizaci materiálů je založeno na předpokladu, že jsou oba materiály homogenní a mají lineární proudové a napěťové charakteristiky. Většiny materiálů po lokálním triboelektrickém nabíjení, nemají charakteristiky exponenciálního charakteru. Takovýto průběh napětí by vznikl pouze jednoduchým pohybem náboje.

Proto se zavádí měření snížení náboje. V následující kapitole budou příčně popsány jednotlivé metody pro měření snížení náboje. [11, 17]

7.1 Metody pro měření snížení náboje

Existuje několik metod, které jsou velmi odlišné. Většina metod je určena pouze pro měření v laboratorních podmínkách, ale některé jsou již dostupné ke komerčnímu použití. Veškeré metody jsou velmi závislé na konstrukci testovaných materiálů. Metody měření musí splňovat následující požadavky:

- Poskytovat výsledky pro širokou škálu materiálů, které budou mezi sebou snadno porovnatelné.
- Materiál musí mít z počátku nulový potenciál a musí být nabíjen poblíž snímacího zařízení. Měří se velikost napětí na povrchu vytvořené nabíjením a také jeho snížení za určitý čas.
- Měření napětí jsou provedena bezkontaktně přímo na nabitě oblasti.
- Měření by mělo být provedeno na stejné straně, na které proběhlo nabíjení.
- Nezávislé na konstrukci nebo parametrech materiálu.
- Minimální modifikace materiálu a jeho charakteristiky snížení náboje, při provádění měření.
- Metoda by měla být snadno použitelná i pro neodborný personál.
- Vhodné zařízení by mělo být komerčně dostupné nebo snadno vyrobitelné.
- Postup měření by měl být zdokumentován včetně uvedení měřicích zařízení.

Všechny metody, které budou popsány, mají své slabé a silné stránky. Některé z nich jsou již předmětem nějaké normy, to však nemusí znamenat, že jsou nutně správné. Proto je hlavním cílem při popisu těchto metod zjistit jejich výhody případně nevýhody. [11]

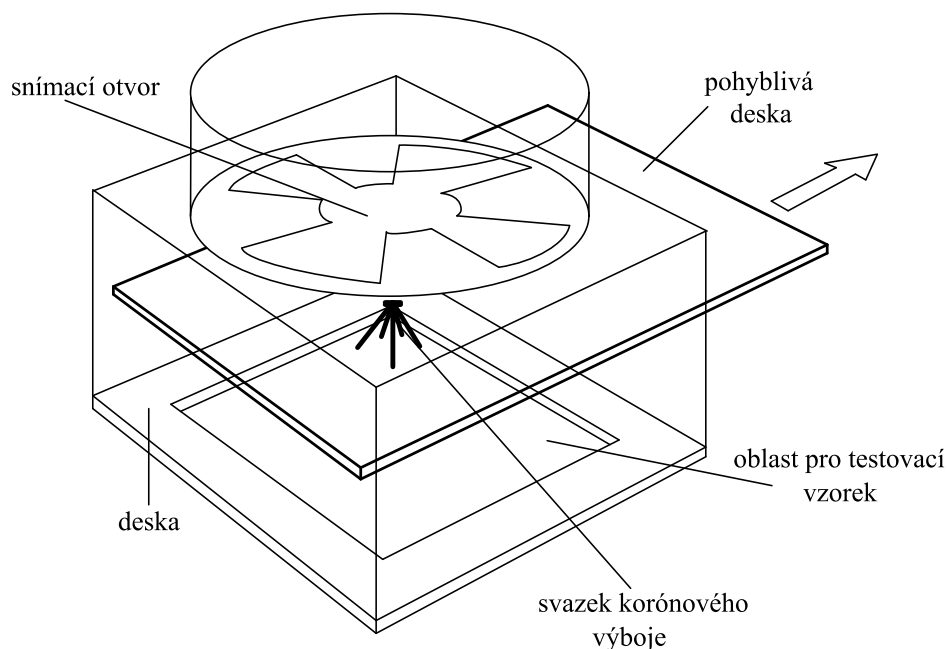
7.1.1 Metoda zkoušení nabíjením korónovým výbojem

Nabíjení pomocí koróny a následné měření úbytku náboje nabízí mnoho praktických výhod, hlavně bylo implementováno do kompaktního a snadno použitelného zařízení s označením JCI 155v5, které je zobrazeno na *Obr. 5*. Tuto metodu může používat i neodborný personál pro mnoho druhů materiálů v celé řadě průmyslových odvětví po celém světě.



Obr. 5 JCI 155 zkušební jednotka pro měření snížení náboje [13]

Základní uspořádání pro měření snížení náboje pomocí korónového výboje je na *Obr. 6*.



Obr. 6 Uspořádání pro měření snížení náboje [15]

Otvor pro testovací vzorek je 45x54 mm, ale vzorek může být menší nebo větší než tento otvor. Povrch vzorku je nabit korónovým výbojem o velikosti 3-10 kV, který je vytvořen z kuželovitého shluku drátů umístěného na spodní straně pohyblivé desky. Korónový výboj je obvykle generován jako krátký puls trvající do 20 ms, delší puls by mohl nevratně poškodit povrch vzorku. Pohyblivá deska, která plně zakrývá přístroj pro měření elektrostatického pole, musí být odstraněna velmi rychle (do 20 ms). Měření snížení náboje není snadné především pro materiály, u nichž se náboj rozptýlí velmi rychle, protože je jejich počáteční vrchol napětí velmi nízký 10 – 50 V, nebo u materiálů s velmi dlouhou dobou snížení náboje. Tento problém řeší například zkušební jednotka JCI 155v5 *Obr. 5*, která využívá postup

časování měření snížení náboje označovaný 'stutter timing'. Základem této techniky je úprava načasování hodin vhodným (krátkým) krokem měření. Měření je opakovaně zastavováno a spouštěno pokud je signál nad nebo pod zvolenou napěťovou úrovní. Pokud se testovaný vzorek umístí mezi dvě vodivé upínací desky, které jsou izolovány od země, tak je možné změřit i velikost přeneseného náboje na vzorek. K vodivým deskám se přes kondenzátor (30 – 250 nF) připojí citlivý přístroj měřící elektrostatické pole (např. JCI 111 s adaptérem JCI 156), který je třeba uzemnit. [14, 15, 16, 23]

7.1.2 Federal Test Standard 101C

Tuto metodu pod označením Method 4046 popisuje americký standard Federal Test Standard 101C. Základní postup zahrnuje připevnění 12,7 cm dlouhého a 10,2 cm širokého proužku materiálu mezi nosné svorky umístěné před přístrojem pro měření elektrostatického pole. Na nosné svorky je připojeno napětí 5000 V a přístroj pro měření se umístí tak, aby ukazoval stejné napětí jako je svorkové. Svorky jsou poté uzemněny a přístrojem pro měření je zjišťováno snížení napětí za čas. Tato metoda by měla být použita pouze pro homogenní materiály. Při porovnání mezi nabíjením korónou a FTS 101C bylo dokázáno, že tato metoda vykazuje kratší časy snížení náboje. Bylo také potvrzeno, že srovnatelné výsledky byly opravdu získány z homogenních materiálů. Z toho vyplývá, že FTS 101C v podstatě reagoval na nejrychlejší trasy pro pohyb náboje ve vrstvě materiálu, zatímco nabíjení pomocí koróny ukázalo, jak se náboj pohyboval po povrchu materiálu. Přístroj je komerčně dostupný, nabízí ho firma ETS a je zobrazen na *Obr. 6*. [11]

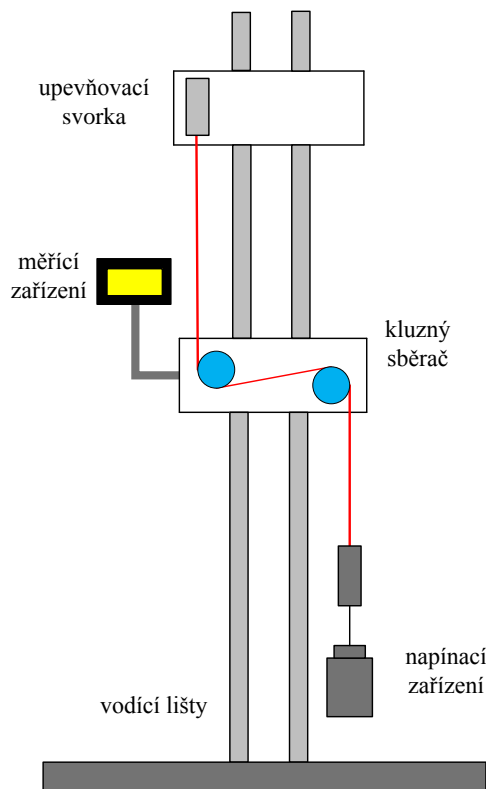


Obr. 6 Static Decay Meter, Model: 406D (převzato z [12])

7.1.3 ITV Denkendorf

Firma ITV Denkendorf vyvinula metodu využívající triboelektrické nabíjení. V dnešní době je tato metoda popsána v normě ČSN EN 1149-3 [21]. Zkoušený materiál je nabit třením na válcových tyčích, které jsou nasazeny na svisle běžícím kluzném sběrači. Intenzita

elektrického pole náboje generovaného na zkoušeném materiálu, je sledována a zaznamenávána přístrojem pro měření elektrostatického pole, který je většinou připojen k PC s příslušným programem pro vyhodnocení měření. Tento přístroj vyrobila firma Polymertest se sídlem ve Zlíně, pro firmu Spolsin, spol. s r.o.



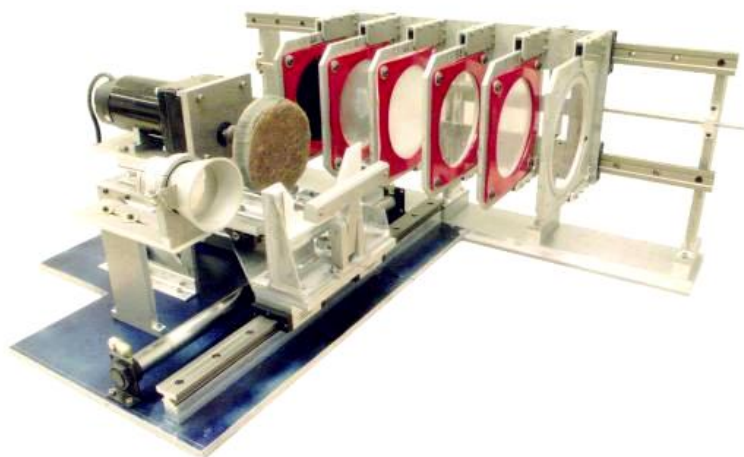
Obr. 7 Zařízení pro zkoušku triboelektrickým nabíjením [13]

Nejdůležitější částí zařízení je kluzný sběrač, ke kterému jsou připojeny válcové tyče. Tyče jsou vyměnitelné, jsou vyrobeny z hliníku a z polyethylénu. Sběrač se může pohybovat vertikálně po vodících lištách. Součástí je také vrchní upevňovací svorka a napínací zařízení o předepsané hmotnosti. [13]

7.1.4 Metoda vyvinutá v NASA

V National Aeronautics and Space Administration v Kennedy Space Center byla vyvinuta metoda na testování vrstevných materiálů, která využívá triboelektrické nabíjení. V roce 1984 ji vytvořil Dr. R. Gompf. Jelikož byla tato metoda vyvinuta již před třiceti lety, došlo k její inovaci a hlavně k její automatizaci. Přístroj je vyobrazen na *Obr. 8*, je schopný vyhodnotit až šest materiálů v různých prostředích a kromě generovaného elektrostatického napětí je schopen měřit i dobu vybíjení materiálu. Mezi materiály, které je schopen vyhodnotit, patří oděvní materiály, barvy, nátěry a pevné materiály do tloušťky 12,7 mm. Vzorky jsou vystříhány z testovaného materiálu a pak musí být aklimatizovány po dobu 24 hodin. Poté

jsou umístěny do držáku, kde jsou uzemněny. Jednotlivé vzorky se pak přesunou před otočnou hlavu vyrobenou z PTFE, která je poháněna motorem rychlostí 200 otáček za minutu. Pak dojde ke kontaktu vzorku a otočné hlavy, přítláčná síla je přibližně 1,36 kg a kontakt trvá méně než 10 sekund. Po tření PTFE hlavou je vzorek velmi rychle přesunut před elektroměr (tento čas je kratší než 0,5 s), který pomocí systému sběru dat vyhodnotí velikost náboje a čas jeho snížení. [11, 19, 20]



Obr. 8 Automatizovaný robot pro měření triboelektrického nabíjení vyvinut v NASA (převzato z [19])

V Kennedy Space Center vytvořili kritérium přijatelnosti pro elektrostatické vlastnosti materiálů. Po prvních pěti vteřinách, kdy je materiál již umístěn před elektroměr, musí mít méně než 350 V. [19]

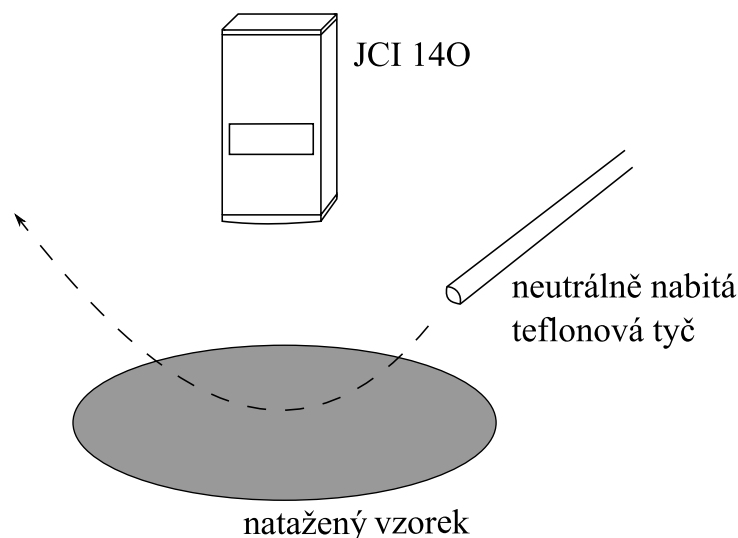
7.1.5 Metoda vyvinutá BTTG

Jedná se o metodu využívající nabíjení pomocí koróny, je používaná British Textile Technology Group pro testování textilií (Shirley Method 20). Materiál o průměru 300 mm je umístěn ve vodivém kruhovém rámu, kde je vystaven radiálnímu pnutí. Materiál je na jedné straně ve středu kruhu nabit korónovým výbojem a na opačné straně je umístěn přístroj měřící elektrostatické pole. Potom co je povrch nabit, je nosný rám uzemněn. Při pozorování snížení náboje je důležité vzít v potaz, že je měřící přístroj umístěn na opačné straně než je nabitý povrch. U materiálu s vodivými vlákny ve struktuře bude vznikat stínění mezi místem měření a nábojem, takže měření nebude přímo souviset s chováním povrchového náboje. Také prvotní snížení náboje bude silně ovlivněno kapacitní vazbou prostřednictvím vodivých prvků materiálu, proto je složité posoudit, jaké místo charakteristiky snížení náboje patří samotné

textilií. Tato metoda je použitelná pouze pro textilní materiály, které mohou být vyříznuty do potřebného tvaru. Přístroj není komerčně dostupný. [11]

7.1.6 Metoda využívající tření

Je to poměrně jednoduchá metoda pro zkoumání nabíjení materiálu pomocí tření, kterou vyvinula společnost John Chubb Instrumentation (JCI). Přibližné uspořádání této metody je na *Obr. 9*.



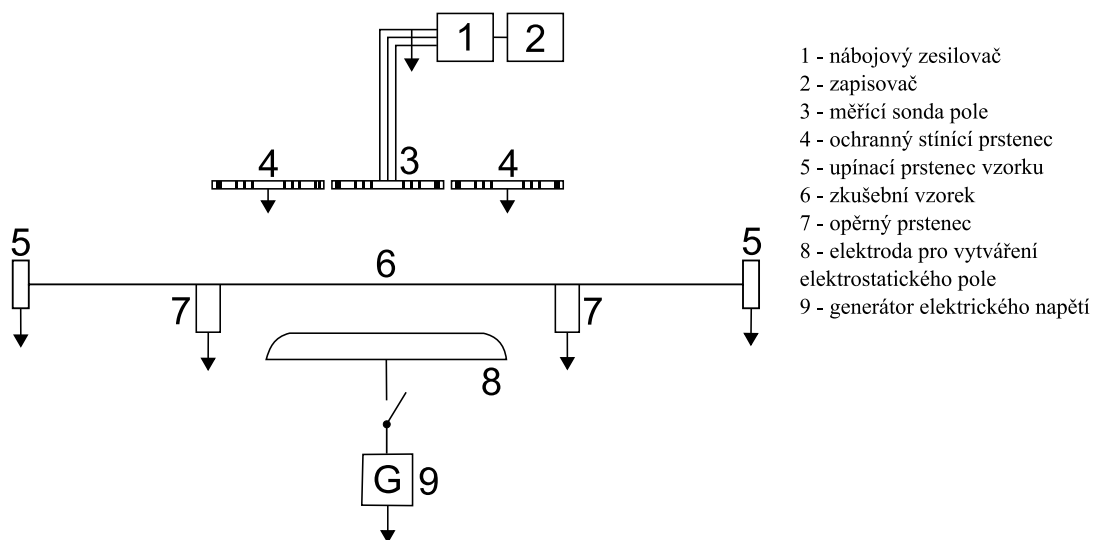
Obr. 9 Uspořádání pro triboelektrické nabíjení vyvinuto v JCI [17]

Toto uspořádání umožňuje měřit přenesený náboj pomocí tření na vzorek materiálu a rychlost jakou se náboj rozptýlí. Měření proběhne pomocí přístroje měřící elektrostatické pole (např. JCI 140) umístěného 100 mm nad vzorkem. Vzorek je napnut na kruhovém rámu o průměru 200 mm, který je umístěn na dřevěné podložce. Ve vzdálenosti 300 mm od vzorku nejsou žádné uzemněné plochy, takže chování náboje na povrchu bude ovlivněno pouze vlastnostmi materiálu. Ke tření vzorku je použita teflonová (PTFE) tyč, která je neutrálního náboje, toho se dá docílit například přiblížením tyče k plameni svíčky. Měřící přístroj zaznamená v počátku krátkou, většinou negativní odchylku, která je způsobena oddělením PTFE tyče od povrchu vzorku. Potom dojde k převrácení polarity, je zaznamenán vrchol naakumulovaného napětí a následné snížení náboje. Hodnoty jsou odečítány automaticky po 0,25 s a následně zpracovány mikroprocesorem nebo pomocí digitálního osciloskopu. Množství náboje přeneseného na povrch vzorku se dá zjistit umístěním teflonové tyče do Faradayovy nádoby, předpokládá se, že na tyči je stejné množství náboje jak na povrchu vzorku, ale má opačnou polaritu. Tato metoda je vhodná pouze pro textilní materiály

a používá se nejčastěji pro srovnání s ostatními metodami. Není vhodná pro komerční využití. [11, 17]

7.1.7 Metoda zkoušení indukčním nabíjením

Tato metoda byla vyvinuta německou firmou Sächsisches Textilforschungsinstitut (STFI). V této metodě je nabíjení vzorku uskutečněno indukčním účinkem. Uspořádání zařízení je na *Obr. 10*.



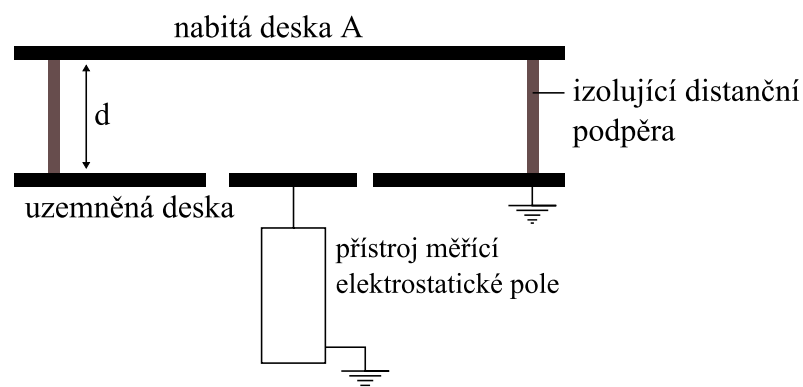
Obr. 10 Uspořádání zařízení pro metodu zkoušení indukčním nabíjením [21]

Vzorek je umístěn ve vodorovné poloze v uzemněném upínacím prstenci, který je ohebný a upevňuje vzorek. Elektroda z korozivzdorné oceli vytvářející elektrostatické pole je umístěna pod vzorkem, připevněná k izolačnímu podstavci. Elektroda je uvnitř opěrného prstence z kovu, který je uzemněný. Snímací zařízení je bezkontaktně umístěno nad vzorkem.

Vhodný zdroj, který je schopný vytvořit skokové napětí 1200 V během 30 μ s, je připojen k elektrodě. Vodivé složky ve vzorku nepropustí část vygenerovaného elektrostatického pole, tento rozdíl je charakteristický pro zkoušený materiál. Tato změna je zaznamenávána pomocí sondy nad vzorkem. Pokud se množství indukovaného napětí na vzorku zvyšuje, tak se zaznamenaná hodnota sondou snižuje. Kovová sonda o průměru 30 mm je umístěna 50 mm nad vrcholem opěrného prstence. Zapisovač by měl mít odezvu 50 μ s nebo menší. Jako vhodný přístroj pro zaznamenávání se hodí osciloskopy s pamětí a nebo počítač s vhodným softwarem. Tato metoda není vhodná na měření chování náboje na povrchu vrstevných materiálů, například nebude měřit plastovou vrstvu umístěnou na plechu. [11, 21]

7.1.8 Charge plate monitor (CPM)

Tato měřicí metoda se používá především pro hodnocení efektivity ionizátorů vzduchu, ale je použitelná i pro analýzu materiálů. CPM se skládá z nabité desky, která je oddělena od uzemněné desky a přístroje měřící elektrostatické pole izolujícími distančními podpěrami *Obr. 11*. CPM nezměří schopnost materiálu rozptýlit náboj na vlastním povrchu, ale pouze určí rychlost, kterou se předmět vybije při uzemnění. Podmínkami pro použití CPM pro analýzu materiálů jsou homogenita a vodivost materiálu. Poměrně důležitý je i co největší kontakt plochy materiálu s deskou A *Obr. 7.11*. [22, 24]



Obr. 11 CPM (převzato z [24])

7.2 Porovnání metod

Porovnání časů snížení náboje u korónového nabíjení a triboelektrického nabíjení pro různé materiály provedl v roce 2000 John Chubb ve spolupráci s British Textile Technology Group (BTTG). Požité metody byly nabíjení korónou a nabíjení pomocí tření. Metoda nabíjení korónou byla vybrána, protože je to jediná metoda, která udává porovnatelné výsledky s triboelektrickým nabíjením a je komerčně dostupná. Konkrétní materiály jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3 Speciální materiály použité při měření v British Textile Technology Group [18]

| Název materiálu | Specifikace |
|-----------------|--|
| PPC 8 | 100 % polyester - na povrchu 20mm pruh vodiče |
| PPC 11 | 65 % polyester, 34 % bavlna, 1 %vlákna s vodivým jádrem v mřížce 8 x 10 mm |
| PPC 12 | 65 % polyester, 34 % bavlna, 1 % ocelový vodič vetkaný ve vláknech |
| PPC 17 | 100 % bavlna s nehořlavou úpravou |
| PPC 20 | 100 % aramid |
| PPC 24 | 97 % aramid, 3% vodivé jádro |
| PPC 27 | polyester s nehořlavou a antistatickou úpravou |
| XP 1 | černý vodivý plastový sáček |
| XP 1 | plastový obal na A4 dokumenty |

Materiály byly posouzeny z hlediska doby snížení náboje a také z hlediska „capacitance loading.“ Možná rizika vytvořená statickou elektřinou mnohdy nezávisí na množství náboje vytvořeného pomocí triboelektrického nabíjení na povrchu materiálu, ale závisí na vlivu tohoto náboje na předměty v okolí. Tento vliv je obvykle charakterizován jako lokální povrchový potenciál nebo elektrické pole, které může způsobit elektrický průraz či vytvořit indukovaný náboj na nedalekém povrchu. Pokud náboj na povrchu materiálu stoupne nad kapacitu v okolí, sníží se potenciál na povrchu generovaný nábojem a také se sníží jeho vliv na okolí. To se označuje jako capacitance loading, který se vypočítá jako celkový přenesený náboj děleno počátečním vrcholem napětí (9). [18]

$$CL = \text{celkový } Q(\text{nC}) / \text{počáteční vrchol napětí (V)} \quad (9)$$

Pro obě metody byly změřeny časy snížení náboje a vypočítány jednotlivé capacitance loading. Výsledky měření jsou uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4 Porovnání triboelektrického nabíjení a nabíjení korónovým výbojem (převzato z [18])

| Vzorek | Triboelektrické nabíjení | | | Nabíjení korónovým výbojem | |
|--------|-----------------------------|-------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|
| | Počáteční vrchol napětí (V) | Doba snížení náboje (s) | Capacitance loading | Doba snížení náboje (s) | Capacitance loading |
| PPC8 | 10 | 3 - 4 | 25 - 84 | 2 | 112 |
| PPC11 | 12 | 7 - 8 | 25 - 37 | 4,5 | 37 |
| PPC12 | 14 | 3 - 5,5 | 25 - 35 | 2,7 | 97 - 345 |
| PPC17 | 350 | 0,65 | 3 - 3,5 | 0,3 - 0,35 | 4 - 11 |
| PPC20 | 300 | 300 - 600 | 12 - 16 | 270 - 320 | - |
| PPC24 | 12 | 7 - 13 | 42 - 50 | 3,4 - 3,8 | 75 |
| PPC27 | 2 | - | 115 | 0,64 | 2600 - 3000 |
| XP1 | 3 | - | 220 | - | - |
| XP2 | 200 | 0,7 - 4 | 2,7 - 2,9 | 0,5 | 5 - 7 |

Doba snížení náboje i capacitance loading jsou pro obě metody obecně srovnatelné, i když větší capacitance loading mnohdy vykazuje metoda nabíjení korónovým nábojem. Podle naměřených výsledků jsou vhodné materiály, které mají dobu snížení náboje menší než 0,2 s nebo pokud je jejich capacitance loading vyšší než 100, jelikož vyšší hodnota capacitance loading značí nižší hodnotu počátečního vrcholu napětí na materiálu. Podle těchto požadavků nejlépe vyhovuje materiál PPC27. [18]

8 Praktická část

Jedním z parametrů, podle kterých se hodnotí a vybírají textilie, je povrchový odpor. Proto jsem provedl praktické měření povrchového odporu jednotlivých zkušebních vzorků textilií, které jsem měl k dispozici. Dále byl změřen odpor vodivých cest, které byly na povrchu textilie vytvořeny sítotiskem.

8.1 Měření povrchového měrného odporu textilií

Byla použita metoda měření pomocí tříelektrodového systému, popsaná v normě ČSN EN 1149-1 [28]. Změřeno bylo sedmnáct různých textilních vzorků. Podle normy má být od každé látky změřeno pět vzorků. Při měření by v místnosti měla být dodržena předepsaná teplota (23 ± 1) °C a relativní vlhkost (25 ± 5) %, v těchto podmínkách by vzorky měly být před měřením 24 hodin kondicionovány.

8.1.1 Ovzduší pro kondicionování a zkoušení

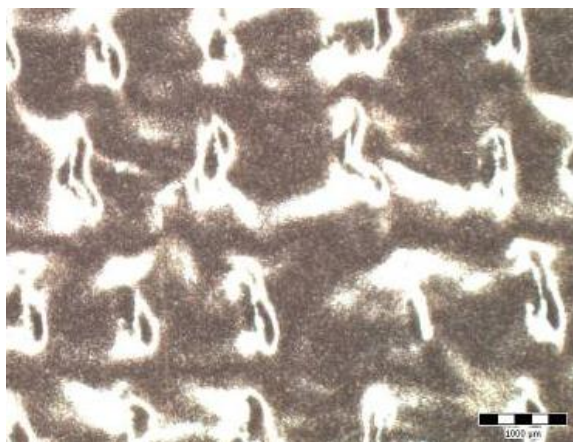
Ovzduší v místnosti mělo 18,8 °C, to je méně než je hodnota uvedená v normě, ale tato odchylka teploty od předepsané nemá výrazný vliv na výsledky měření. Relativní vlhkost v místnosti byla 29,5 %, což odpovídá normované hodnotě. V takovémto prostředí byly vzorky kondicionovány 24 hodin před měřením.

8.1.2 Popis zkušebních vzorků

V Tab. 5 je uveden seznam vzorků, které byly měřeny. Pokud má látka odlišný rub a líc, byl povrchový odpor změřen z obou stran. Vybrané látky jsou zobrazeny na snímcích pořízených stereomikroskopem Olympus Obr. 12 – Obr. 17.

Tab. 5 Seznam měřených vzorků

| Číslo vzorku | Složení textilie | Použití a vlastnosti látky | Barva látky líc | Barva látky rub |
|--------------|--|---|-----------------|-----------------|
| 1 | 64 % bavlna / 35 % polyester / 1 % vodivé vlákno | petrochemie, energetika; nehořlavý | modrá | modrá |
| 2 | 2x pohlinikovaný para-aramidový úplet | speciální reflexní proti sálavému teplu | stříbrná | žlutá |
| 3 | filc aramid / podšívka Lenzing FR® | | černá | šedá |
| 4 | 30 % kevlar / 70 % Panox® | metalurgie; nehořlavý | zelená | zelená |
| 5 | 50% Kermel® / 49% Lenzing FR® / 1% uhlíková vlákna | petrochemie, energetika | černá | černá |
| 6 | 50 % Kermel® / 49 % Lenzing FR® / 1% uhlíkové vlákno | petrochemie, energetika, venkovní prostředí | černá | černá |
| 7 | 50 % Kermel® / 50 % Lenzing FR® | | šedá | bílá |
| 8 | 53 % Kermel® / 39 % Lenzing FR® / 6 % technora / 2 % uhlíková vlákna | hasičský zásahový oblek | modrá | modrá |
| 9 | 100 % polyester | | bílá | bílá |
| 10 | 50 % aramid / 50 % Lenzing FR® | | světle šedá | tmavě šedá |
| 11 | 50 % Lenzing FR® / 50 % přírodní a umělá vlákna | hutní a sklářský průmysl | černá | černá |
| 12 | 100 % bavlna | svářečský průmysl | modrá | modrá |
| 13 | pohlinikovaný 100 % aramid / preox | extrémní teplotní podmínky | stříbrná | žlutá |
| 14 | dvojitě pohlinikovaný 100 % aramid / preox | extrémní teplotní podmínky | stříbrná | žlutá |



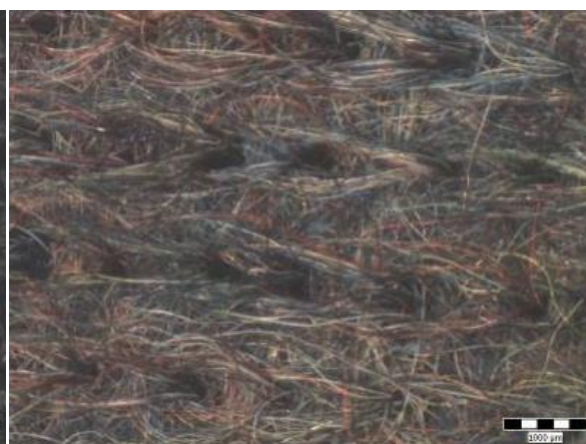
Obr. 12 Vzorek číslo 2



Obr. 13 Vzorek číslo 3



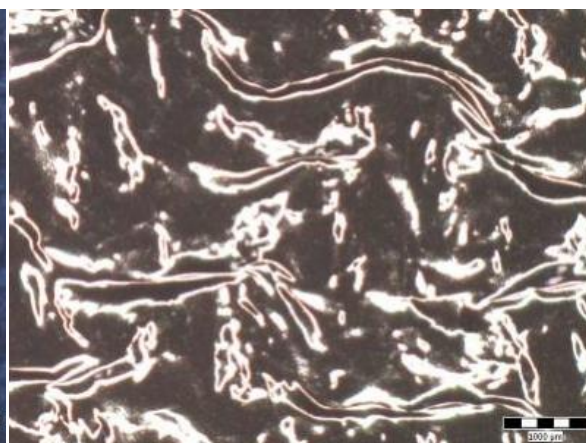
Obr. 14 Vzorek číslo 5



Obr. 15 Vzorek číslo 10



Obr. 16 Vzorek číslo 12



Obr. 17 Vzorek číslo 13

8.1.3 Použité měřicí přístroje



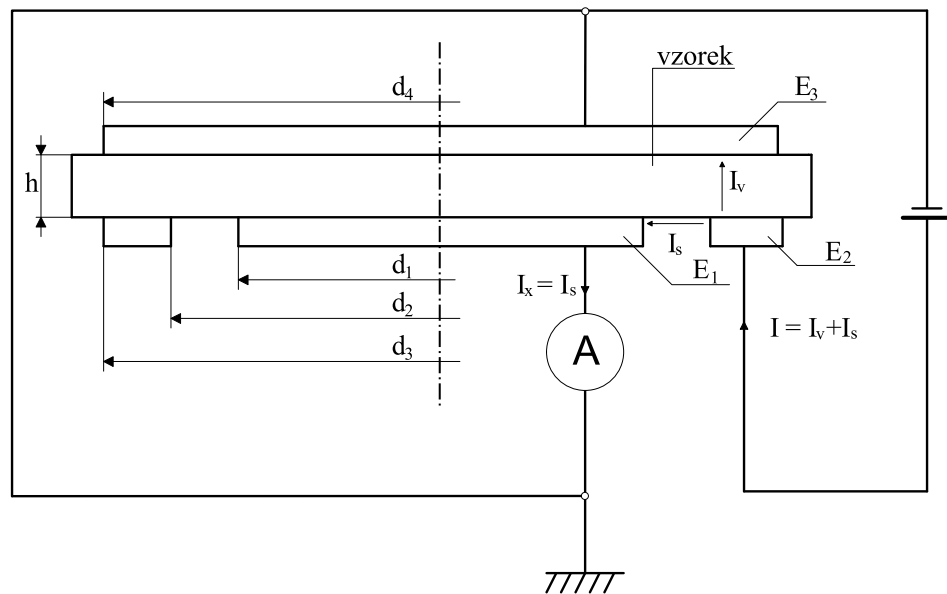
Obr. 18 Surface Resistance Probe Model: 880



Obr. 19 Metrizo 2000 (převzato z [25])

8.1.4 Postup měření

Bylo postupováno dle ČSN EN 1149-1 [28]. Vzorek se umístí na podložku, která má izolační odpor nejméně $10^{14} \Omega$. Zkoušený povrch je obrácen směrem nahoru a na něj se umístí soustava elektrod, které jsou zapojeny podle *Obr. 20*. Použita byla sestava Surface Resistance Probe Model: 880 *Obr. 18*.



Obr. 20 Schéma zapojení pro měření povrchového odporu [10]

Povrchový odpor byl měřen přístrojem Metriso 2000 *Obr. 19*. Nastaveno bylo zkušební stejnosměrné napětí 100 V a pro každý vzorek byla odečtena hodnota povrchového odporu. Pokud byla hodnota odporu menší než $10^3 \Omega$, tak bylo použito napětí 10 V. Z naměřených pěti hodnot byl vypočítán geometrický průměr povrchového odporu. Z geometrického průměru byl nakonec vypočítán povrchový měrný odpor ze vztahu (8).

8.1.5 Výsledky měření

Tab. 6 Naměřené a vypočítané hodnoty jednotlivých vzorků

| Číslo vzorku | Barva měřené strany | Měřená strana | Povrchový odpor [GΩ] | Povrchový měrný odpor [GΩ] |
|--------------|---------------------|---------------|----------------------|----------------------------|
| 1 | modrá | rub, líc | 70,4 | 689 |
| 2 | stříbrná | líc | < 1 kΩ při 10 V | < 10 kΩ při 10 V |
| | žlutá | rub | > 1 TΩ | > 10 TΩ |
| 3 | černá | líc | > 1 TΩ | > 10 TΩ |
| | šedá | rub | 33,8 | 331 |
| 4 | zelená | rub, líc | > 1 TΩ | > 10 TΩ |
| 5 | černá | rub, líc | 9,4 | 92 |
| 6 | černá | rub, líc | 9,0 | 88 |
| 7 | šedá | líc | 314,2 | 3076 |
| | bílá | rub | 209,7 | 2053 |
| 8 | modrá | rub, líc | 20,3 | 199 |
| 9 | bílá | rub, líc | 35,2 | 344 |
| 10 | světle šedá | líc | 104,9 | 1027 |
| | tmavě šedá | rub | 118,7 | 1162 |
| 11 | černá | rub, líc | 21,5 | 210 |
| 12 | modrá | rub, líc | 83,6 | 819 |
| 13 | stříbrná | líc | < 1 kΩ při 10 V | < 10 kΩ při 10 V |
| | žlutá | rub | 506,0 | 4953 |
| 14 | stříbrná | líc | < 1 kΩ při 10 V | < 10 kΩ při 10 V |
| | žlutá | rub | 45,3 | 443 |

8.1.6 Zhodnocení výsledků měření povrchového odporu

Podle požadavků na materiál ochranného či pracovního oděvu dle normy EN 1149-5 [30], které zní:

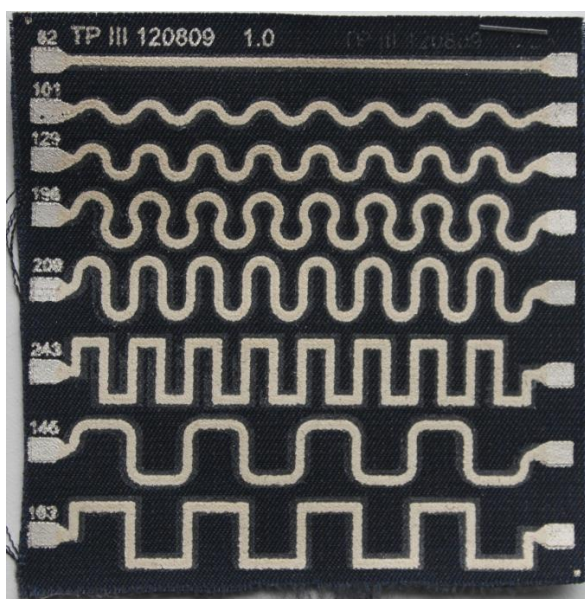
- $t_{50} < 4$ s nebo $S > 0,2$ zkoušeným podle EN 1149-3 [21], zkušební metoda 2 (indukční nabíjení)
- povrchový odpor menší nebo roven $2,5 \cdot 10^9 \Omega$, nejméně na jednom povrchu, zkoušeném podle EN 1149-1 [28]

Těmto požadavkům vyhovují vzorky materiálů s číslem 2, 13, 14, které mají povrchový odpor $< 1 \text{ k}\Omega$. Všechny tyto vyhovující látky mají pohliníkovanou svrchní vrstvu.

Pokud bychom požadovali výborné izolační vlastnosti, tak by nejlépe vyhovovaly materiály s číslem 3, 4 a ještě materiál 2, ale pouze z rubové strany. Tyto materiály jsou vhodnými kandidáty pro použití v oblasti inteligentních textilií, ale dalším důležitým parametrem je struktura látky. Na takovéto textilie se dají tisknout vodivé motivy, antény nebo do nich lze vodivé motivy vyšívat.

8.2 Odpor vodivých cest

Cílem měření bylo zjistit odpor vodivých cest na vybraných textiliích a porovnání hodnot odporů po přepočítání na měrný odpor. Bylo měřeno šest vzorků s nanesenými vrstvami pomocí sítotisku. Jeden ze vzorků je zobrazen na *Obr. 21*. Vodivá pasta byla nanášena na jedné nebo dvou izolujících vrstvách a poté překryta další izolující vrstvou.



Obr. 21 Zkušební vorek pro měření vodivých cest

8.2.1 Složení vodivé pasty

Vodivá pasta nese označení Fabink-UV-AG2. Je to pasta, která jako vodivou složku obsahuje stříbro, je na bázi akrylátové pryskyřice a vytvrzuje se pomocí ultrafialového záření. Před vytvrzením je pasta téměř nevodivá, proto je důležité pastu nechat vytvrdit, než se na ní nanese izolující vrstva. Tato pasta může být aplikována na různé textilie, polyester/bavlna, Lycra®, Kapton® atd. Po vytvrzení má dobrou přilnavost a flexibilitu.

8.2.2 Složení izolující vrstvy

Tuto vrstvu tvoří Kapton®. Jedná se o polyimid, vznikající bipolykondenzační reakcí aromatického dianhydridu a aromatického diaminu. Tento materiál je dodáván jako fólie. Má velmi dobré elektrické vlastnosti např. $E_p = 7,7$ kV/mm, $\epsilon_r = 3 - 3,5$, $\rho_v = 1,5 \cdot 10^{17} \Omega \cdot \text{cm}$. Krátkodobě je Kapton schopen pracovat při teplotách od -120 do 350 °C. [26]

8.2.3 Materiály nosných textilií

Byly použity dva materiály, které byly vybrány na základě předchozího měření viz. kapitola 8.1. Dalším kritériem byla vhodná struktura textilie na tisk, takže nerozhodoval pouze povrchový měrný odpor. Konkrétní materiály:

- 53 % Kermel® / 39 % Lenzing FR® / 6 % Technora / 2 % uhlíková vlákna, povrch ošetřen fluor – uhlíkovou úpravou proti vodě a chemikáliím
- 50 % Kermel® / 50 % Lenzing FR®

Každý vzorek byl také označen (např. 2kp/1ag/1kp), to znamená dvě vrstvy Kaptonu®, jedna vrstva vodivé stříbrné pasty a jedna vrstva Kaptonu® jako krycí vrstva.

8.2.4 Použité měřicí přístroje

Pro měření odporu vodivých cest byl použit multimetr Keithley 2700 *Obr. 22*, který umožňuje zapojení se čtyřmi vodiči. Výhodou toho zapojení je, že je možné zanedbat odpor přívodních vodičů. Pro přesnost měření je to velmi důležité, protože byly očekávány nízké hodnoty odporů vodivých cest.



Obr. 22 Keithley 2700 (převzato z [27])

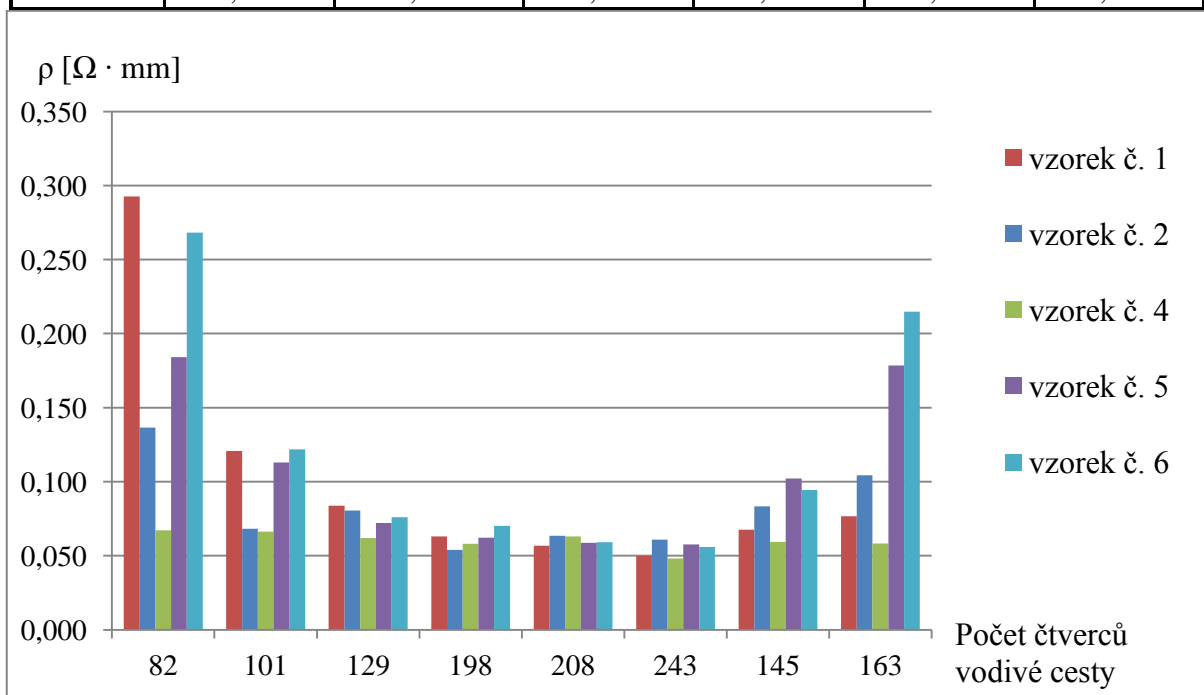
8.2.5 Postup měření

Jednotlivé cesty byly měřeny na krajích, kde nebyla nanesena vrchní izolační vrstva. Čísla vedle cest znamenají počet čtverců vodivé dráhy. Měření bylo provedeno pomocí čtyřvodičového zapojení, byly změřeny všechny vodivé cesty na šesti vzorcích. Veškeré hodnoty byly odečítány 3 s po přiložení měřících sond. Odečtené hodnoty odporu byly poté přepočteny na měrný odpor.

8.2.6 Výsledky měření

Tab. 7 Naměřené hodnoty vodivých cest

| Číslo vzorku | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Barva | modrá | modrá | modrá | modrá | šedá | šedá |
| Vrstvy | 2kp/1ag/ 1kp | 1kp/1ag/ 1kp | 2kp/1ag/ 1kp | 1kp/1ag/ 1kp | 1kp/1ag/ 1kp | 1kp/1ag/ 1kp |
| Cesta | ρ [$\Omega \cdot \text{mm}$] | ρ [$\Omega \cdot \text{mm}$] | ρ [$\Omega \cdot \text{mm}$] | ρ [$\Omega \cdot \text{mm}$] | ρ [$\Omega \cdot \text{mm}$] | ρ [$\Omega \cdot \text{mm}$] |
| 82 | 0,293 | 0,137 | 0,463 | 0,067 | 0,184 | 0,268 |
| 101 | 0,121 | 0,068 | 0,317 | 0,066 | 0,113 | 0,122 |
| 129 | 0,084 | 0,081 | 1,550 | 0,062 | 0,072 | 0,076 |
| 198 | 0,063 | 0,054 | 0,606 | 0,058 | 0,062 | 0,070 |
| 208 | 0,057 | 0,063 | 0,106 | 0,063 | 0,059 | 0,059 |
| 243 | 0,050 | 0,061 | 0,035 | 0,048 | 0,058 | 0,056 |
| 145 | 0,068 | 0,083 | 0,048 | 0,059 | 0,102 | 0,094 |
| 163 | 0,077 | 0,104 | 0,058 | 0,058 | 0,179 | 0,215 |



Obr. 23 Naměřené odpory cest jednotlivých měřených vzorků

8.2.7 Zhodnocení výsledků měření odporu vodivých cest

Tato metoda aplikace vodivých cest na textilie se jeví jako výhodná, protože výsledky odporů, respektive vodivosti, jsou velmi dobré. Další výhodou je velmi dobrá mechanická odolnost a možnost zavedení sériové výroby, díky které by tato metoda byla poměrně levná záležitost. Z výsledků na *Obr. 23* se dá vyzporovat, že cesty na krajích vzorků měly větší odpor než ostatní cesty umístěné dál od kraje. Tento jev mohl být způsoben zhoršením kvality tisku na krajích vzorků. Nejlepší kvality dosahují cesty uprostřed vzorku, ale ty na krajích mají sníženou kvalitu. Dalším důvodem může být větší mechanické namáhání krajních vodivých cest. Do *Obr. 23* nebyly zařazeny naměřené hodnoty ze vzorku č. 3, protože hodnota cesty 129 vyšla třikrát vyšší oproti ostatním vzorkům. Tato chyba mohla nastat například znečištěním vodivé pasty při tisknutí, a z toho důvodu se zvýšil její odpor.

Závěr

V bakalářské práci jsou popsány metody, podle kterých se vybírají textilní materiály vzhledem k jejich elektrostatickým vlastnostem. Základní parametr pro výběr je povrchový a vnitřní odpor. Tyto parametry však nejsou vždy dostačující a je potřeba měřit snížení náboje. Tomuto tématu je věnována hlavní část celé práce.

Bylo popsáno osm metod měření snížení náboje. Dvě jsou uvedeny v české normě ČSN EN 1149-3, zbylých šest bylo popsáno s užitím zahraničních zdrojů. Metody se značně liší v nabíjení měřeného materiálu. Některé využívají korónový výboj, triboelektrické nabíjení nebo nabíjení pomocí indukce. Komerčně jsou dostupné pouze tři přístroje reprezentující tři metody měření snížení náboje.

Z hlediska provedení i konstrukce je nejjednodušší metoda využívající tření pomocí PTFE tyče. Touto metodou lze měřit rychlost snížení náboje a také množství přeneseného náboje na měřený vzorek. Tato metoda není vhodná pro komerční použití, využitelnost najde spíše v laboratorním prostředí. Je vhodná pro srovnání s ostatními metodami. Metoda zkoušení nabíjením korónovým výbojem udává srovnatelné výsledky. Je komerčně dostupná a dokáže také měřit množství přeneseného náboje. V české normě ČSN EN 1149-3 jsou popsány dvě metody snížení náboje. První je metoda využívající triboelektrické nabíjení, která je komerčně dostupná. Druhá je metoda zkoušení indukčním nabíjením, není komerčně dostupná a není vhodná pro měření vrstevných materiálů, je vhodná pouze pro měření textilií.

V poslední části práce bylo provedeno praktické měření povrchového odporu textilních vzorků. Povrchový odpor byl měřen podle normy ČSN EN 1149-1. Vzorky, které podle naměřených výsledků odpovídají normě ČSN EN 1149-5, jsou vzorky materiálů s číslem 2, 13, 14, všechny mají hliníkovou svrchní vrstvu. Na základě měření povrchového odporu a struktury povrchu byly vybrány dva vzorky s číslem 7 a 8, na které byly natištěny vodivé cesty. Hlavním úkolem bylo měření odporu těchto cest a určení měrného odporu, kvůli porovnání jednotlivých cest. Z *Obr. 23* je patrné, že měrný odpor vodivých cest, které jsou umístěny v prostřední části vzorku, je téměř totožný. Na krajích vzorků se měrný odpor značně lišil především z důvodu nekvalitního tisku.

Přínosem bakalářské práce je vypracování přehledu metod měření snížení náboje. Takovýto ucelený přehled v českém jazyce doposud nebyl k dispozici.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ESD Fundamentals: Fundamentals of Electrostatic Discharge Part One—An Introduction to ESD. [online]. [cit. 2013-04-15]. Dostupné z: <http://www.esda.org/fundamentalsP1.html>
- [2] DŘINEK, Milan. ESD (ElectroStatic Discharge). [online]. 2000 [cit. 2013-04-17]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/esd-electrostatic-discharge.html>
- [3] HAŇKA, Ladislav. *Teorie elektromagnetického pole*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1982.
- [4] VACULÍKOVÁ, Polina. *Elektromagnetická kompatibility elektrotechnických systémů: Praktický průvodce techniky omezení elektromagnetického vř rušení*. 1. vyd. Praha: Grada, 1998, 487 s. ISBN 80-716-9568-8.
- [5] HORSKÝ, Pavel. *Elektrostatický výboj a jeho vliv na spolehlivost integrovaných obvodů (1. část)*. Automa: časopis pro automatizační techniku [online]. Praha: FCC Public, 2009 [cit. 2013-04-19]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=39904
- [6] Jak zvlhčováním předejít vzniku elektrostatické elektřiny. Drekoma: Zvlhčovací systémy a vlhkoměry [online]. [cit. 2013-04-19]. Dostupné z: <http://www.drekoma.cz/zvlhcovani/jak-zvlhcovanim-predejiti-vzniku-elektrostaticke-elektřiny>
- [7] MARYNIAK, William, Toshio UEHARA a Maciej NORAS. TREK, INC. *Surface Resistivity and Surface Resistance Measurements: Using a Concentric Ring Probe Technique* [online]. [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: http://www.trekinc.com/pdf/1005_Resistivity_Resistance.pdf
- [8] VIK, Michal. *FINÁLNÍ ÚPRAVY X* [online]. [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: <http://www.ft.tul.cz/depart/ktc/dokumenty/fut/10%20FIN.pdf>
- [9] MARŠÁLKOVÁ, Miroslava a Zdeňka LEDROVÁ. *Textilie pro speciální aplikace: Bariérové textilie* [online]. Technická univerzita v Liberci, Fakulta textilní [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: [http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.1_zaverecne_zpravy/\[3.1.01\].pdf](http://centrum.tul.cz/centrum/centrum/3Aplikace/3.1_zaverecne_zpravy/[3.1.01].pdf)
- [10] KACPRZYK, Ryszard. *Measurements of the Volume and Surface Resistance of Textile Materials* [online]. Institute of Electrical Engineering Fundamentals Wrocław University of Technology [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: <http://www.fibtex.lodz.pl/2011/1/47.pdf>
- [11] CHUBB, John. JOHN CHUBB INSTRUMENTATION. *Comments on methods for charge decay measurement* [online]. [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: <http://www.chilworth.co.uk/media/124098/CommentsonChargeDecayMethods.pdf>

- [12] Static Decay Meter: Model: 406D. [online]. [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: <http://www.electrotechsystems.com/Products.aspx?ProdID=170962>
- [13] POLYMERTEST. Přístroj pro stanovení elektrostatických vlastností ochranných oděvů: Metoda zkoušení pro měření snížení náboje 1 [online]. Zlín, 2008 [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: <http://www.polymer-test.cz/data/file/16a-detailni-popis.pdf>
- [14] CHUBB, John. JOHN CHUBB INSTRUMENTATION. *JCI 155v5 Charge Decay Test Unit* [online]. [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: <http://www.infostatic.co.uk/Leaflets/JCI155v5.pdf>
- [15] CHUBB, John. JOHN CHUBB INSTRUMENTATION. *Experimental comparison of the electrostatic performance of materials with tribocharging and with corona charging* [online]. [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: <http://www.infostatic.co.uk/cache/Tribo-corona-comparison.pdf>
- [16] CHUBB, John. *Journal of electrostatics: Corona charging of practical materials for charge decay measurements* [online]. 1996 [cit. 2013-05-27]. ISSN 0304-3886. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0304388695000593>
- [17] CHUBB, John. *IEEE transaction on industry applications: Measurement of Tribo and Corona Charging Features of Materials for Assessment of Risks from Static Electricity* [online]. 2000 [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=887201&tag=1>
- [18] CHUBB, John. *Journal of electrostatics: New approaches for electrostatic testing of materials* [online]. 2002 [cit. 2013-05-27]. ISSN 0304-3886. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304388601001565>
- [19] HEALD, James. NASA KENNEDY SPACE CENTER. *Electrostatic and Surface Physics Laboratory: Triboelectric Charging Measurements* [online]. [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: <http://empl.ksc.nasa.gov/Services/robot/robot.htm>
- [20] LEE, Rupert. *Standard test method for evaluating triboelectric charge generation and decay*. NASA Doc: MMA-1985-79 Rev 3 Feb 1998.
- [21] ČSN EN 1149-3. *Ochráné oděvy - elektrostatické vlastnosti: Část 3 - Metody zkoušení pro měření snížení náboje*. Výzkumný ústav bezpečnosti práce Praha, 2004.
- [22] VIHARIÄKOSKI, Toni. CASCADE METROLOGY. *Charge Decay Test in Material Analysis* [online]. [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: <http://www.cascademetrology.com/Laboratory/C165%202011%20v%2010%20Charge%20Decay%20EN.pdf>
- [23] CHUBB, John, John HARBOUR a Ian PAVEY. *'Stutter timing' for charge decay time measurement* [online]. [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: http://iopscience.iop.org/1742-6596/301/1/012045/pdf/1742-6596_301_1_012045.pdf
- [24] NIELS, Jonassen. *Neutralization of Static Charges by Air Ions: Part II, Experimental Results* [online]. [cit. 2013-05-27]. Dostupné z: <http://www.ce-mag.com/archive/02/05/mrstatic.htm>

- [25] ELPRO, s.r.o. Esdshop.cz [online]. [cit. 2013-05-29]. Dostupné z: <http://www.esdshop.eu/shop/index.php?page=vyrobok&psk=123&rozbal=102&id=563&lang=cz>
- [26] MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006, 235 s. ISBN 80-730-0189-6.
- [27] FIEDLER SCIENTIFIC INSTRUMENTS S.R.O. Keithley Instruments 2701 Multimeter [online]. [cit. 2013-05-30]. Dostupné z: http://www.coleparmer.com/Product/Keithley_Instruments_2701_Multimeter_Data_Acquisition_System_with_2_Slots_and_Ethernet_Capability/EW-20044-8
- [28] ČSN EN 1149-1. *Ochráné oděvy - elektrostatické vlastnosti: Část 1 - Zkušební metoda pro měření povrchového měrného odporu*. Výzkumný ústav bezpečnosti práce Praha, 2007.
- [29] ČSN EN 1149-2. *Ochráné oděvy - elektrostatické vlastnosti: Část 2 - Zkušební metoda pro měření vnitřního odporu*. Výzkumný ústav bezpečnosti práce Praha, 1998.
- [30] ČSN EN 1149-5. *Ochráné oděvy - elektrostatické vlastnosti: Část 5 - Materiálové a konstrukční požadavky*. Výzkumný ústav bezpečnosti práce Praha, 2008.