

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Pracoviště pro testy elektrostatickým výbojem

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2014/2015

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

Jméno a příjmení: **Martin CWIENCZEK**
Osobní číslo: **E12B0008K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Pracoviště pro testy elektrostatickým výbojem**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Popište elektrostatický výboj a jeho působení.
2. Zpracujte postup zkoušky odolnosti proti elektrostatickému výboji.
3. Navrhněte zkušební pracoviště tak, aby odpovídalo požadavkům norem.
4. Realizujte test odolnosti v tomto pracovišti.

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

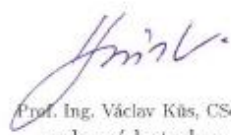
1. **Technická norma ČSN EN 61000-4-4**
2. **Svačina: Encyklopedie elektromagnetické kompatibility**

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Miroslav Hromádka, Ph.D.**
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**
Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá elektromagnetickou susceptibilitou (EMS) v oblasti odolnosti elektronických zařízení vůči elektrostatickému výboji (ESD). V teoretické části jsou stručně popsány fyzikální vlastnosti elektrostatického pole, vznik a účinky elektrostatického výboje. Jsou zde uvedeny metody testování odolnosti elektronického zařízení vůči elektrostatickému výboji a jejich vlastnosti. V praktické části je uveden návrh ESD pracoviště pro zkoušku odolnosti elektronického zařízení vůči elektrostatickému výboji v souladu s normou ČSN EN 61000-4-2. Byla provedena praktická zkouška na referenčním ESD pracovišti fakulty elektrotechniky, katedře elektroenergetiky a ekologie v Plzni.

Klíčová slova

elektrostatický výboj, ESD, vazební rovina, referenční zemní rovina

Abstract

This bachelor thesis deals with electromagnetic susceptibility (EMC) of electronic equipment immunity to electrostatic discharge (ESD). The theoretical section briefly describes the physical characteristics of the electrostatic field, its formation and the effects of electrostatic discharge. Are listed the methods for testing the immunity of electronic devices against the electrostatic discharge and their properties. The practical part includes the draft of ESD workplace for testing of electronic devices against the electrostatic discharge in accordance with the standard DIN EN 61000-4-2. The practical ESD immunity test was realized on the reference workplace on the Faculty of Electrical Engineering, Department of Electrical Power and ecology in Pilsen.

Key words

electrostatic discharge, coupling plane, ground reference plane

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 5.6.2015

Martin Cwieniczek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Miroslavovi Hromádkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

Obsah	8
Seznam symbolů a zkratk	10
Úvod	11
1 Teoretická část	12
1.1 Elektrostatické pole - základní pojmy a vlastnosti	12
1.1.1 Intenzita elektrostatického pole	13
1.1.2 Potenciál elektrostatického pole	14
1.1.3 Elektrické napětí a práce elektrostatického pole	15
1.1.4 Gaussova věta elektrostatiky	15
1.2 Materiály v elektrostatickém poli	17
1.2.1 Nenabitý vodič v elektrostatickém poli	17
1.2.2 Izolant v elektrostatickém poli	18
1.2.3 Elektrická pevnost	18
2 Vznik elektrostatického náboje	20
2.1 Způsoby vzniku elektrostatického náboje	21
2.1.1 Triboelektrický jev	21
2.2 Vznik elektrostatického výboje	22
2.2.1 Jiskrové výboje	23
2.2.2 Korónové výboje	23
2.2.3 Trsové výboje	24
2.2.4 Postupující trsové výboje	24
2.2.5 Kuželové výboje	24
2.3 Zánik elektrostatického výboje	24
3 Metody testování odolnosti proti ESD	26
3.1 Výboj vzduchovou mezerou	29
3.2 Kontaktní výboj	29
3.3 Výboj na svislou nebo vodorovnou vazební desku	31
3.4 Kritéria pro vyhodnocení zkoušky	32
4 Parametry laboratorního pracoviště	33
4.1 Zkušební sestava pro zařízení umístěného na stole	33
4.2 Zkušební sestava pro zařízení umístěného na podlaze	34
4.3 Prostředí	34

5	Návrh pracoviště pro elektrostatické výboje	35
6	Zkouška zařízení	38
6.1	Zkouška přímým výbojem	38
6.2	Zkouška nepřímým výbojem.....	39
6.3	Zkouška vzduchovým výbojem	39
6.4	Výsledky zkoušky	40
6.4.1	Test odolnosti proti elektrostatickému výboji.....	40
7	Závěr	42
	Seznam literatury	43
	Seznam obrázků.....	45
	Seznam tabulek.....	45

Seznam symbolů a zkratek

A	práce [J]
C	kapacita tělesa [F]
C _s	vybíjecí kondenzátor [F]
d, r	vzdálenost [m]
F	síla [N]
Q, q	elektrický náboj [C]
Q _e	povrchový náboj [C]
R	elektrický odpor [Ω]
S, s	plocha [m ²]
U	elektrický potenciál [V]
W	energie [J]
ε _r	relativní permitivita prostředí [-]
ε ₀	permitivita vakua = 1/(μ ₀ c ²) ≈ 8,854.10 ⁻¹² [F/m]
μ ₀	permeabilita vakua = 4π.10 ⁻⁷ [H/m]
σ	plošná hustota náboje = Q/S [C/m ²]
GPR	referenční zemní rovina
ESD	elektrostatický výboj
VCP	svislá vazební rovina
HCP	vodorovná vazební rovina

Úvod

Se vznikem elektrostatického pole a jeho vlivy na předměty v bezprostředním okolí se setkáváme běžném životě velmi často. K negativním vlivům elektrostatického pole patří zejména indukce elektrického náboje a elektrostatický výboj, které mají destruktivní účinek na citlivá elektronická zařízení. Problematikou odolnosti zařízení vůči uvedeným vlivům se zabývá specifická oblast elektrotechniky zvaná Elektromagnetická susceptibilita - EMS, která je součástí oblasti elektrotechniky oblastí Elektromagnetické kompatibility - EMC. Mezinárodní normy řady ČSN EN 61000 stanovují testovací metody kritéria elektromagnetické imunity pro elektrická a elektronická zařízení. Bakalářská práce řeší sestavu testovacího pracoviště pro reprodukovatelné ověření odolnosti elektrických a elektronických zařízení vůči elektrostatickému výboji v souladu s normou ČSN EN 61000-4-2.

V teoretické části práce je stručně shrnuta teorie elektrostatického pole v rozsahu potřebném k tématu práce. Popisuje základní vlastnosti elektrostatického pole, chování základních typů materiálů v elektrostatickém poli a podmínky vzniku elektrostatického výboje. Z teoretické části vyplývají požadavky na konstrukci zařízení a způsoby testování odolnosti zařízení vůči elektrostatickému výboji. Další část práce řeší návrh testovacího pracoviště pro testování zařízení elektrostatickým výbojem. Na realizovaném pracovišti je provedena zkouška elektronického zařízení elektrostatickým výbojem dle citované normy. Stejná zkouška je provedena na referenčním pracovišti. Porovnáním výsledků obou zkoušek se posoudí správnost řešení testovacího pracoviště.

1 Teoretická část

1.1 Elektrostatické pole - základní pojmy a vlastnosti

Dílejší částí obecné teorie elektromagnetického pole je teorie elektrostatického pole, která se zabývá vlastnostmi a vzájemným působením elektricky nabitých hmotných částic nebo těles, které se vzájemně nepohybují. [1]

Elektrický náboj Q je skalární veličina, která určuje míru stavu elektrování hmotné částice nebo tělesa se kterou je vždy svázán. Elektrovaná hmotná částice nebo těleso vytváří ve svém okolí elektrické pole, které se projevuje silovým působením na ostatní elektricky nabitě hmotné částice v tomto okolí. Dle přijaté konvence rozlišujeme elektrický náboj dvojího druhu – kladný a záporný. Jednotkou elektrického náboje je coulomb [C]. Nejmenší, nedělitelný náboj je elementární náboj. [2]

$$e = 1,6021 \cdot 10^{-19} \quad [C] \quad (1)$$

Ve struktuře atomu je nositelem kladného elementárního náboje ($+e$) proton a nositelem záporného elementárního náboje ($-e$) je elektron.

Pro elektrický náboj platí tyto zákony:

Zákon kvantování: Každý elektrický náboj Q je kvantovaný po celistvých násobcích elementárního náboje. Platí tedy

$$Q = n \cdot e \quad [C]. \quad (2)$$

Zákon zachování náboje: V elektricky izolované soustavě je úhrnný elektrický náboj konstantní. Platí tedy

$$\sum_n Q_i = konst \quad [C]. \quad (3)$$

Zákon invariantnosti náboje: Náboj je relativistický invariant. Při pohybu se nemění.

Zákon silového působení nábojů: Dva nepohybující se elektrické náboje Q_1 a Q_2 působí na sebe navzájem elektrostatickou silou \vec{F}_{12} , která je definována Coulombovým zákonem

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \cdot \frac{Q_1Q_2}{r^2} \cdot \vec{r}_0 \quad [N], \quad (4)$$

kde \vec{r}_0 je jednotkový vektor:

$$\vec{r}_0 = \frac{\vec{r}}{|r|} \quad [-]. \quad (5)$$

Ze vztahu (4) plyne, že silové působení nábojů klesá s kvadrátem jejich vzdálenosti a nabývá tedy významu zejména při malých vzdálenostech. Elektrické náboje opačné

polarity se navzájem přitahují. Elektrické náboje stejné polarity se naopak navzájem odpuzují. Nelze je proto seskupovat do stejného bodu prostoru. Elektrostatická síla je ve srovnání s gravitační silou mnohonásobně větší.

Zákon superpozice náboje: Výsledné silové působení několika elektrických nábojů je superpozicí působení jednotlivých elektrických nábojů. [2]

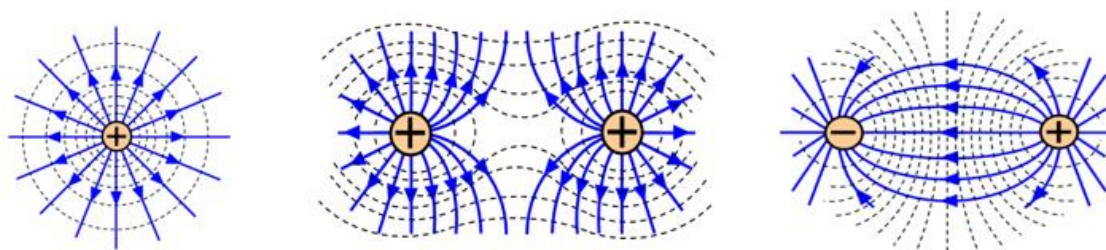
1.1.1 Intenzita elektrostatického pole

Intenzita elektrostatického pole náboje Q je odvozena ze silového účinku elektrického pole na jednotkový (zkušební) elektrický náboj Q_0

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \cdot \frac{Q}{r^2} \cdot \vec{r}_0 \quad [\text{N/C}]; [\text{V/m}]. \quad (6)$$

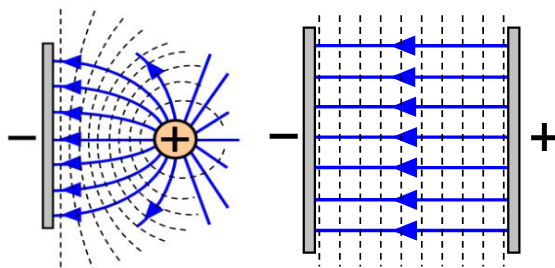
Intenzita elektrostatického pole je vektorová veličina. Znárodnuje se pomocí soustavy siločar elektrostatického pole, které představují směr silového působení elektrostatického pole v prostoru. Siločáry jsou tedy orientované křivky, v jejímž každém bodě je vektor intenzity pole \vec{E} tečný. Siločáry vycházejí z kladných nábojů a končí na záporných nábojích. Elektrostatické pole má konzervativní charakter, protože s rostoucí vzdáleností od náboje má klesající tendenci. [2]

Na obr. 1 jsou modře znázorněny siločáry elektrického pole osamocené bodového náboje (vlevo) dvojice bodových nábojů stejné polarity (uprostřed) a dvojice bodových nábojů opačné polarity (vpravo).



Obr. 1 Zobrazení pole bodových nábojů. [1]

Na obr. 2 jsou zobrazeny specifické případy tvaru elektrostatického pole mezi bodovým nábojem a nekonečně dlouhou deskou s rovnoměrnou hustotou náboje a mezi dvěma nekonečně dlouhými nabitými deskami.



Obr. 2 Rozložení pole mezi dvěma deskami a mezi nábojem a deskou. [1]

1.1.2 Potenciál elektrostatického pole

Potenciál elektrostatického pole φ je skalární veličina charakterizující potenciální energii náboje Q_0 v elektrostatickém poli. Odvozuje se z práce A , kterou vykoná elektrostatické pole při přemístění náboje Q_0 po křivce l mezi dvěma body prostoru M - N (7), nebo práce vnější síly A_V , která tento náboj Q_0 přemístí v elektrostatickém poli za stejných podmínek (8). (Obě práce se liší znaménkem.)

$$A = Q_0 \oint_M^N \vec{E} d\vec{l} \quad [\text{J}], \quad (7)$$

$$A_V = -Q_0 \oint_M^N \vec{E} d\vec{l} \quad [\text{J}]. \quad (8)$$

Přemístěním náboje Q_0 v elektrostatickém poli \vec{E} se vykonanou prací změnila potenciální energie ΔW_p a platí dle

$$\Delta W_p = W_{pM} - W_{pN} = -Q_0 \oint_N^M \vec{E} d\vec{l} \quad [\text{J}]. \quad (9)$$

Z rovnice (9) je potenciální energie v bodech M, N prostoru určena až na obecnou konstantu C , vznikající při integraci funkce. Tu lze odstranit volbou bodu, kde je nulová potenciální energie. Pro konzervativní elektrostatické pole se tento bod nachází v ∞ . (Kterým je prakticky buď vodivá vztažná referenční rovina, nebo povrch země.) Úpravou rovnice (9) pak dostaneme obecný vztah pro potenciální energii v bodě M

$$W_{pM} = -Q_0 \oint_\infty^M \vec{E} d\vec{l} = Q_0 \oint_M^\infty \vec{E} d\vec{l} \quad [\text{J}]. \quad (10)$$

Potenciální energie náboje Q_0 je tedy rovna práci vnější síly, která je potřebná k přenesení tohoto náboje z ∞ do bodu M v elektrostatickém poli. (Nebo opačně – práci, kterou vykoná elektrostatické pole při přenesení náboje Q_0 z bodu M do ∞ .)

Potenciál elektrostatického pole v bodě M je

$$\varphi_M = \frac{W_{pM}}{Q_0} = - \oint_{\infty}^M \vec{E} \cdot d\vec{l} = \oint_M^{\infty} \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad [\text{J/C}]; [\text{V}]. \quad (11)$$

Rovnice udává, že potenciál elektrostatického pole v daném bodě M je číselně roven práci potřebné k přenesení *kladného jednotkového náboje* Q_0 z ∞ do bodu M. (Nebo opačně – práci, kterou vykoná elektrostatické pole při přenesení jednotkového náboje Q_0 z bodu M do ∞ .) Potenciál elektrostatického pole bodového náboje je dán vztahem

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{r} \quad [\text{V}], \quad (12)$$

místa, kde platí:

$$\varphi_M = \text{konst} \quad [\text{V}]. \quad (13)$$

se nazývají ekvipotenciální křivky. Viz obrázky 1 a 2. (Čárkované čáry.)

Protože pro konzervativní pole obecně platí:

$$E_{(r)} = -\text{grad}\varphi(r) \quad [\text{V}\cdot\text{m}^{-1}]. \quad (14)$$

Jsou potenciální křivky pole kolmé na siločáry elektrického pole. [7]

1.1.3 Elektrické napětí a práce elektrostatického pole

Elektrickým napětím U_{MN} označujeme rozdíl potenciálů ($\varphi_M - \varphi_N$) mezi body M a N elektrostatického pole E .

$$U_{MN} = \varphi_M - \varphi_N = - \oint_N^M \vec{E} \cdot d\vec{l} = \oint_M^N \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad [\text{J/C}]; [\text{V}]. \quad (15)$$

Práce, kterou vykoná napětí U_{MN} přenesením jednotkového Q_0 mezi body M, N získáme dosazením vztahu (15) do rovnice (10)

$$W = Q \cdot U_{MN} \quad [\text{J}]. \quad (16)$$

1.1.4 Gaussova věta elektrostatiky

Věta definuje vztah mezi celkovým tokem intenzity elektrického pole Φ , ve vakuu protékajícím obklopující uzavřenou S a celkovým nábojem Q, nacházejícím se uvnitř této plochy:

$$\Phi = \oiint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{\sum Q}{\epsilon_0} \quad [\text{N}\cdot\text{m}^2\cdot\text{C}^{-1}]. \quad (17)$$

Podle této věty tok intenzity Φ nezávisí na rozložení nábojů uvnitř obklopující plochy. Elektrické pole nábojů, umístěných mimo tuto uzavřenou plochu, neovlivňují celkový tok elektrického pole touto plochou. [7]

Z Gaussovy věty plyne důležitá vlastnost elektrického pole nekonečné rovinné plochy s rovnoměrnou hustotou kladného náboje $\sigma > 0$. (Dále nábojová plocha.) Plošný

integrál uzavřené plochy kolem elementu nábojové plochy S je roven $2S$. Hodnota náboje elementu nábojové plochy S je $Q = \sigma \cdot S$. Dosazením vztahu do (17) a úpravou dostaneme intenzitu elektrického pole elementu nábojové plochy:

$$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_0} \quad [\text{V} \cdot \text{m}^{-1}]. \quad (18)$$

Protože normálový vektor \vec{n} elementární plochy nad nábojovou plochou je opačný k normálovému vektoru elementární plochy pod nábojovou plochou \vec{n}' , je intenzita elektrického pole elementární nad nábojovou plochou poloviční a intenzita elektrického pole pod nábojovou plochou také poloviční, ale s opačnou orientací.

Aplikací Gaussovy věty (17) na případ uzavřené nábojové plochy zjistíme, že uvnitř objemu uzavřené nábojové plochy jsou vnitřní příspěvky elektrostatického pole plošných elementů vzájemně kompenzovány a celková intenzita elektrického pole uvnitř je $E = 0$. Vně uzavřené nábojové plochy je intenzita elektrického pole nábojové plochy dána:

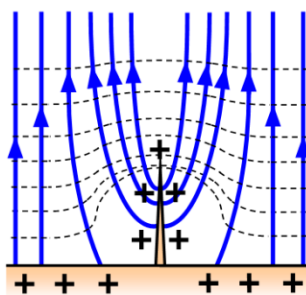
$$E = \frac{|\sigma|}{\varepsilon_0} \quad [\text{V} \cdot \text{m}^{-1}]. \quad (19)$$

(Coulombova věta.)

Dosadíme-li do rovnice (12) hustotu povrchového náboje velikost kulové plochy $\sigma = Q/(4\pi\varepsilon_0 r^2)$ a vztah pro potenciál upravíme jako funkci hustoty náboje, dostaneme:

$$\sigma = \frac{\varphi \cdot \varepsilon_0}{r} \quad [\text{C} \cdot \text{m}^{-2}]. \quad (20)$$

Ze vztahu je patrné, že čím je poloměr ohybu vodivé plochy menší, tím je vyšší hustota náboje a rovněž intenzita elektrického pole. [13]



Obr. 3 Elektrické pole na ostrém poloměru ohybu vodivé plochy. [1]

Z tohoto důvodu jsou ostřejší hrany vodivých předmětů zdrojem řady typů elektrostatického výboje (viz obr. 3).

Dle Gaussovy věty lze rovněž určit intenzitu elektrického pole v okolí dvou rovnoběžných nábojových rovin, nabitých opačnými náboji se stejnou plošnou hustotou

($\sigma_- = \sigma_+$). Mezi těmito dvěma nábojovými rovinami je intenzita elektrického pole

$$E = \sigma / \varepsilon_0 \quad [\text{V} \cdot \text{m}^{-1}]. \quad (21)$$

Ve vnějším okolí soustavy dvou nábojových rovin je intenzita elektrického pole $E = 0$. Pole se zde ruší a soustava neovlivňuje okolí.

Jsou-li se rovnoběžné nábojové roviny umístěny ve vzdálenosti d od sebe, je napětí mezi deskami podle (15) a dosazením vztahu (21) rovno

$$U = \int_0^d \frac{\sigma}{\varepsilon_0} dr = \frac{\sigma}{\varepsilon_0} d = \frac{Q}{\varepsilon_0 S} d \quad [\text{V}]. \quad (22)$$

Pojmem kapacita kondenzátoru C definujeme jako:

$$\boxed{C = \frac{Q}{U} = \varepsilon_0 \frac{S}{d}} \quad [\text{F}]; [\text{C} \cdot \text{V}^{-1}]. \quad (23)$$

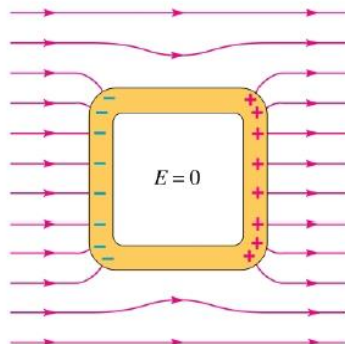
1.2 Materiály v elektrostatickém poli

Nosiči náboje v materiálech jsou elektrony (resp. díry) a ionty. Materiály dle volnosti nosičů náboje v jejich struktuře dělíme obecně do dvou základních skupin na *vodiče* a *isolanty*. Vodiče mají ve struktuře volné elektrony, které se mohou vnějším elektrickým polem přemísťovat. Vodič je tedy elektricky vodivý. Typickými představiteli vodičů jsou kovy. Isolanty – dielektrika nemají volné nosiče náboje. Navenek se izolant jeví jako elektricky nevodivý. Vnějším elektrickým polem lze dílčí nábojové elementy materiálové struktury (atomy, molekuly apod.) posunout neboli polarizovat. V izolantu se takto vytvoří elektrické dipóly. V následujících odstavcích odvodíme chování základních typů materiálů v elektrickém poli. [12]

1.2.1 Nenabitý vodič v elektrostatickém poli

Nachází-li se vodič v elektrostatickém poli o intenzitě \vec{E}_0 , působí na volné nosiče náboje q dle vztahu (4) síla $\vec{F} = q\vec{E}_0$. Volné nosiče se přemístí na povrch vodiče a vytvoří vlastní indukované elektrické pole \vec{E}_i , které působí proti vnějšímu poli. Tento jev se nazývá *elektrostatická indukce*. Směr intenzity elektrostatického pole je kolmý k povrchu vodiče. Viz obr. 4. Uvnitř vodiče je intenzita elektrostatického pole $E = 0$. Tohoto jevu se využívá při elektrostatickém stínění elektronických zařízení. Na druhou stranu, vodič vložený do elektrostatického pole obecně zkrátí vzdálenosti mezi nábojovými plochami, čímž se zvýší intenzita elektrostatického pole a strmost napětí mezi vloženým vodičem

a nábojovými plochami. Vloženým vodičem se obecně snižuje elektrostatická odolnost elektronických zařízení. [12]



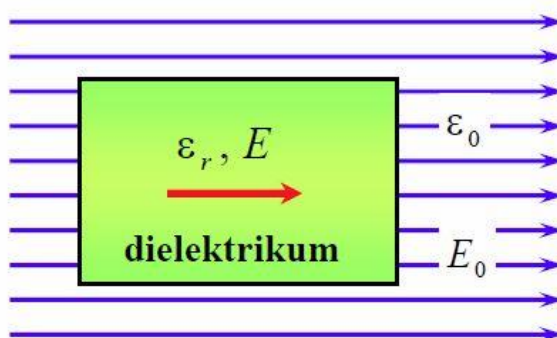
Obr. 4 Vodič v elektrostatickém poli. [12]

1.2.2 Izolant v elektrostatickém poli

Působením vnějšího elektrostatického pole na izolační materiály dochází k polarizaci dielektrika. Ve struktuře materiálu se vytvoří elektrické dipóly, které jsou tvořeny atomy, ionty nebo elementárními orientačními strukturami. Tyto elektrické dipóly působí proti vnějšímu elektrostatickému poli \vec{E}_0 a způsobí tak zeslabení elektrostatického pole uvnitř dielektrika (viz obr. 5). Elektrická indukce D v materiálu a vnějším poli D_0 je stejná. [13]

Platí

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \quad [\text{C} \cdot \text{m}^{-2}]. \quad (24)$$



Obr. 5 Dielektrikum v elektrostatickém poli. [12]

1.2.3 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost dielektrika je hodnota intenzity elektrostatického napětí, při kterém dojde k překročení vazebních sil nosičů náboje ve stabilní struktuře materiálu

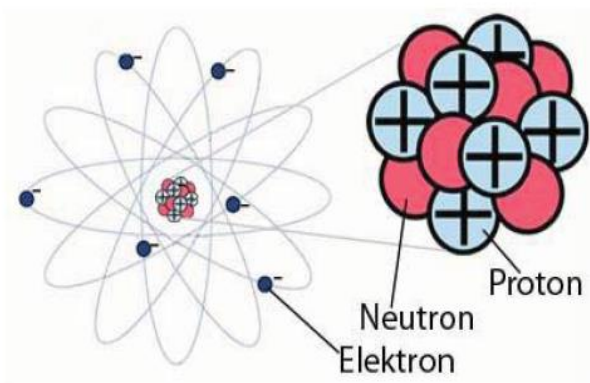
a dojde k elektrickému průrazu dielektrika. V tomto stavu dielektrikem prochází proud, který může trvale poškodit strukturu dielektrika a vlastnosti celého zkoušeného zařízení. Elektrická pevnost obecně závisí na homogenitě dielektrika, tvaru a materiálu vodivých částí - elektrod, které formují elektrické pole. Hrotovým typem elektrody se vytváří vysoká intenzita elektrostatického pole v jednom bodě dielektrika. Používá se ke zkoušení mezní elektrické pevnosti dielektrika v určitém místě. Plochá vodivá elektroda na dielektriku rozloží rovnoměrně intenzitu elektrického pole v prostoru dielektrika. Používá se k vyhledání místa v dielektriku se sníženou elektrickou pevností. Na tomto základě je sestavena norma ČSN EN 61000-4-2. [14]

2 Vznik elektrostatického náboje

Molekulární teorie struktury uvádí, že každé těleso je složeno z pozitivních a negativních nábojů. Pozitivní náboje jsou obsaženy v jádru molekuly, zatímco negativní náboj tvoří elektrony obíhající kolem pozitivně nabitého jádra.

V molekule je neutrální součet negativně nabitých obíhajících elektronů rovný součtu pozitivních nábojů v jádru. Každý materiál složený z neutrálních molekul je také neutrální. Vlivem určitých podmínek některé molekuly nemají dost velké přitažlivé síly mezi pozitivním jádrem a negativními obíhajícími elektrony pro udržení všech elektronů na oběžné dráze. V tomto případě vnější obíhající elektrony, které nazýváme valenční elektrony, mohou být přitaženy k vedlejší molekule s větší přitažlivou silou a v molekule zůstává nadbytek pozitivních nábojů. Molekula se tak stává pozitivně nabitá. Naopak některé molekuly mají tendenci přibrat další elektrony, což způsobí nevyváženost a vznik molekuly s negativním nábojem. Každý materiál s nadbytkem negativních molekul se stává negativně nabitý a obráceně materiál s nadbytkem pozitivních molekul se stává pozitivně nabitý. [9]

Předměty nebo materiály se mohou nabíjet třením nebo i jednodušším způsobem jako je dotykem anebo oddělením dvou materiálů. Pokud jsou dva materiály nebo předměty v kontaktu, pak valenční elektrony, které jsou nejbližší k ploše materiálu se volně přesunují z molekuly na molekulu, z materiálu na materiál, dokud se samy nepřipojí k silnějšímu jádru. Velikost a polarita nábojů závisí na tlaku, rychlosti dotyku a oddělování nebo tření, relativní vlhkosti, typu ploch a druhu materiálu. Na obr. 6 je neutrálně nabitý atom. [9]



Obr. 6 Jádro atomu a elektrony obíhající jádro. [9]

2.1 Způsoby vzniku elektrostatického náboje

2.1.1 Triboelektrický jev

Mezi nejznámější metodu, jak vytvořit statickou elektřinu, je tření. Při tření nebo oddalování materiálu dochází k odebrání nebo přijímání volných elektronů z elektronového obalu atomu. Pokud materiál volné elektrony získá, vznikne záporný náboj. V opačném případě, kdy elektrony v elektronovém obalu atomu chybí, vzniká kladný náboj. V okolí kontaktů vznikne chemická vazba a volné elektrony se přenášejí z jednoho materiálu na druhý, dojde k vyrovnání elektrochemických potenciálů. Tento jev se nazývá triboelektrický. [6]

Velikost a polarita náboje se liší v závislosti na použitém materiálu, drsnosti povrchu, teplotě, relativní vlhkosti, tlaku a dalších okolnostech. Velikost náboje můžeme vypočítat ze vztahu (25). Více než velikost náboje nás zajímá velikost elektrického potenciálu. Při konstantní velikosti náboje nám potenciál roste se snižováním kapacity, [6]

$$Q = C \cdot U \quad [C]. \quad (25)$$

V tab. 1 jsou uvedeny hodnoty velikosti elektrostatického napětí v závislosti na vlhkosti prostředí. [6]

Tab. 1 Elektrostatické napětí jako funkce relativní vlhkosti. [5]

	Napětí náboje (kV)	
	Relativní vlhkost 20 %	Relativní vlhkost 80 %
Chůze po podlahové krytině z PVC	5	3
Chůze po syntetickém koberci	15	7,5
Vyjmutí integrovaného obvodu (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
Odstranění krycí pásky z PC desky	12	1,5
Smršťovací folie na PC desce	16	3

Pokud chceme orientačně odhadnout polaritu a množství přeneseného náboje, použijeme k tomu tab 2 s triboelektrickou řadou. V tabulce jsou materiály seřazeny podle polarit náboje. Čím dál jsou materiály v tabulce od sebe vzdálené, tím větším nábojem se

materiál nabije. [5]

Tab. 2 Příklad triboelektrické řady. [5]

	Materiál
Pozitivní	Králičí srst
	Sklo
	Slída
	Lidské vlasy
	Nylon
	Vlna
	Kožešina
	Hedvábí
	Hliník
	Papír
	Bavlna
Negativní	Ocel
	Dřevo
	Pečetní vosk
	Nik, měď, mosaz
	Zlato, platina
	Síra
	Acetátové hedvábí
	Polyester
Celuloid	
Teflon	

2.2 Vznik elektrostatického výboje

Nejnámějším příkladem elektrostatického výboje v přírodě je blesk. K elektrostatickému výboji dochází, pokud intenzita elektrického pole překročí průraznou hodnotu okolního plynu, obvykle vzduch. Za normálních podmínek okolí se průrazná intenzita pole pro ploché povrchy pohybuje kolem 30 kV/cm. [3]

Tento elektrický výboj trvá krátkou dobu, řádově nanosekundy. V místě vzniku výboje jsou velké teploty, proto pokud výboj vznikne v prašném nebo hořlavém prostředí, může dojít k požáru či výbuchu. [5]

Elektrostatický výboj se někdy označuje jako ESD (Electrostatic discharge). S tímto označením se nejčastěji setkáváme v elektroprůmyslu, kde zkratka znamená ochrana před elektrostatickým výbojem. Tato ochrana má zabránit vzniku výbojů. Protože tento náboj může vážně poškodit integrované obvody. Čím integrovanější obvod, tím citlivější. Elektrostatické výboje řadíme do několika typů, které závisí na způsobu vzniku náboje. [3]



Obr. 7 Označuje elektrostaticky citlivou součástku. [9]

2.2.1 Jiskrové výboje

Jedná se o výboj mezi dvěma materiály o různých potenciálech. Při výboji vzniká jiskra, která je definovaná svítícím výbojem, kterým protéká proud o velké hustotě. Ionizace plynu je po celé délce jiskry. Výboj je rychlý a doprovázen praskáním. S tímto druhem výboje se nejčastěji setkáváme u kontaktu části lidského těla s velkým kovovým předmětem. Mezi další faktory ovlivňující výboj je tvar a vzdálenost předmětu. Veškerý náboj v materiálu je soustředěn do výboje, to způsobí vyčerpání téměř veškeré dostupné energie. Energie výboje je dána vztahem

$$W = \frac{1}{2} Q \cdot U = \frac{1}{2} C \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{U} \quad [\text{J}], \quad (26)$$

kde W [J] je rozptýlená energie, Q [C] je množství náboje na vodiči, U [V] je jeho potenciál a C [F] kapacita k zemi. [5]

2.2.2 Korónové výboje

Tento typ výboje najdeme v okolí vodičů s ostrými hroty nebo hranami. Korona vzniká na uzemněném vodiči, který se přibližuje k silně nabitému předmětu, případně zvyšuje-li se potenciál vodiče na vysokou hodnotu. Elektrické pole v blízkosti ostrého povrchu přesahuje průraznou hodnotu 30 kV/cm. Hodnota pole rychle klesá se vzdáleností, oblast ionizace je těsně v okolí ostrého hrotu. Výboj může směřovat směrem k nabitému předmětu nebo v případě vodiče s vysokým potenciálem může směřovat do prostoru. Korónové výboje jsou při běžném světle špatně viditelné. Poznáme je podle doutnavého světla v blízkosti příslušného bodu. [5]

2.2.3 Trsové výboje

Tento výboj je velmi rychlý. Vzniká při přiblížení uzemněného vodiče k nabitému izolantu (například mezi částí lidského těla a kusem plastu nebo mezi povrchem kapaliny uvnitř nádoby a kovovou plnicí trubicí). Je velmi podobný jiskrovému výboji, akorát s tím rozdílem, že nedojde k úplnému vyrovnání náboje. Za určitých okolností je výboj slyšet a vidět. [5]

2.2.4 Postupující trsové výboje

Hlavní rozdíl mezi postupujícím a normálním výbojem je, že první vzniká prakticky na povrchu a druhý ve vzduchové mezeře. Výboj vzniká na povrchu, protože elektrostatické pole je vázané na tenkou izolační vrstvu a nevystupuje ven do okolí. To vyžaduje mnohem vyšší průrazné napětí než je potřeba u vzduchové mezery. Pokud chceme zabránit postupnému trsovému výboji, musíme zajistit materiál přes všechny povrchy s velkou rezistivitou a povlakem menším než 4 kV. Tento druh výboje lze zajistit dvěma způsoby. Za první přiblížení vodivého předmětu k povrchu a za druhé je průraz dielektrika. Dosáhne-li pole průrazného napětí, dojde ke spontánnímu výboji a na povrchu se objeví malá díra. Tato díra je nahrazena elektrickým polem rovnoběžným s povrchem dielektrika, to vyvolá řadu silných povrchových výbojů. Pomocí postupného trsového výboje se energie uvolní téměř celá. [5]

Ekvivalentní kapacita C_e uchovávající hustotu povrchového náboje je:

$$C_e = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{d} \quad [F] \quad (27)$$

kde S je plocha materiálu, d je jeho tloušťka, ϵ_r je relativní permitivita a ϵ_0 je permitivita vakua. [5]

2.2.5 Kuželové výboje

Výboj vzniká pohybem vysoce rezistivních granulí. Při plnění sila nabitými plastovými granulemi dochází k nahromadění náboje v silu. Dosáhne-li náboj průrazné hodnoty vzduchu, dojde k vybití přes uzemněné silo. [5]

2.3 Zánik elektrostatického výboje

Elektrické náboje mohou být snadno eliminovány z vodivých materiálů uzemněním. Toto uzemnění však nesmí být přímé, ale přes soustavu vybíjecích odporů, aby při vybíjení nedocházelo k jiskrovým výbojům. Energie těchto výbojů by mohla

způsobit poškození elektrostaticky citlivých součástek. Vybíjecí rezistory tedy zajišťují pozvolné vybíjení vzniklých nebezpečných nábojů. Hodnoty rezistorů jsou dány normami tak, aby časové konstanty přechodových dějů byly optimální. Rezistory se zařazují nejen mezi elektrickou zem a vybíjecí místo, ale i mezi jednotlivá vybíjecí místa pracoviště vzájemně. V nedávné minulosti některé normy předepisovaly, odvádět náboj samostatným zemním vodičem. To přinášelo velké komplikace zejména tam, kde se antistaticky ošetřovala stávající pracoviště. Dnes je běžné použití zemního vodiče síťového rozvodu.

U nevodivých materiálů mohou být v některých případech elektrostatické náboje snižovány řízenou vlhkostí vzduchu. Úplná neutralizace náboje je možná pouze ionizací vzduchu. Ionizátory produkují kladné a záporné ionty, které účinně neutralizují obě polarity náboje. [10]

Při neutralizaci elektrostaticky citlivých zařízení je třeba použít ionizátory s vyváženou ionizací. Nevyváženost iontů může indukovat napětí na součástce a může způsobit její zničení. Vyvážená ionizace znamená, že bez ohledu na čas a umístění by nemělo být zaznamenáno žádné elektrické napětí v oblasti ionizace. V elektronickém průmyslu by nevyváženost neměla převýšit ± 30 V. [10]

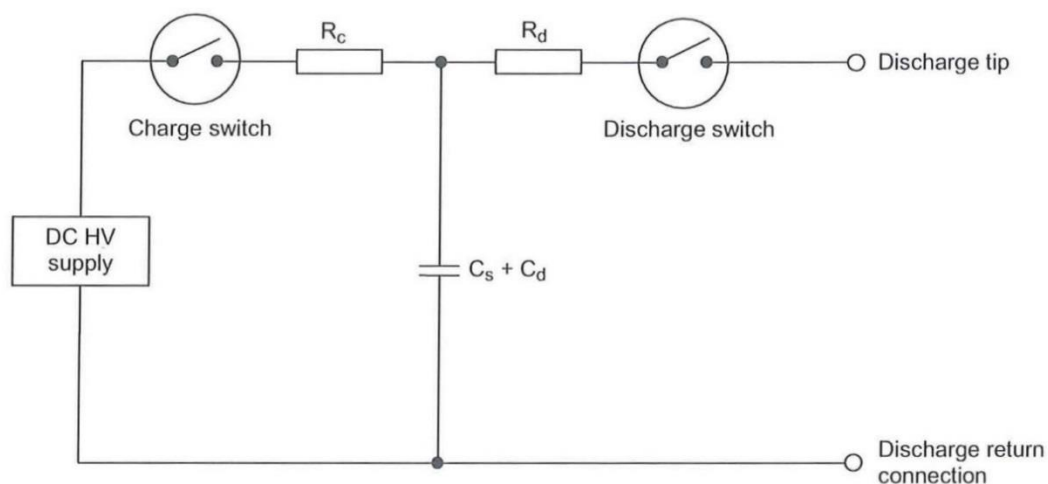
3 Metody testování odolnosti proti ESD

Zkouška odolnosti proti elektrostatickému výboji se provádí pomocí zkušebního zařízení (tzv. simulátor ESD), jehož koncová část má obvykle podobu pistole s výměnným vybíjecím hrotem. Pistole se jedním kabelem připojuje ke zdroji vysokého napětí a druhým k uzemňovací desce. Provedení ESD simulátoru je na obr. 8. [8]



Obr. 8 Simulátor ESD. [11]

Zdrojem vysokého napětí je generátor, který je propojený kabelem s výbojovou pistolí. Generátor se skládá z akumulčního kondenzátoru $C_s = 150 \text{ pF}$, který se nabíjí stejnosměrným napětím $U = 2 - 15 \text{ kV}$ přes odpor $R_c = 50 - 100 \text{ M}\Omega$. Při výboji se kondenzátor vybije do zkoušeného zařízení přes sériový vybíjecí odpor R_d . Jeho hodnota pro optimální simulaci různých typů výbojů by měla být v rozmezí $10 \text{ }\Omega$ až $1 \text{ k}\Omega$, normou ČSN EN 61000-4-2 je však hodnota stanovena na $330 \text{ }\Omega$. Na obr. 9 je zjednodušené schéma generátoru. [8]



Obr. 9 Zjednodušené schéma ESD generátoru. [3]

Tvar a časový průběh proudu vznikajícího ve zkoušeném zařízení závisí na způsobu provedení výboje. Rozlišujeme tři druhy zkušebních výbojů:

- výboj vzduchovou mezerou;
- kontaktní výboj;
- nepřímý výboj na svislou nebo vodorovnou vazební desku.

Nejčastěji se zkouška provádí kontaktním výbojem. Pro kontaktní a vzduchový výboj je dána jiná hodnota napětí z důvodu odlišnosti testu. Při výboji vzduchovou mezerou se zařízení zkouší všemi úrovněmi od nejnižšího napětí až po maximální stanovenou úroveň dle tab. 3. Při kontaktním výboji můžeme použít pouze napětí pro maximální stanovenou úroveň. Který typ výboje použijeme pro testování zařízení, specifikuje zkušební předpis testovaného zařízení. [8]

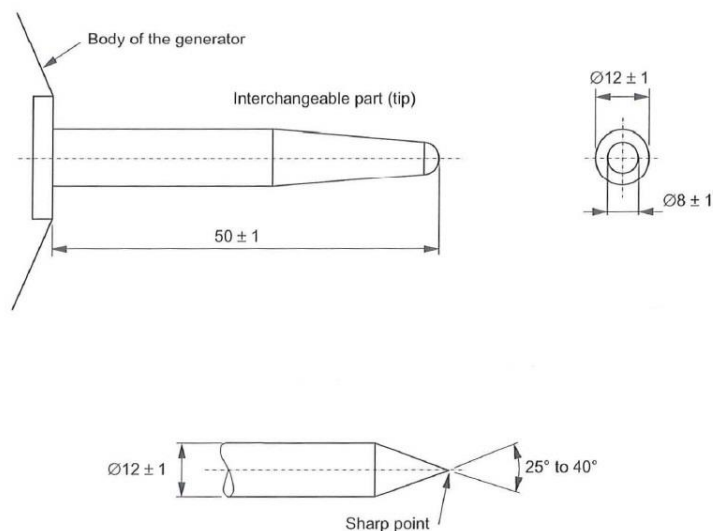
Tab. 3 Úroveň napětí. [3]

kontaktní výboj		vzduchový výboj	
úroveň	testovací napětí kV	úroveň	testovací napětí kV
1	2	1	2
2	4	2	4
3	6	3	8
4	8	4	15
x ^a	> 8	x ^a	> 15

Výboj vzduchovou mezerou a kontaktem se vybíjí do míst na zařízení, které je přístupné obsluze při běžném užívání. Jedná se například o:

- všechna místa na ovládacím panelu a klávesnici;
- všechna místa na kovových částech, které jsou izolované od země;
- všechny indikační a další přístupné elementy, světelné diody, různé mřížky.

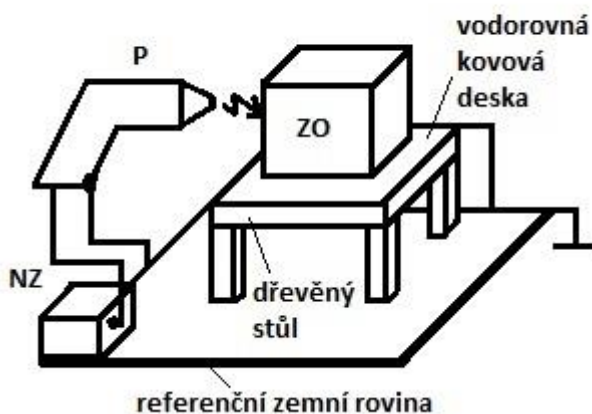
Do těchto předem vybraných míst se provede minimálně deset jednotlivých výbojů polaritou, na kterou je zařízení více citlivé. Mezi jednotlivými výboji by měl být interval nejméně 1 s z důvodu zjištění funkčnosti zkoušeného zařízení. ESD pistole pro výboj vzduchovou mezerou používá vybíjecí elektrodu se zaobleným koncem. Pro kontaktní výboj má elektroda ostrý hrot, který má zajistit dobrý kontakt. Vybíjecí elektrody jsou zobrazeny na obr. 10. [8]



Obr. 10 Zkušební hroty pro vzduchový (a) a kontaktní (b) výboj ESD. [3]

3.1 Výboj vzduchovou mezerou

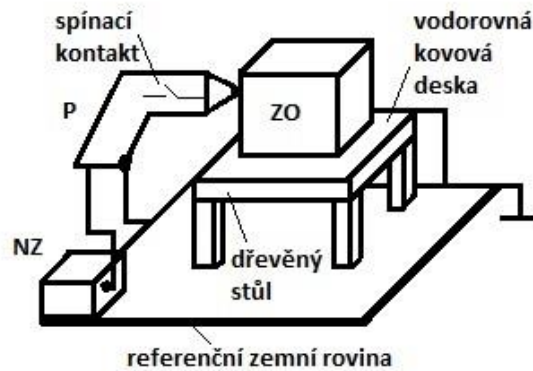
Nastavíme hodnotu testovacího napětí a na pistoli stiskneme spoušť. Tím se vysoké napětí dostane až na hrot pistole. Takto připravenou pistolí se přibližujeme ke zkoušenému přístroji do té doby, dokud nedojde k výboji anebo ke kontaktu s přístrojem. Po kontaktu se spoušť pustí a ESD pistole se oddálí od přístroje. Dojde k znovu nabití vybíjecího kondenzátoru C_s . Postup se opakuje nejméně desetkrát na každém vybraném místě přístroje. Vybíjecí proud ve vzduchové mezeře má vždy trochu odlišný tvar. Charakter i časový průběh výboje je závislý na rychlosti přibližování vybíjecí elektrody k zařízení. Dále závisí na vlhkosti, teplotě a tlaku. Všechny tyto vlivy způsobují, že doba náběhu vybíjecího proudu se při zkušebních testech mění od hodnot menších než 1 ns po hodnoty větší než 20 ns. Viz obr. 11. [8]



Obr. 11 Výboj vzduchovou mezerou. [11]

3.2 Kontaktní výboj

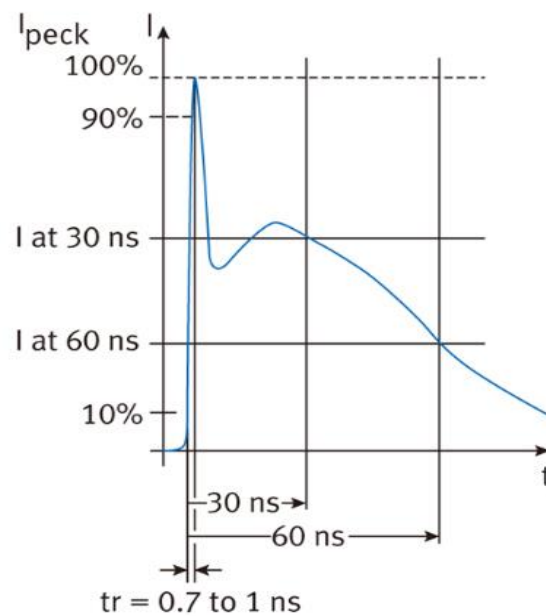
Pro dobrou opakovatelnost a stabilitu testu se nejčastěji používá metoda kontaktním výbojem, kdy se hrot ESD pistole pevně přiloží na zkoušené zařízení (obr.12). Pro dobré spojení se používá špičatý hrot. Vysoké napětí na vybíjecím kondenzátoru C_s se k testovanému zařízení připojí pomocí spínače na pistoli. Ve zkoušeném zařízení vznikl vybíjecí proudový impulz, který má průběh dle obr. 13. Hodnoty proudu tohoto impulzu při 30 ns a 60 ns závisí na velikosti prvního maxima a jsou uvedené v tab. 4. Dodržení vybíjecího proudového impulzu závisí na kvalitě a rychlosti spínače v ESD pistoli. Používá se zde vysokonapěťové relé, které musí být dostatečně napěťově dimenzované a musí mít jediný kontakt pro zabránění vzniku dvojího výboje v úseku rychlého náběhu impulzu. [8]



Obr. 12 Kontaktní výboj. [11]

Tab. 4 Parametry proudového impulsu ESD. [6]

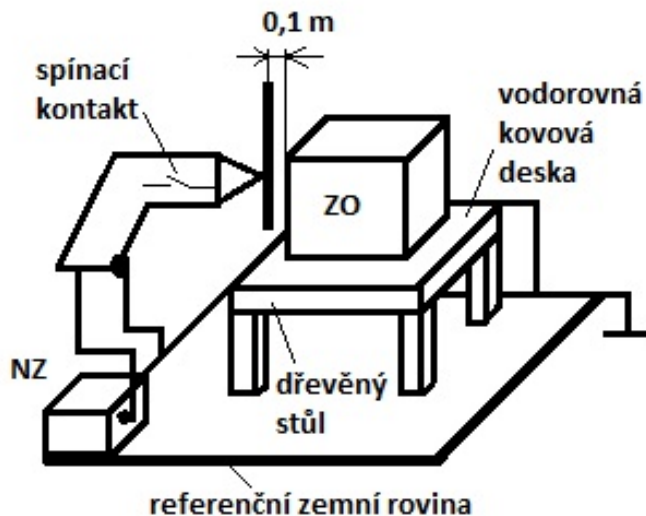
úroveň	napětí kV	první maximum omezujícího proudu $I_p \pm 15\%$ A	doba náběhu $t_r (\pm 25\%)$ ns	proud po 30ns $I_{30} (\pm 30\%)$ A	proud po 60ns $I_{60} (\pm 30\%)$ A
1	2	7,5	0,8	4	2
2	4	15	0,8	8	4
3	6	22,5	0,8	12	6
4	8	30	0,8	16	8



Obr. 13 Definovaný tvar impulsu proudu z generátoru. [3]

3.3 Výboj na svislou nebo vodorovnou vazební desku

Zkouška se provádí kontaktním výbojem do kovové vazební desky v blízkosti zkoušeného zařízení. Rušivý elektrostatický výboj může mít vliv na funkčnost elektronického zařízení i tehdy, uskuteční-li se nikoli přímo do jeho povrchu, přičemž vybíjecí proud je indukci přenesen do vlastního zařízení. Vazební desku lze umístit svisle nebo vodorovně. Svislá vazební deska VCP (Vertical Coupling Plane) má stanovený rozměr 0,5x0,5 m a je umístěná rovnoběžně se stranou zkoušeného přístroje ve vzdálenosti 10 cm od něj. Během zkoušky se poloha vazební desky mění kolem všech stran a v každé poloze se provede nejméně deset výbojů do středu jedné ze svislých hran desky. Jako vodorovná vazební deska HCP (Horizontal Coupling Plane) se používá horní plocha stolu. Mezi zkoušeným zařízením a deskou musí být izolační podložka o tloušťce 0,5 mm. Při zkoušce je okraj zařízení vzdálen 10 cm od hrany vodorovné vazební desky, do níž se simulátorem ESD provádí výboje (min. 10 výbojů do jednoho bodu), a to proti středu zkoušeného zařízení. Vybíjecí hrot je v rovině vazební desky a dotýká se kolmo její přední hrany. Zpětný vybíjecí kabel pistole ESD musí být během provádění výbojů vzdálen od zkoušeného zařízení minimálně 0,2 m. Viz obr. 14. [8]



Obr. 14 Nepřímý výboj na svislou vazební desku. [11]

3.4 Kritéria pro vyhodnocení zkoušky

Výsledky zkoušek jsou klasifikovány z hlediska zhoršení nebo ztráty funkce zkoušeného zařízení, s ohledem na specifikaci.

Doporučené třídění je následující:

A - normální činnost zařízení v rozsahu mezí jeho technické specifikace;

B - dočasné zhoršení nebo ztráta funkce či činnosti zařízení, která se však sama obnovuje;

C - dočasné zhoršení nebo ztráta funkce či činnosti zařízení, vyžadující vnější zásah obsluhy;

D - zhoršení nebo ztráta funkce zařízení, která není obnovitelná, neboť došlo k poškození zařízení či jeho součástí, poškození programového vybavení nebo ztrátě dat apod.

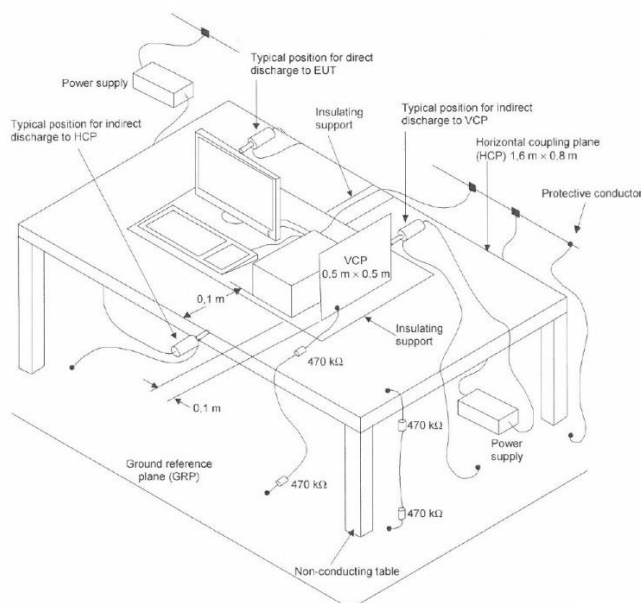
4 Parametry laboratorního pracoviště

4.1 Zkušební sestava pro zařízení umístěného na stole

Pracoviště se skládá ze dvou základních věcí, dřevěný stůl a referenční zemní rovina. Dřevěný stůl je vysoký 80 cm a je umístěný na referenční zemní rovině GRP (Ground reference plate). Jedná se o kovovou podlahu připojenou k ochrannému systému uzemnění. Jako materiál se používá měď nebo hliník o minimální tloušťce 0,25 mm. Při použití jiného materiálu musí být tloušťka větší než 0,65 mm. Velikost referenční roviny je dána velikostí zkoušeného zařízení tak, aby vazební desku stolu přesahovala minimálně o 50 cm na všechny strany. Mezera mezi zkoušeným zařízením a stěnami laboratoře musí být nejméně 1 metr. [3]

Horizontální vazební deska HCP (Horizontal Coupling Plane) o rozměrech 160x80 cm je položena na stole. Deska musí být k zemní rovině připojena vodičem, na jehož každém konci je rezistor o hodnotě 470 k Ω . [6]

Svislá vazební deska VCP (Vertical Coupling Plane) má stanovený rozměr 0,5x0,5 m a je položena spolu se zařízením na izolované podložce o minimální tloušťce 0,5 mm. Deska je připojena k zemní rovině vodičem, na jehož každém konci je rezistor o hodnotě 470 k Ω . Viz obr. 15. [3]

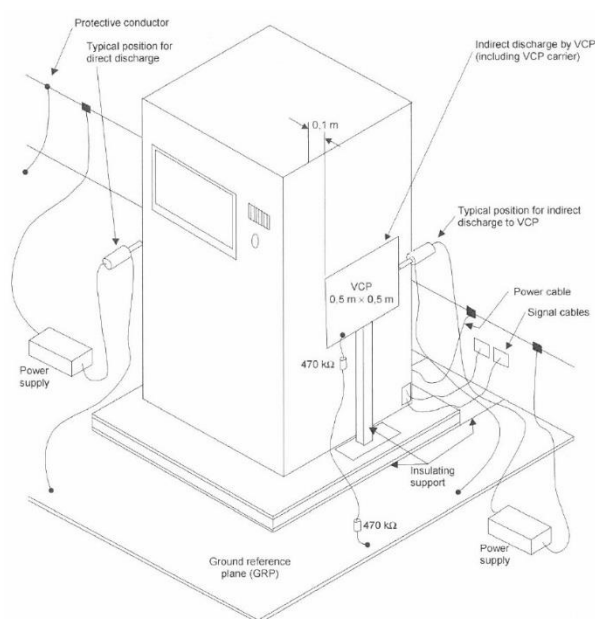


Obr. 15 Zkušební sestava zařízení umístěného na stole. [3]

4.2 Zkušební sestava pro zařízení umístěného na podlaze

Na tomto pracovišti se zkouší velká a těžká zařízení, která jsou pak umístěná na podlaze, jako jsou bankomaty, různé automaty a rozvodné skříně.

Zařízení je izolované od referenční zemní roviny izolační podložkou o tloušťce 10 cm. Metoda testování je stejná jako u zařízení testované na stole. Pracoviště je znázorněné na obr. 16. [3]



Obr. 16 Zkušební sestava pro zařízení umístěného na podlaze. [3]

4.3 Prostředí

Pracoviště musí být umístěné na takovém místě, kde se nemění klimatické a elektromagnetické podmínky. Klimatické podmínky pro zkoušení vzdušným výbojem musí být v mezích:

- okolní teplota v mezích od 15 °C do 35 °C;
- relativní vlhkost od 30 % do 60 %;
- atmosférický tlak: 86 kPa (860 mbar) až 106 kPa (1060 mbar).

Elektromagnetické podmínky laboratoře musí být takové, aby nedošlo k rušení zkoušeného přístroje a ovlivnění výsledku testu. [3]

5 Návrh pracoviště pro elektrostatické výboje

Pracoviště bude umístěno v uzavřené místnosti na nové výrobní hale podniku, který se zabývá výrobou měřicí a vysílací techniky. Návrh pracoviště pro elektrostatické výboje je zpracován na základě požadavku vycházející z normy ČSN EN 61000-4-2.

Místnost bude klimatizovaná na teplotu 23 °C, to souhlasí s požadavkem normy (15 °C až 35 °C). Pracoviště má svou vlastní rozvodnou skříň s napájením elektrické energie 240/400 V a vyvedenou svorkovnicí s ochrannou nulou pro připojení referenční zemní roviny.

Z důvodu bezpečnosti je pracoviště vybaveno nouzovým vypínacím tlačítkem. Pracoviště je doplněno o světelnou signalizaci, signalizující jeho provoz. Stroboskopický maják červené barvy se aktivuje při zapnutí napájení pracoviště.

Zařízení bude testováno na dřevěném stole o rozměrech 160x80x80 cm (délka, šířka, výška), který je umístěný na vodivé podlaze z nerezového plechu o tloušťce 1 mm. Nerezový plech jsem si zvolil z důvodu dostupnosti materiálu v podniku a tedy jeho nízkým pořizovacím nákladům a také z důvodu, že je odolnější a lépe zachovává svojí podobu i povrchové vlastnosti oproti hliníku nebo mědi. Velikost referenční roviny bude 210x130 cm.

Na dřevěném stole je položena horizontální vazební deska z nerezového plechu o tloušťce 1 mm a rozměrech 160x80 cm. Deska bude k zemní rovině připojena vodičem, na jehož koncích budou rezistory o hodnotě 470 k Ω .

Svislá vazební deska bude z nerezového plechu o tloušťce 1 mm a rozměrech 50x50 cm. Deska je k zemní rovině připojena vodičem, na jehož každém konci bude rezistor o hodnotě 470 k Ω .

Zkoušené zařízení a propojovací kabely jsou na izolační podložce (technický plast ERTALON 6 SA) o tloušťce 0,5 mm. Zkoušené zařízení musí být propojené s uzemňovací soustavou dle montážního předpisu s ohledem na jeho funkci. K zařízení se připojuje zpětný vybíjecí kabel o délce asi 2 metry. Kabel je připojen k referenční zemní rovině. Návrh pracoviště je na obr. 15.

Pro pracoviště byl vybrán ESD generátor Dito od firmy EMtest obr. 17. Firma EMtest v oblasti elektromagnetické kompatibility na trhu působí již dlouho. Jejich zařízeními jsou vybavována řada špičkových laboratoří. Jejich výrobky jsou kvalitní. ESD pistole Dito má:

- intuitivní ovládání;

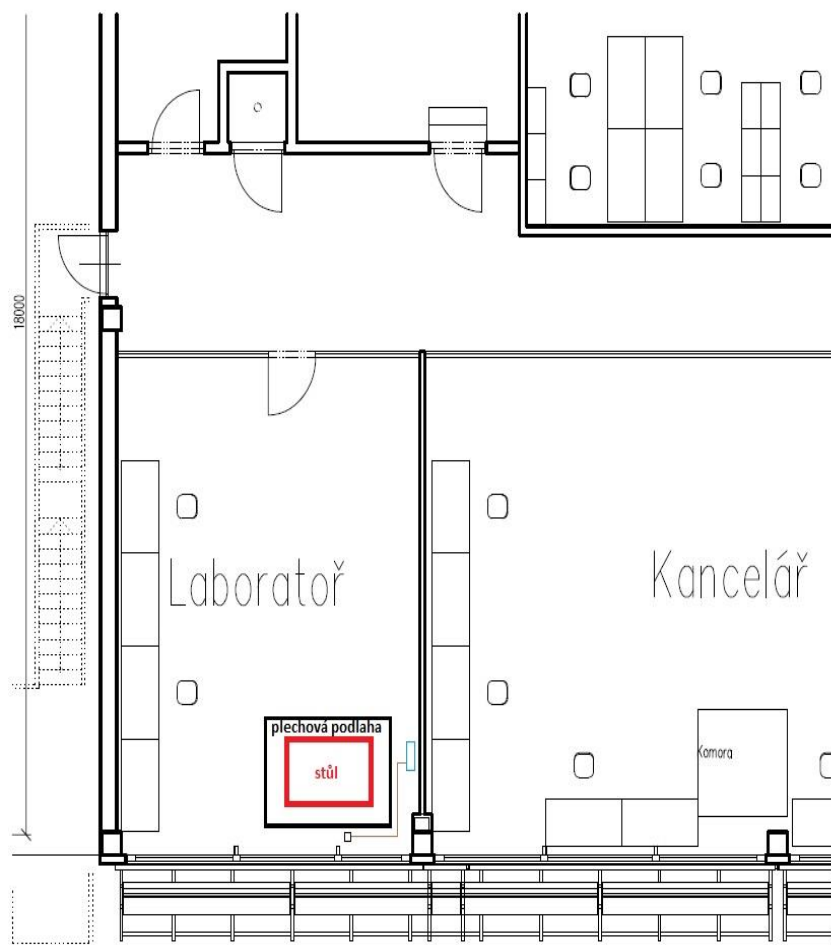
- malou hmotnost;
- vyměnitelné hroty;
- knihovnu standardních testovacích procedur;
- měření testovacího napětí.



Obr. 17 ESD generátor Dito. [11]

Cenová rozvaha pracoviště:

ESD pistole Dito	160 920,-
Stůl 160x80x80	5 400,-
Plech	5 000,-
Izolační podložka (ERTALON)	1 000,-
Elektroinstalace	5.000,-
Klimatizace Tothiba	84 000,-
Celkové náklady.....	261 320,-



Obr. 18 Umístění pracoviště v nové výrobní hale.

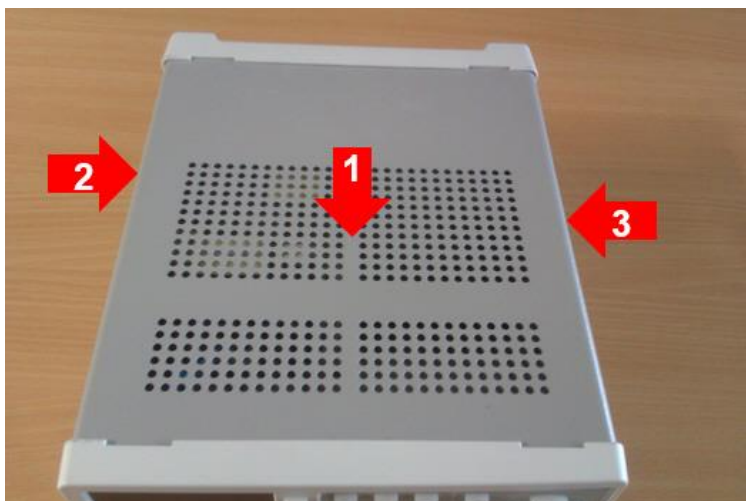
6 Zkouška zařízení

Zkouška odolnosti proti elektrostatickým výbojům na zařízení byla provedena na katedře elektroenergetiky a ekologie Západočeské univerzity v Plzni. Pro testování jsme zvolili tříkanálový zdroj stejnosměrného napětí s barevným LCD displejem a podsvícenými gumovými tlačítky. Zařízení je určeno do průmyslového prostředí. Z technické normy ČSN EN 61000-6-2 jsme stanovili napětí pro testování kontaktním výbojem ± 4 kV a pro výboj vzduchovou mezerou ± 8 kV. [4]

Před testováním jsme si definovali body pro jednotlivé typy zkoušek. Zařízení jsme umístili na stůl (na horizontální vazební desku), připojili síťový kabel napájení. Zdroj jsme zapnuli a nastavili na všech kanálech výstupní napětí 15 V proud 1 A.

6.1 Zkouška přímým výbojem

Zkouška přímým výbojem byla provedena na třech místech krytu zařízení a na zadním panelu nad konektorem LAN. Na zařízení se během testování neprojevila žádná odchylka. Viz obr. 19 a 20.



Obr. 19 Zkouška přímým výbojem do krytu.



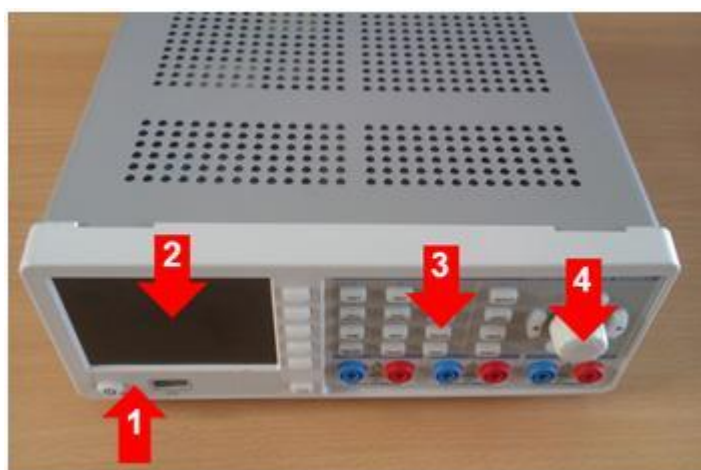
Obr. 20 Zkouška přímým výbojem do zadního panelu nad LAN konektor.

6.2 Zkouška nepřímým výbojem

Zkouška nepřímým výbojem do vazební desky vertikální a horizontální byla provedena ze všech čtyř stran zkoušeného přístroje. I v tomto případě se neprojevila změna chování na přístroji.

6.3 Zkouška vzduchovým výbojem

Při zkoušce výbojem vzduchovou mezerou byla ESD pistole nastavena na napětí +8 kV. Výboje proběhly do předem stanovených bodů. Při vybití výboje do LCD displeje (pozice 2) došlo k jeho prohluknutí. Změna chování je klasifikována jako kritérium třídy B. Během zkoušení už nebyly zaznamenány žádné změny, ani při změně polarity. Viz obr. 21.



Obr. 21 Zkouška vzduchovým výbojem do ovládacího panelu.

6.4 Výsledky zkoušky

6.4.1 Test odolnosti proti elektrostatickému výboji

Zkouška dle: ČSN EN 61000-6-2, ed.:2009.	
Dne	7. 5. 2015
Místo zkoušky	katedra elektroenergetiky a ekologie, ZCU Plzeň
Typ zkoušeného přístroje	tříkanálový stejnosměrný zdroj
ESD generátor	EM TEST – ESD 30
Teplota	27 °C
Vlhkost	41 %
Tlak	98 kPa

- a) Aplikace vzduchovým výbojem. Signál byl aplikován na čtyři místa s těmito výsledky:

Úroveň/Napětí [kV]	1/2		2/4		2/8	
Místo aplikace/Polarita	+	-	+	-	+	-
Mezi tlačítkem a USB konektorem	A	A	A	A	A	A
LED displej	A	A	A	A	B	A
Mezi tlačítky	A	A	A	A	A	A
Na tlačítko	A	A	A	A	A	A

- b) Aplikace vazební deskou. Signál byl aplikován z různých směrů s těmito výsledky:

Úroveň/Napětí [kV]	1/2		2/4	
Místo aplikace/Polarita	+	-	+	-
Zepředu	A	A	A	A
Zezadu	A	A	A	A
Zprava	A	A	A	A
Zleva	A	A	A	A

- c) Aplikace kontaktním výbojem. Signál byl aplikován na čtyři místa s těmito výsledky:

Úroveň/Napětí [kV]	1/2		2/4	
Místo aplikace/Polarita	+	-	+	-
Kryt shora	A	A	A	A
Kryt zleva	A	A	A	A
Kryt zprava	A	A	A	A
Vedle LAN konektoru na zadním panelu	A	A	A	A

Zařízení splňuje požadavky kritéria B předpisu ČSN EN 61000-6-2

Kritéria:

- A - normální činnost zařízení v rozsahu mezí jeho technické specifikace;
- B - dočasné zhoršení nebo ztráta funkce či činnosti zařízení, která se však sama obnovuje;
- C - dočasné zhoršení nebo ztráta funkce či činnosti zařízení, vyžadující vnější zásah obsluhy;
- D - zhoršení nebo ztráta funkce zařízení, která není obnovitelná, neboť došlo k poškození zařízení či jeho součástí, poškození programového vybavení nebo ztrátě dat a podobně.

7 Závěr

Podnik, ve kterém pracuji, se zabývá výrobou měřicí a vysílací techniky. Okrajovou částí naší produkce jsou také zakázky od externích zákazníků. Zákazníkům nabízíme kompletní servis od vývoje prototypů až po kompletní sériovou výrobu. Nyní chceme rozšířit nabídku našich služeb o předcertifikační měření v oblasti elektromagnetické kompatibility a navržené pracoviště se má stát součástí nově budované laboratoře, která bude provádět také další EMC měření, například odolnost proti rušení rázovými impulzy a rychlými přechodovými jevy.

Provádění předcertifikačních testování EMC v místě výroby a testování zařízení již ve fázi vývoje přinese další úsporu času a nákladů. Elektromagnetická kompatibilita bude testována již v průběhu vývoje zařízení a nebude nutné upravovat finální výrobek z důvodu nesplnění požadavků EMC certifikace.

Cílem práce bylo vytvořit koncept pro vybudování pracoviště na testování odolnosti proti elektrostatickým výbojům. Pracoviště a zkušební postupy jsou navrženy tak, aby odpovídaly požadavkům normy ČSN EN 61000-4-2, a měly by tedy zajišťovat dobrou reprodukovatelnost prováděných testů. Plán školení pro personál laboratoře bude vytvořen v souladu se systémem řízení kvality našeho podniku.

Součástí práce mělo být porovnání výsledků měření testovacího vzorku na nově zbudovaném pracovišti s referenčním měřením, které bylo provedeno na katedře elektroenergetiky a ekologie Západočeské univerzity v Plzni. Testovacím vzorkem byl tříkanálový zdroj stejnosměrného napětí s LCD displejem. Vzhledem k výstavbě nové haly však byla investice do vybavení navrženého pracoviště dočasně pozastavena a srovnávací testy proběhnou až po vybudování pracoviště. Pro přesnější ověření výsledků obou pracovišť by bylo lepší otestovat více různých přístrojů.

Seznam literatury

- [1] Myslík, Jiří. *Elektromagnetické pole: základy teorie*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1998, 153 s. ISBN 80-86056-43-0.
- [2] Štoll, Ivan, Bedřich Sedlák. *Elektrina a magnetismus*. Praha: Karolinum, 2013. ISBN 9788024621982.
- [3] ČSN EN 61000-4-2 ed. 2. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) – Část 4-2. Elektrostatický výboj – zkouška odolnosti*. Praha: ČNI, 2008.
- [4] ČSN EN 61000-6-2. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) - Část 6-2: Kmenové normy - Odolnost pro průmyslové prostředí*. Praha: ČNI, 2006
- [5] ČSN EN 61340-5-1. *Elektrostatika – Část 5-1: Ochrana elektronických součástí před elektrostatickými jevy – Všeobecné požadavky*. Praha: ČNI, 2008.
- [6] Fyzimatik.pise. *Triboelektrická řada*. [online]. 2015 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://fyzimatik.pise.cz/411-triboelektricka-rada.html>
- [7] Kubínek Roman. *ELEKTRINA A MAGNETISMUS* [online]. 2012. [cit. 2015-05-23]. ISBN 978-80-244-3360-8. Dostupné z: http://mofy.upol.cz/vystupy/02_texty/modul_emgu.pdf
- [8] Encyklopedie EMC. *Encyklopedie elektromagnetické kompatibility*. [online]. 2010 [cit. 2015-05-03]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=node64>
- [9] Antistatika. *Vznik elektrostatických nábojů*. [online]. 2008 [cit. 2015-03-02]. Dostupné z: <http://www.antistatika.cz>
- [10] Základy elektromagnetické kompatibility (EMC). *Část 5: Elektromagnetická odolnost a její testování*. [online]. 2001 [cit. 2015-05-06]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01025/index.html#kap8>
- [11] Fyzikální webové stránky – webFyzika. *Elektrostatické pole ve vodičích a dielektriku*. [online]. 2008 [cit. 2015-05-28]. Dostupné z: http://webfyzika.fsv.cvut.cz/PDF/prednasky/elektricke_pole_vodice_dielektrika.pdf
- [12] Katedra elektromagnetického pole. *Coulombův zákon*. [online]. 2013 [cit. 2015-05-29]. Dostupné z: http://elmag.org/sites/default/files/users/pankrac/files/2_A1B17EMP.pdf

- [13] Nerýpej se v elektrotechnice. *Elektrostatické pole*. [online]. 2000 [cit. 2015-05-25]. Dostupné z:
http://elt.xf.cz/materialy/stejnosproudy/17_Elektrostatika_kondenzatory/1.pdf
- [14] PowerWiki. *Elektroenergetika elektrická pevnost*. [online]. 2015 [cit. 2015-05-26]. Dostupné z:
<http://www.powerwiki.cz/attach/EN1Podklady/Elektroenergetika1-Elektricka%20pevnost%20a%20elektricke%20vyboje.pdf>

Seznam obrázků

Obr. 1 Zobrazení pole bodových nábojů. [1].....	13
Obr. 2 Rozložení pole mezi dvěma deskami a mezi nábojem a deskou. [1].....	14
Obr. 3 Elektrické pole na ostrém poloměru ohybu vodivé plochy. [1]	16
Obr. 4 Vodič v elektrostatickém poli. [12].....	18
Obr. 5 Dielektrikum v elektrostatickém poli. [12]	18
Obr. 6 Jádro atomu a elektrony obíhající jádro. [9].....	20
Obr. 7 Označuje elektrostaticky citlivou součástku. [9].....	23
Obr. 8 Simulátor ESD. [11]	26
Obr. 9 Zjednodušené schéma ESD generátoru. [3]	27
Obr. 10 Zkušební hroty pro vzduchový (a) a kontaktní (b) výboj ESD. [3]	28
Obr. 11 Výboj vzduchovou mezerou. [11].....	29
Obr. 12 Kontaktní výboj. [11]	30
Obr. 13 Definovaný tvar impulzu proudu z generátoru. [3].....	30
Obr. 14 Nepřímý výboj na svislou vazební desku. [11]	31
Obr. 15 Zkušební sestava zařízení umístěného na stole. [3]	33
Obr. 16 Zkušební sestava pro zařízení umístěného na podlaze. [3]	34
Obr. 17 ESD generátor Dito. [11].....	36
Obr. 18 Umístění pracoviště v nové výrobní hale.....	37
Obr. 19 Zkouška přímým výbojem do krytu.....	38
Obr. 20 Zkouška přímým výbojem do zadního panelu nad LAN konektor.....	39
Obr. 21 Zkouška vzduchovým výbojem do ovládacího panelu.....	39

Seznam tabulek

Tab. 1 Elektrostatické napětí jako funkce relativní vlhkosti. [5].....	21
Tab. 2 Příklad triboelektrické řady. [5]	22
Tab. 3 Úroveň napětí. [3].....	27
Tab. 4 Parametry proudového impulzu ESD. [6]	30