

Měření elektrického náboje na elektrosoučástkách

Electric charge measurement on electronics devices

Martin Kolářek

Bakalářská práce
2012



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Martin KOLÁČEK**
Osobní číslo: **A09024**
Studijní program: **B 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Informační a řídicí technologie**

Téma práce: **Měření elektrického náboje na elektrosoučástkách**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma.
2. Popište metody ochrany elektrostaticky citlivých součástek před statickou elektřinou.
3. Zkonstruujte faradayův pohárek a popište metody měření náboje na malých tělesech a elektronických součástkách.
4. Navrhněte a sestavte měřicí pracoviště pro měření statického náboje na elektrických součástkách.
5. Provedte měření na vybraných součástkách, zpracujte dosažené výsledky měření a navrhněte laboratorní úlohu.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. Syrový, A. Fyzika II B: Elektrostatika a elektrodynamika. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1970.
2. Urbanová, M., Hofmann, J. Fyzika II. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická. Fakulta chemicko-inženýrská, 2000. Rozsah: 216 stran. ISBN 80-7080-372-X.
3. Frish, H. Základy elektroniky a elektronických obvodů. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1987. Rozsah: 316 stran.
4. Züglerová, H. Elektrotechnická měření. Praha: BEN- technická literatura, 2006. Rozsah: 255 stran. ISBN 80-7300-022-9.
5. Volkenštejn, M.V. Přeložil Jiří Dvořák. Struktura a fyzikální vlastnosti molekul. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1962. Rozsah: 721 stran.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Milan Navrátil, Ph.D.
Ústav elektroniky a měření

Datum zadání bakalářské práce:

24. února 2012

Termín odevzdání bakalářské práce:

8. června 2012

Ve Zlíně dne 24. února 2012

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Bakalářská práce se v teoretické části zabývá definicí základních informací z oblasti elektrostatického pole, včetně popisu základních elektrostatických jevů. Je dále popsán vznik statické elektřiny, její působení na okolní předměty a konkrétní elektrické součástky. Zabývá se také eliminací elektrostatického náboje, metodami k zabránění vzniku náboje a zkoumáním poškození součástek a způsoby jejich ochrany. Praktická část se zabývá měřeními elektrostatického náboje na vybraných elektrosoučástkách. K určení velikosti elektrického náboje jsou využity dvě metody. První je založena na měření náboje elektrometrem Keithley model 6517A. Druhá metoda využívá měření elektrického napětí na kondenzátoru, (Faradayův pohárek).

Klíčová slova: elektrický náboj, Faradayův pohárek, elektrometr, elektrické součástky

ABSTRACT

This Bachelor thesis deals in theoretical part definition basic information from area electrostatic field inclusive of description electrostatic phenomenon. Is described generation static electricity, its effect on ambient subject and specific electronic components. Deals elimination electrostatic charge, methods prevention generation charge and examine damage component and ways its protection. Practical part deals with measurement electrostatic charge at selected electronic components. To determine size electric charge are used two methods. First is based to measure charge elektrometr Keithley model 6517A. Second method uses measurement voltage on the capacitor (Faraday cup).

Keywords: electric charge, Faraday cup, electrometer, electronic components

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Milanu Navrátilovi Ph.D při měření v laboratoři a také za cenné rady při zpracování celé práce.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně

.....

podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 ELEKTROSTATICKÉ POLE	11
1.1 ZÁKLADNÍ ELEKTROSTATICKÝ JEV	11
1.2 ELEKTRICKÝ NÁBOJ.....	11
1.3 VODIVOST MATERIÁLŮ	12
1.4 COULOMBŮV ZÁKON	12
1.5 JEDNOTKA ELEKTRICKÉHO NÁBOJE.....	13
1.6 INTENZITA ELEKTROSTATICKÉHO POLE	14
1.7 ZNÁZORNĚNÍ ELEKTROSTATICKÉHO POLE.....	14
1.8 GAUSSOVA VĚTA	15
1.9 POTENCIÁL ELEKTROSTATICKÉHO POLE.....	16
1.9.1 Ekvipotenciální plochy.....	17
2 KONDENZÁTOR	18
2.1 ZÁKLADNÍ POJMY	18
2.1.1 Charakteristika kondenzátoru.....	18
2.1.2 Dielektrikum	18
2.1.3 Kapacita.....	18
2.1.4 Elektrostatické stínění	19
3 STATICKÁ ELEKTRINA	20
3.1 VZNIK STATICKÉ ELEKTRINY	20
3.2 ELIMINACE STATICKÉ ELEKTRINY	21
3.2.1 Ionizéry.....	22
3.2.1.1 Eliminace střídavým proudem AC.....	22
3.2.1.2 Eliminace stejnosměrným proudem DC	22
3.2.1.3 Přehled typů ionizátorů	23
3.3 STATICKÁ ELEKTRINA A ELEKTRICKÉ SOUČÁSTKY	23
3.3.1 Triboelektrické nabíjení	25
3.3.2 Metody kontroly statické elektřiny.....	26
3.3.2.1 Identifikace	29
3.3.3 Princip ochrany elektrických součástí	30
3.4 MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO NÁBOJE, ELEKTROMETR	32
3.4.1 Měření elektrického náboje pomocí kondenzátoru	33
3.4.2 Elektrometr Keithley model 6517A	33
3.5 ELEKTROSTATICKÉ EXPERIMENTY	34
3.5.1 Měření hustoty náboje na povrchu tělesa	36
II PRAKTICKÁ ČÁST	37
4 MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO NÁBOJE	38

4.1	POUŽITÉ ELEKTRONICKÉ SOUČÁSTKY	38
4.2	POPIS LABORATOŘE A MĚŘÍCÍCH POMŮCEK	40
4.3	KONSTRUKCE FARADAYOVA POHÁRKU.....	41
4.3.1	Měření kapacity pohárků.....	42
4.4	MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO NÁBOJE POMOCÍ ELEKTROMETRU	46
4.4.1	Pohyb součástek v ochranné PVC tubě.....	46
4.4.2	Běžná manipulace se součástkami	46
4.5	MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO NÁBOJE POMOCÍ KONDENZÁTORU.....	46
4.5.1	Pohyb součástek v ochranné PVC tubě.....	46
4.5.2	Běžná manipulace se součástkami	46
5	ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	47
5.1	MANIPULACE SOUČÁSTEK V OCHRANNÉ TUBĚ.....	47
5.2	BĚŽNÁ MANIPULACE SE SOUČÁSTKAMI	48
5.3	LABORATORNÍ ÚLOHA	50
	ZÁVĚR	52
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	54
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	56
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	58
	SEZNAM OBRÁZKŮ	59
	SEZNAM TABULEK.....	60
	SEZNAM PŘÍLOH.....	61

ÚVOD

Elektrické součástky, obvody nebo celé desky plošných spojů, jsou velmi náchylné na elektrostatický náboj, který může způsobit jejich zničení. Člověk je mnohdy neopatrný při manipulaci, skladování či používání a dochází tak k zbytečným poškozením či úplným zničením, většinou i velmi drahých zařízení. Přitom stačí dodržování základních zásad při manipulaci s těmito zařízeními, nebo za pomoci využití antistatických pomůcek, můžeme tak předejít škodám vzniklých elektrostatickým výbojem.

Statická elektřina je pro většinu elektronických součástek velice nebezpečná. U TTL obvodů se jedná o poškození PN přechodů. CMOS obvody jsou mnohem více náchylnější k proudovému průrazu. V dnešní době integrovaných obvodů se pro minimalizaci využívají SMT technologie společně s menšími vodivými cestami na plošných spojích. U těchto zařízení znamená elektrostatický výboj velikou hrozbu zničení vodivé cesty či konkrétní SMD součástky.

Používání správných pomůcek a také zásad je důležitým předpokladem pro zamezení samotného vzniku elektrostatického výboje. Mnohdy stačí, aby uživatel provedl tzv. uzemnění, stačí dotyk rukou na ústřední topení před samotnou manipulací se součástkami. Dbát a správně pochopit značení na obalech upozorňující na náchylnost zařízení na statickou elektřinu je také velmi důležité, ale dnes bohužel i pomíjivé.

Práce popisuje teorii elektrostatiky, základní jevy a principy. Rozebírá vznik statické elektřiny, její eliminaci a vliv na elektrické součástky, společně s popisem ochrany nejpoužívanějších základních součástek elektroniky. Jsou zde také popsány základní experimenty statické elektřiny, a popis měření s použitým elektrometrem. Součástí práce jsou vyrobeny 3 Faradayovy pohárky pro využití při měření elektrických součástek. S pomocí dosažených výsledků, byla také vytvořena laboratorní úloha na téma měření elektrického náboje na součástkách, kdy je možné její použití v některém elektrotechnickém předmětu na FAI UTB.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ELEKTROSTATICKÉ POLE

1.1 Základní elektrostatický jev

Elektrostatický jev lze pozorovat u tření materiálů, například je tento jev patrný u tření plastové tyče o vlněnou látku, dochází tak k přitahování drobných tělísek, jako jsou kousky papíru na plastovou tyč. Tedy tyto tělesa na sebe působí silami, jde o tzv. elektrické síly. Tělesa mezi kterými působí takové síly, jsou nabitá, tedy mají elektrický náboj. Zelektřizovaná tělesa na sebe nepůsobí na dálku, ale prostřednictvím elektrostatického pole.

1.2 Elektrický náboj

K vysvětlení elektrických jevů slouží skalární fyzikální veličina, elektrický náboj. Elektrické síly mohou být přitažlivé a odpudivé, to vysvětluje existenci dvou druhů elektrického náboje, kladný a záporný. Tělesa tak mohou být nabita kladně či záporně. Některé tělesa jsou elektricky neutrální, to znamená, že makroskopický náboj je nulový. Elektrický náboj je vždy pozorován v souvislosti se svým nositelem. Vlastnosti vzájemných interakcí nabitých částic popisují tři zákony.

Zákon zachování náboje

Hodnota celkového náboje je neměnná, je-li elektrická soustava izolovaná tak, že její hranicí nemohou procházet žádné náboje. Celkový náboj je tak dán algebraickým součtem všech elektrických nábojů v soustavě.

Zákon kvantování náboje

Celkový elektrický náboj je vždy celočíselným násobkem elementárního náboje, který je nejmenší a dále nedělitelný. Záporný elementární náboj je elektron, kladný je proton. Elementární náboj má hodnotu : $e = 1,602177 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. [5]

Zákon o invariantnosti náboje

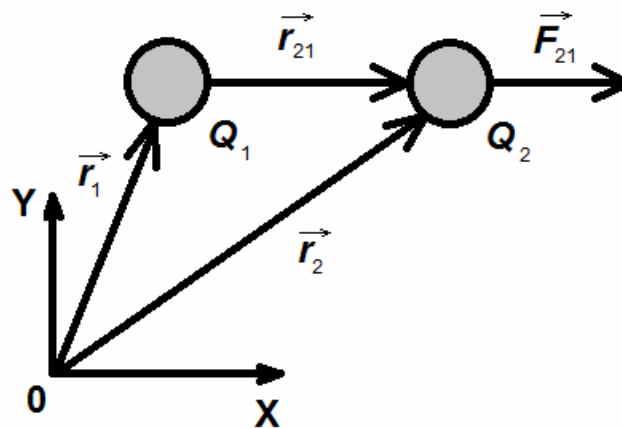
Při pohybu náboje se jeho hodnota nemění, je ve všech souřadnicových soustavách invariantní . Hodnota náboje bude vždy stejná, nezávisle na jeho pohybu. [2]

1.3 Vodivost materiálů

Některé elektrony v oblasti atomu jsou poutány ke kladnému jádru volněji, jiné naopak pevněji. Materiály v pevném stavu mají jádra atomu uspořádány v pevných, neproměnných vzdálenostech, vytvářející tak prostorovou mříž. Některé materiály mají několik volných elektronů poutaných k jádru, ty se mohou od jádra vlivem elektrických nábojů sousedních atomů odpoutat. Tyto elektrony jsou nazývány vodivostními elektrony. Látky, které mají volné elektrické náboje, elektrony nebo kladné či záporné ionty, jsou značeny jako vodiče, nebo-li materiály, které vedou elektrický proud, převádí tak mezi dvěma vodiči elektrický náboj. U látek, které naopak nemají volné elektrony, jsou elektrony pevně poutány k jádru atomů, je tak znemožněn pohyb nábojů a látka nemůže přenášet elektrický náboj, takové látky se označují jako izolátory. Slouží tak k vzájemnému elektrickému oddělení různých těles. Některé izolátory obsahují volné elektrony, avšak ve velmi malém množství, přenášejí tak náboj velmi pomalu. Dokonalý izolant je například vakuum. [1] [5]

1.4 Coulombův zákon

Náboje, jenž jsou rozloženy na zelektrizovaném tělese, mají v každém bodě prostoru nacházejícím se vně tělesa, vektor intenzity pole \vec{E} . Vektor je definován právě rozložením nábojů. Z toho vyplývá, že elektrostatickou soustavu lze definovat rozložením nábojů na zelektrizovaném tělese, nebo vektorem intenzity v každém bodě prostoru. Coulombův zákon charakterizuje vzájemné působení dvou bodových nábojů. Bodový náboj je náboj, rozložený v prostoru tak, že jeho rozměry jsou malé ve srovnání se vzdáleností, v níž zkoumáme elektrické účinky náboje.



Obrázek 1 coulombův zákon bodových nábojů [autor]

Dva bodové náboje Q_1 a Q_2 na sebe působí silou, která je přímo úměrná součinu obou nábojů a nepřímo úměrná čtverci vzdáleností mezi nimi.

$$\vec{F}_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q_1 Q_2}{r_{21}^2} \frac{\vec{r}_{21}}{r_{21}} \quad (1)$$

ϵ - je permitivita prostředí, v němž se náboje nacházejí

$\vec{r}_{21} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$ - je rozdílový vektor

Směr jakým bude síla působit, závisí na znaménkách nábojů, jsou-li oba náboje kladné, působí síla \vec{F}_{21} na náboj Q_2 ve směru vektoru \vec{r}_{21} , síla má odpuzivý účinek. Jsou-li náboje záporné, je směr působení síly opačný, přitažlivý účinek. [1] [2]

1.5 Jednotka elektrického náboje

Vycházíme-li z mezinárodní soustavy jednotek SI, je jednotka náboje definována pomocí jednotky proudu ampér. Jednotkou elektrického náboje je coulomb, značí se písmenem C. Definice je, náboj je roven 1 C, projde-li průřezem vodiče proud 1 A za 1 s. Lze tak odvodit jednotku náboje v SI soustavě A.s. Z Coulombova zákona je nutno určit také jednotku permitivity. Tato konstanta se dá rozepsat na součin ϵ_r (relativní permitivita) bezrozměrná veličina a ϵ_0 (permitivita vakua).

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (2)$$

Pro permitivitu vakua platí z Maxwellovy rovnice výraz (3).

$$\varepsilon_0 = \frac{10^7}{4\pi c^2} = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2 \quad (3)$$

c - je rychlost šíření elektromagnetických vln ve vakuu $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$. [5]

1.6 Intenzita elektrostatického pole

V elektrostatickém poli se projevují silové účinky nábojů, ty lze popsat vztahem (4).

$$\vec{F} = Q\vec{E} \quad (4)$$

\vec{E} - je vektor intenzity elektrostatického pole.

Intenzita v daném bodě je vektor, který je roven poměru síly působící v daném bodě na náboj Q . Velikost intenzity elektrostatického pole bodového náboje je přímo úměrná velikosti tohoto náboje a nepřímo úměrná čtverci vzdáleností od náboje viz (5).

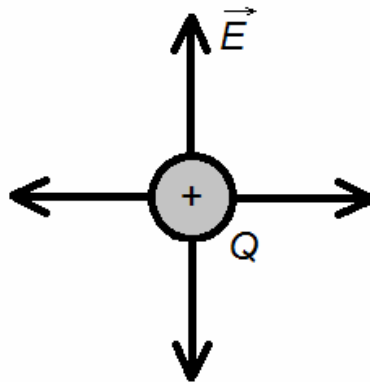
$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \frac{1}{r^2} \vec{r}^0 \quad (5)$$

\vec{r}^0 - je jednotkový vektor ve směru polohového vektoru.

Směr jakým intenzita působí, závisí, zda je náboj kladný nebo záporný. Je-li náboj kladný, znamená to, že vektor intenzity působí ve směru polohového vektoru, směr od náboje tzn. odpudivá síla. Záporný náboj naopak vektor intenzity, míří ve směru k náboji, přitažlivá síla. [1] [2]

1.7 Znázornění elektrostatického pole

K zobrazení průběhu pole určité soustavy slouží orientované křivky, označované jako siločáry. Je to křivka, jejíž tečna má v každém bodě směr intenzity elektrostatického pole, siločáry vystupují z kladných nábojů a vstupují do nábojů záporných a nemohou se vzájemně protínat. Hustota siločar je závislá na velikosti intenzity, největší intenzita je v místě největší hustoty siločar. Je-li velikost intenzity ve všech bodech prostoru stejná, tedy hustota siločar se nemění, jsou tyto pole označována jako homogenní. Siločáry jsou v tomto poli rovnoběžné s vektorem intenzity pole.



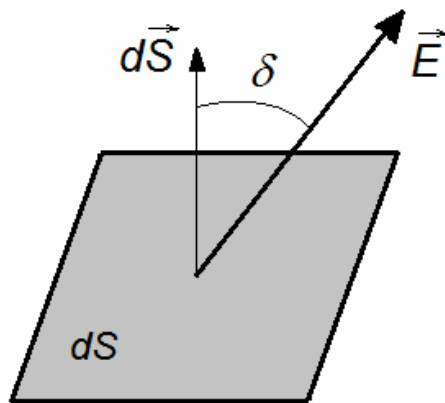
Obrázek 2 elektrostatické pole bodového náboje [autor]

1.8 Gaussova věta

Obecná definice je, že tok vektoru intenzity elektrického pole uzavřenou plochou je roven algebraickému součtu všech nábojů nacházející se uvnitř této plochy, dělena permitivitou daného prostředí.

Bereme-li v potaz pouze elementární plochu dS vloženou do elektrostatického pole, závisí počet siločar procházející touto plochou na velikosti intenzity pole, orientaci plochy vzhledem k vektoru intenzity a velikosti plochy. Počet siločar je maximální pro danou velikost intenzity tehdy, je-li plocha dS orientována kolmo k vektoru intenzity \vec{E} . Bude-li plocha orientována rovnoběžně s vektorem intenzity, bude počet siločar nulový. V případě, kdy je plocha natočena tak, že svírá s vektorem intenzity určitý úhel δ . Závisí pak počet siločar na velikosti kolmého průmětu plochy $dS_n = dS \cos \delta$ do směru vektoru intenzity. Tuto vlastnost vyjadřuje tok vektoru intenzity elektrostatického pole, značí se písmenem Ψ .

$$\Psi = \int_s E dS \cos \delta \quad (6)$$



Obrázek 3 tok vektoru intenzity elementární plochou [autor]

[1]

1.9 Potenciál elektrostatického pole

Potenciál je skalární veličina představující množství práce, potřebné k přenesení jednotkového náboje, z daného bodu do bodu s nulovým potenciálem dělené hodnotou přenášeného náboje. Bod s nulovým potenciálem představuje bod v nekonečnu. Je-li dráha uzavřená, platí, že koncový a počáteční bod jsou totožné, tedy práce je nulová. Potenciál značíme písmenem V jednotkou je volt V.

$$V = \int_A^{\infty} \vec{E} \cdot d\vec{r} \quad (7)$$

Potenciál závisí na souřadnicích bodu v němž se určuje, rozdíl potenciálů dvou bodů se označuje jako napětí. Napětí se značí písmenem U jednotkou je volt V.

$$U_{AB} = V_A - V_B \quad (8)$$

Práce elektrostatický sil je pro přenesení bodového náboje z bodu A do bodu B rovna součinu velikostí tohoto náboje a rozdílu potenciálu v počátečním a koncovém bodě. Práce je značena W .

$$W = \int_A^B Q_0 \vec{E} \cdot d\vec{r} = Q_0 U_{AB} \quad (9)$$

Potenciál elektrostatického pole uvnitř nabitého vodiče je konstantní a má stejnou velikost, jako potenciál na povrchu vodiče. Povrch vodiče je zároveň ekvipotenciální plochou. [1][2]

1.9.1 Ekvipotenciální plochy

Všechny body ekvipotenciální plochy mají stejnou velikost potenciálu. Pro bodový náboj platí, že ekvipotenciální plochy jsou kulové se středem v tomto náboji. Siločáry jsou v každém bodě kolmé na ekvipotenciální křivku. Z poznatku o práci elektrostatický sil přenosu náboje platí, přeneseme-li mezi dvěma body na ekvipotenciální křivce náboj je tato práce nulová proto, že rozdíl potenciálu na této křivce je roven nule.

2 KONDENZÁTOR

2.1 Základní pojmy

2.1.1 Charakteristika kondenzátoru

Kondenzátor je elektronická součástka používající se pro uchování elektrického náboje. Základní vlastností je tak kapacita, viz níže, s důležitým parametrem maximálním povoleným napětím a typem použitého dielektrika. Principem je, že kondenzátor se skládá ze dvou vodivých desek oddělených dielektrikem, na tyto vodivé desky se přivádí elektrický náboj opačné polarity. Dielektrikum udržuje přitažlivou elektrickou sílu, kterou by se částice s náboji přitahovaly, čím by docházelo k neutralizaci a vybíjení elektrických nábojů.

2.1.2 Dielektrikum

Dielektrikum představuje určitý typ izolantu, který má schopnost polarizace. Polarizace nastává tehdy, vložíme-li dielektrikum do elektrostatického pole. Zde dochází k dvěma různým chování tohoto izolantu, proto se označuje, buď jako polární dielektrikum nebo nepolární. Polární mají rozloženy náboje tak, že vykazují vlastnost elektrického dipólu, molekuly mají vlastní elektrický dipólový moment. Naopak nepolární dielektrika, atomy nebo molekuly nemají vlastní elektrické dipólové momenty. Polarizací nepolárních dielektrik dochází při působení přitažlivé a odpuzivé síly k tomu, že atomy nebo molekuly získají elektrický dipólový moment. Dielektrikum se používá jako elektrický izolant k izolaci vodičů, oddělení vodivých částí, nebo u kondenzátorů pro zvýšení kapacity.

2.1.3 Kapacita

Schopnost pojmout určité množství náboje se nazývá kapacita. Značí se písmenem C jednotkou je farad F. Definuje se jako podíl náboje kondenzátoru a rozdílem potenciálu mezi kladně a záporně nabitým vodičem.

$$C = \frac{Q}{U} \quad (10)$$

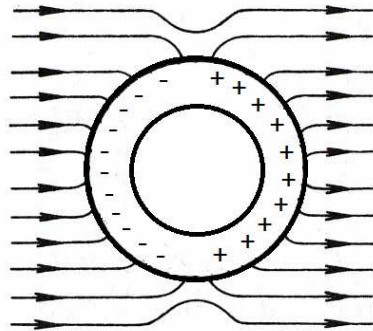
Velikost kapacity závisí nejen na uspořádání nabitých vodičů, ale také na vlastnosti dielektrika. Nahradíme-li dielektrikum z vakua dielektrikem o dané relativní permitivitě, kapacita se ϵ_r krát zvýší. Relativní permitivitu lze definovat jako poměr kapacity s dielektrikem C a kapacity s vakuem C_0 .

Tabulka 1 relativní permitivita různých látek [3]

Dielektrikum	Vakuum	Vzduch	Tvrzený papír	Oxid hlinitý
ϵ_r	1	1,00055	4	8,5

2.1.4 Elektrostatické stínění

Za předpokladu umístění vodiče uvnitř jiného vodiče, dochází k tomu, že vnější vodič stíní vnitřní vodič od účinku elektrostatického pole, viz Obr. 4, kde v dutině vodivého válce elektrostatické pole není. Stínění představuje jakési zeslabení toku energie, je to pasivní prostředek pro omezení interferenčních jevů v elektrických zařízeních. Stínící účinek je velmi závislý na mnoha faktorech samotného provedení, jako je kvalitní uzemnění, stínící materiál musí mít maximální odpor 100-500 $\mu\Omega$. [5] [2]



Obrázek 4 elektrostatické stínění [autor]

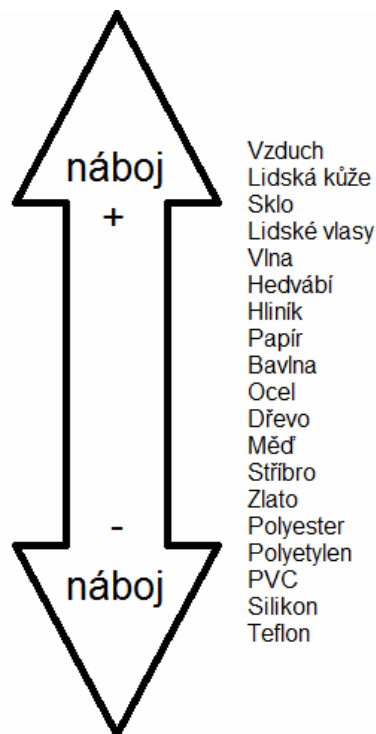
3 STATICKÁ ELEKTRINA

3.1 Vznik statické elektřiny

Obecně lze definovat statickou elektřinu, jako elektrický výboj způsobený nerovnováhou elektronů na povrchu materiálu, které působí v blízkosti na objekty. Má-li tedy materiál elektrický náboj, je elektrostaticky nabitý, a to kladným nebo záporným nábojem. Toto nabití je časově omezené, jinými slovy, každý materiál má určitý odpor, který způsobuje pozvolné zmenšování elektrostatického nabití. Statické elektřina vzniká třemi způsoby, třením, indukcí a separací.

Tření

Třením dvou materiálů dochází k přesunutí povrchových elektronů z jednoho materiálu na druhý. Směr tohoto pohybu elektronu je definován podle triboelektrické řady viz Obr. 5.



Obrázek 5 triboelektrická řada [autor]

Materiály s kladným nábojem mají tendenci odevzdávat povrchové elektrony, nabíjí se kladně. Naopak záporný náboj představuje získávání elektronů, záporně nabitě materiály.

Elektrická indukce

Přiblížením záporně nabitého tělesa A k vodivému, avšak elektricky neutrálnímu tělesu B, dochází k porušení elektrické rovnováhy. Volné elektrony tělesa B jsou odpuzovány do vzdálenější části tělesa, kde je přebytek elektronů, tato část je nabita záporně, naopak v opačné části, jenž je blíž k tělesu A, je elektronů nedostatek, nabití je kladné. Vliv elektrostatického pole tělesa A nastalo v tělese B k posunutí a rozložení elektrických nábojů. Po oddálení těchto dvou těles se rovnováha obnoví. Dojde-li při onom přiblížení dvou těles k odvedení odpuzovaných elektronů z tělesa B do země, např. dotykem rukou, stane se těleso po oddálení kladně nabitě. Na rozdíl od nábojů získaných třením, kde dochází ke kontaktu s nabitým tělesem, se náboje ve vodiči B nazývají indukované.

Separace

Tato metoda vzniku elektrostatického náboje je podobná tření. Při dotyku dvou materiálů, povrchové elektrony se nachází velmi blízko u sebe, u separace projevují tendenci k přilínání k jednomu nebo druhému materiálu, v závislosti na jejich relativním umístění a triboelektrické řadě, příklad této metody je u odvíjení materiálů. [9]

3.2 Eliminace statické elektřiny

Eliminovat statickou elektřinu znamená, vybrat správný materiál, vyhnout se suchým prostorům, nezpůsobit chladnutí materiálu. Základem zabránění vzniku elektrostatických nábojů je vyrovnání náboje na povrchu tělesa. U kladně nabitého tělesa je nutné přemístit elektrony na povrch, u záporně nabitého je tomu naopak, kdy přebytek elektronů z povrchu je nutno odebrat. Eliminace uzemněním, těleso jenž je uzemněno, neumožňuje vznik elektrostatického náboje. Zvýšení vodivosti daných předmětů umožní odvedení elektrostatických nábojů, k zvýšení vodivosti se používají antistatické chemické povlaky, (nanášeny sprejem, natíráním nebo namáčením). Chemikálie takto nanášené nevytvoří vodivou plochu, ale jen umožňují absorbovat vlhkost ze vzduchu.

3.2.1 Ionizéry

Princip na kterém pracují ionizéry je takový, že generují proud vzduchu s kladně a záporně nabitými částicemi. Proudění takového vzduchu na konkrétní povrch způsobí neutralizaci elektrického náboje. Pracují na dvou principech, DC a AC metoda. Jedny z prvních ionizátorů, dnes už nepoužívaných, využívaly radioaktivní zařízení, především prvky polonia a radia jenž byly zapouzdřeny do keramických kroužků a připevněny k neutralizačním zařízením. Tyto materiály dokázaly vysokou rychlostí bombardovat okolní molekuly vzduchu částicemi za vzniku ionizace. Ionizátory využívající jadernou energii, nevyžadují elektrické připojení a bylo možné je používat v nebezpečných prostředích. Kvůli poločas rozpadu byly tyto zařízení nuceny obnovovat jednou ročně.

3.2.1.1 *Eliminace střídavým proudem AC*

Ionizér obsahuje pouze jeden hrot, kde dochází k elektrickému výboji, který střídavě produkuje kladné a záporné ionty. Tento hrot je buzen střídavým napětím a rychlost generující kladné a záporné vlny iontů je závislá na frekvenci budicího signálu. Dochází tak dělení na nízkofrekvenční a vysokofrekvenční metody. Vysokofrekvenční metoda vytváří stabilní prostředí s vysokou koncentrací iontů. Nízkofrekvenční metoda naopak může vytvořit prostředí, které obsahuje části jen kladných nebo jen záporných iontů, což může způsobit chvilkové nabití těles, jenž může některou součástku zničit.

3.2.1.2 *Eliminace stejnosměrným proudem DC*

Na rozdíl od AC metody, se v této metodě používá dvou hrotů pro vznik elektrického výboje. Jeden je polarizován kladně a druhý záporně, jeden hrot tak produkuje kladné a druhý záporné ionty, které se postupně smíchají. Této metody se využívá při ionizaci na větší vzdálenosti od ionizačního hrotu. Výhodou je také tvarování vln iontů, lze měnit trvání záporné a kladné vlny. U těles, kde předpokládáme eliminaci kladného náboje, je možné nastavit trvání záporné části déle, než u hrotu generující kladné ionty, tím dochází k efektivnější neutralizaci tělesa.

3.2.1.3 Přehled typů ionizátorů

Zařízení pro neutralizaci statické elektřiny jsou vyráběna v mnoha různých provedeních a konfiguracích, důležité je proto jejich konkrétní použití, kde záleží na podmínkách a požadavcích jejich využití.

Antistatické tyče jsou tvořeny řadou emitačních hrotů, využívají se pro ionizaci na plochých materiálech, jako jsou fólie, papír a textilie. Pracovní dosah těchto tyčí je až 1 m v závislosti na rychlosti pohybu materiálu. Účinnější jsou ionizační tyče s podporou stlačeného vzduchu, nebo mohou využívat laminárního proudění vzduchu, např. v čistých prostorech, kde dochází k výrobě elektronických součástek. Využití podpory stlačeného vzduchu je možné, třeba k odstranění nečistot z materiálu, tyto ionizátory se označují jako vzduchový nůž s ionizační tyčí, proud vzduchu vystupuje z úzké štěrbině po celé délce tyče.

Ionizační vzduchové ventilátory jsou tvořeny emitačními hroty, přes které je ventilátorem tlačěn vzduch na požadované místo. Pracovní dosah je až na vzdálenost 1,5 m a to jak u přenosných modelů, tak i statických modelů umístěných pevně na pracovním stole.

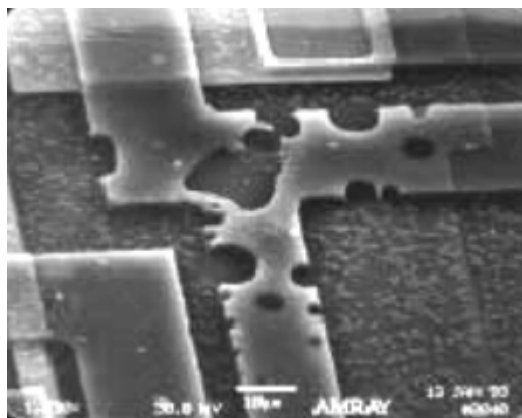
Ionizační pistole a trysky, zde se využívá stlačený vzduch nebo dusík, trysky tak zajišťují koncentrovaný bodový zdroj vzduchu a umožňují tak čištění a neutralizaci elektrostatických nábojů na součástkách. Některé druhy ručních pistolí obsahují také filtry pro možné použití v čistých prostorech.

Zařízení pro odsávání nečistot se skládá z hlavice a odsávací jednotky se sběrným systémem. Antistatické tyče jsou umístěny v hlavici, v některých typech zařízení obsahují i kartáč či ofukovací trubici se stlačeným vzduchem. Hlavní použití je k čištění plochých materiálů, proto se také montuje do výrobních linek nebo tiskových strojů. [12]

3.3 Statická elektřina a elektrické součástky

Statická elektřina je také definována jako elektrostatický výboj, tedy přenos elektrického náboje mezi tělesy o různých potenciálech. Tento výboj může být vyvolán přímým kontaktem, nebo indukován elektrostatickým polem, je označován zkratkou ESD Electro Static Discharge. Některé elektronické součástky jsou citlivé na elektrostatický

výboj, může se jednat také o celý integrovaný obvod, obecně jsou označovány zkratkou ESDS Electrostatic Discharge Sensitive Device. Poškození, které výboj může způsobit, je závislý na velikosti náboje, a také cestou, neboli oblastí, kterou náboj prochází, to zejména u plošných spojů osazenými mnoha součástkami. Může dojít k průrazu izolační vrstvy, popřípadě vzniku zkratu. Poškození ovšem mohou být slabší, tedy nedochází tak k úplnému zničení součástky, tyto vady se označují jako latentní. V součástkách tak mnohdy dojde jen k změně parametrů. Ochrana před těmito výboji je i vyhrazeným pracovním prostorem EPA ESD Protect Area, ve kterém lze manipulovat se součástkami citlivými na elektrostatický výboj. Omezit vznik elektrostatických nábojů lze také pomocí pracovních předmětů, povrch stolu, podlaha, oděv.



Obrázek 6 účinky elektrostatického výboje na vodivé cesty plošného spoje [13]

Tabulka 2 napětí nebezpečná elektrickým součástkám

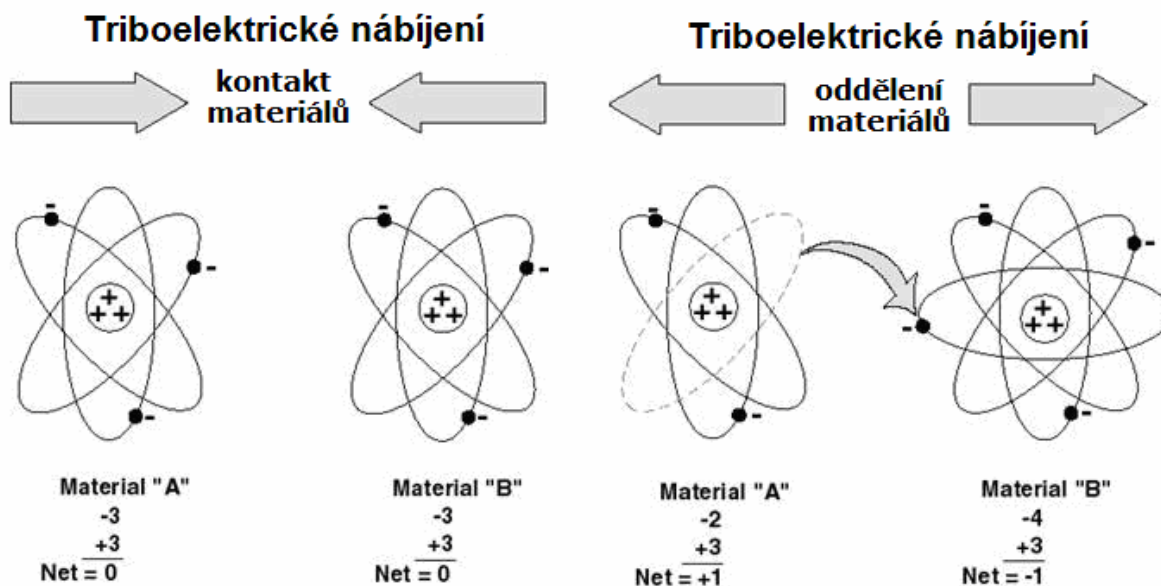
Napětí [V]	Součástka
30	MOS
100	MOSFET
380	Bipolární
1000	TTL
300	Schottkyho dioda
300	Planární dioda
3000	Rezistor

3.3.1 Triboelektrické nabíjení

Vytváření elektrostatického náboje dotykem či separací, neboli oddělením materiálů, je nazýváno jako triboelektrické nabíjení. Princip je vysvětlen na Obr.7, při kontaktu dvou materiálů, jak zobrazuje levá část obrázku, jsou oba materiály elektricky neutrální. Dotykem těchto materiálů dochází k přenosu záporných elektronů mezi povrchy. Které těleso získá elektrony a které elektrony ztrácí, záleží na mnoha aspektech, druhu materiálů, vlhkosti prostředí, rychlosti oddělení a mnoha dalších.

Tabulka 3 příklady prostředků generujících statickou elektřinu [6]

Prostředky	Relativní vlhkost	
	10-25%	65-90%
Člověk sedící na lavičce	6 000 V	100 V
Chůze po vinylové podlaze	12 000 V	250 V
Chůze po koberci	35 000 V	1500 V
Zvednutí tašky ze stolu	20 000 V	1200 V



Obrázek 7 triboelektrické nabíjení, dotyk a oddělení materiálů [6]

3.3.2 Metody kontroly statické elektřiny

Člověk sám může být generátor statické elektřiny, chůzi, pohyby při manipulaci se zařízeními se generuje až několik tisíc voltů. Citlivost samotné součástky na elektrostatický výboj, rozdělují 3 základní normalizované modely HBM, MM, CDM, ty pokrývají téměř 95% všech reálných poruch na součástkách. Klasifikují tak citlivost jednotlivých součástek, což je základním prvkem pro vytvoření správného systému ochrany před ESD už od výroby elektronických sestav. Pro klasifikaci odolnosti ESDS součástky je nutné znát právě všechny 3 modely odolnosti, tyto poznatky tak umožňují vytvoření funkčního systému ochrany před ESD.

HBM – Human Body Model, neboli model lidského těla, jde o nejčastější případ přenosu elektrostatického náboje na elektrické součástky. Polovodičové součástky se třídí dle HBM ESD odolnosti do specifických tříd viz Tab.č.4. dle rozsahu napětí elektrostatického náboje, jenž je člověkem generováno.

Tabulka 4 třídění polovodičových součástek dle odolnosti HBM v IEC 60749-26 [8]

Třída	Napěťový rozsah
0	$U < 250V$
1A	$250V \leq U < 500V$
1B	$500V \leq U < 1000V$
1C	$1000V \leq U < 2000V$
2	$2000V \leq U < 4000V$
3A	$4000V \leq U < 8000V$
3B	$8000V \leq U$

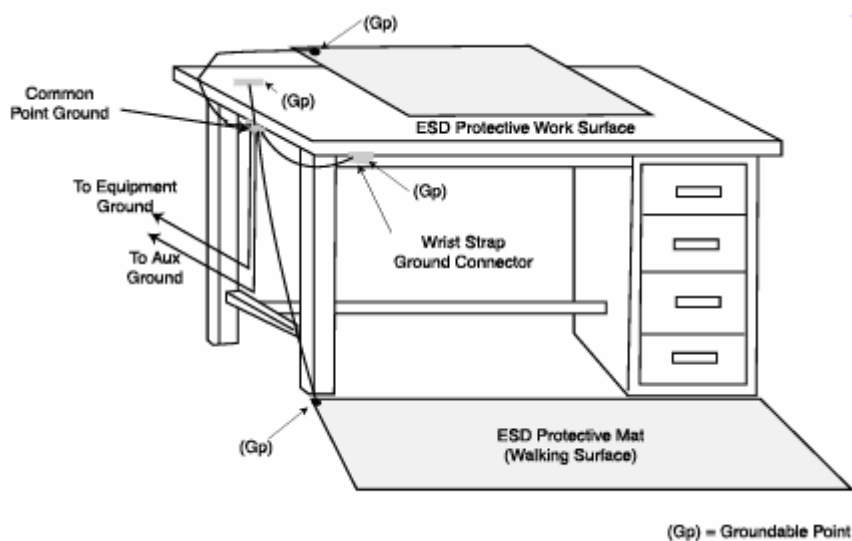
Ochrany před generováním statické elektřiny lidským organismem je několik. Při ruční manipulaci s citlivými součástkami se využívá uzemňovací náramek. Náramek je připojen na zápěstí s pomocí kabelu, potenciál je veden do země. Typické hodnoty odporu manžety tohoto náramku jsou, velikost 1 MΩ, výkon 0,25 W s pracovním napětím do 250V. Další důležitou metodou kontroly je materiál použitý v podlaze a obuvi. Některé podlahové materiály přímo snižují možnost triboelektrického nabíjení, čímž mohou minimalizovat shromažďování statické elektřiny na židlích, vozících či jiných těles

pohybujících se po podlaze. Úplné minimalizace se dá dosáhnout použitím izolační obuvi a koleček na pohyblivých tělesech. V suchých prostorech, kde statická elektřina vzniká častěji, je také nutné brát v úvahu použité oblečení. Mnoho oděvních materiálů velmi snadno generuje elektrostatický výboj, proto se používají staticky uzemněné oděvy pro minimalizaci výbojů. Antistatické pracovní oděvy jsou vyrobeny standardně z bavlněných látek, tyto látky mají v sobě vetkány kovové elektricky vodivé vlákno. Vodivá vlákna se vyrábí z polyesterového vlákna, které je na povrchu upraveno například uhlíkem, nebo se využije přímo celokovového vlákna.

Čisté prostory vyžadují zvláštní ohledy na ochranu proti statické elektřině. Mnoho procesů výroby polovodičů, využívá materiály obsahující částice uhlíku či jiné povrchově aktivní přísady, které omezují použití některých uzemňovacích zařízení. Proto je v těchto případech klíčové využití izolovaných podlah a správné obuvi.

K omezení škod z ESD se využívá pracovních stanic, které jsou speciálně konstruovány a vybaveny. Taková stanice poskytuje prostředky pro připojení všech částí, deska stolu, manipulační zařízení a různé příslušenství do společného bodu svedeného na zem. Mohou být opatřeny dalšími uzemňovacími zařízeními, například ionizátory. Poskytují také elektrickou cestu vedenou do země, pro řízené rozptýlení jakýchkoliv vzniků statických výbojů vlivem použití mnoha materiálů, které jsou v kontaktu s pracovní plochou. Na takovém pracovišti tak lze používat a manipulovat se součástkami, nebo přístroji citlivými na elektrostatický výboj. [8]

[6] [15]



Obrázek 8 pracovní stanice ESD [6]

MM – Machin Model neboli strojový model, specifikující výboj z nabitého vodivého zařízení nebo samotných testovacích přípravků. Obecně lze říci, že stroj se chová jako sériový kmitavý obvod, opakují se tak proudové špičky, jenž mohou zničit celé zařízení. Zde jsou opět normalizovány třídy, dle kterých jsou polovodičové součástky tříděny dle odolnosti. Tento model je někdy označován jako nejhorší případ HBM, představuje kupříkladu výboj sedícího jednotlivce přes kovový vodivý nástroj je modelován modelem RC, poruchy takto vzniklé jsou podobné jako u modelu HBM ovšem při daleko nižších úrovních napětí.

Tabulka 5 rozdělení součástek dle odolnosti MM v IEC 60749-27 [8]

Třída	Napět'ový rozsah
M1	$U < 100V$
M2	$100V \leq U < 200V$
M3	$200V \leq U < 400V$
M4	$400V \leq U$

CDM – Charged Device Model, představuje model nabíjení součástky, neboli samotný přenos elektrického náboje z nabitě součástky. Součástka je tzv. Kondenzátor s téměř nulovým sériovým odporem, proto je výboj velice krátký, jednotky nano sekund ovšem proudová špička dosahuje až desítek ampér. CDM simuluje reálné případy ESD

v průběhu manipulace, značení, zvedání a umísťování komponentů, tedy jde o vybití nabitého zařízení do uzemnění přes jediný pin zařízení.

Tabulka 6 rozdělení součástek dle odolnosti CDM v IEC 60749 [8]

Třída	Napět'ový rozsah
C1	$U < 125V$
C2	$125V \leq U < 250V$
C3	$250V \leq U < 500V$
C4	$500V \leq U < 1000V$
C5	$1000V \leq U < 1500V$
C6	$1500V \leq U < 2000V$
C7	$2000V \leq U$

3.3.2.1 Identifikace

K zamezení poškození součástek či celých zařízení, se používají identifikační symboly. Nejčastěji se uvádějí symboly pro identifikaci ESDS a ESD.



Obrázek 9 citlivostní symbol ESD [6]

Symbol je ve tvaru trojúhelníku představující „POZOR“, přeškrtnutí znamená „NEDOTÝKEJTE SE“. Tento symbol se aplikuje nejčastěji na integrované obvody, desky plošných spojů, které jsou citlivé na statickou elektřinu a nesmí se jich uživatel dotýkat.



Obrázek 10 ochranný symbol ESD [6]

Oblouk nad trojúhelníkem znamená ochranu, nebo-li jedná se o symbol značící ochranný materiál. Bývá umístěn na zápěstním řemínku, antistatických oděvech, židlích a jiných předmětech poskytujících ochranu před ESD. [6] [15]

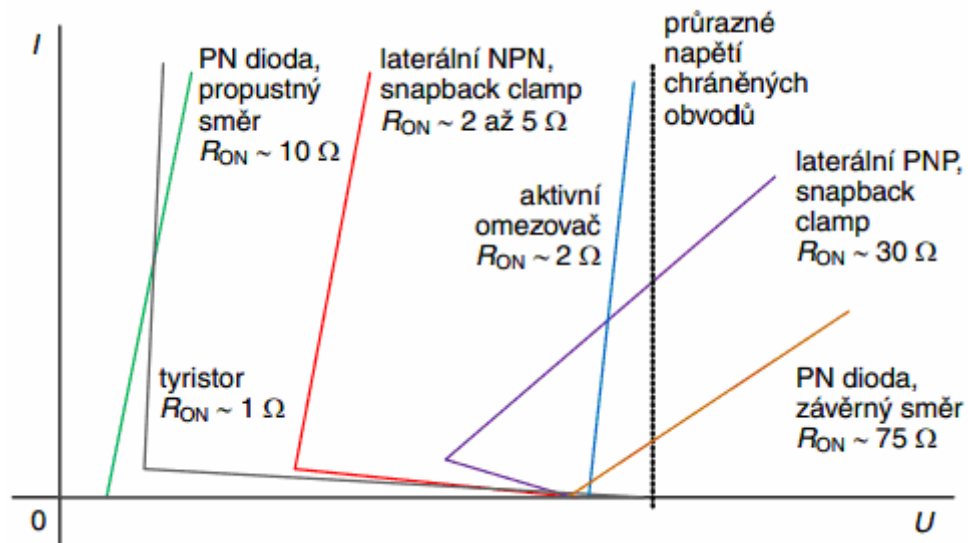
3.3.3 Princip ochrany elektrických součástek

Základními požadavky při ochraně elektrických součástek jsou:

- omezení napětí odvedením proudu vzniklého při výboji,
- rychlé sepnutí, pod 1ns,
- malý odpor v sepnutém stavu,
- minimální plocha čipu,
- malá kapacita,
- velká proudová zatížitelnost,
- malý sériový odpor,
- odolnost proti opakovaným pulzům,
- nesmí ovlivnit správnou funkci obvodu,
- nesmí zvýšit klidový svodový proud.

Ochranné obvody se rozlišují podle typu voltampérové charakteristiky. Omezovací ochrana a spínací ochrana se záporným dynamickým odporem. Omezovací ochrana se chová obdobně jako Zenerova dioda. Vysoký výkon je nevýhodou pro velká pracovní

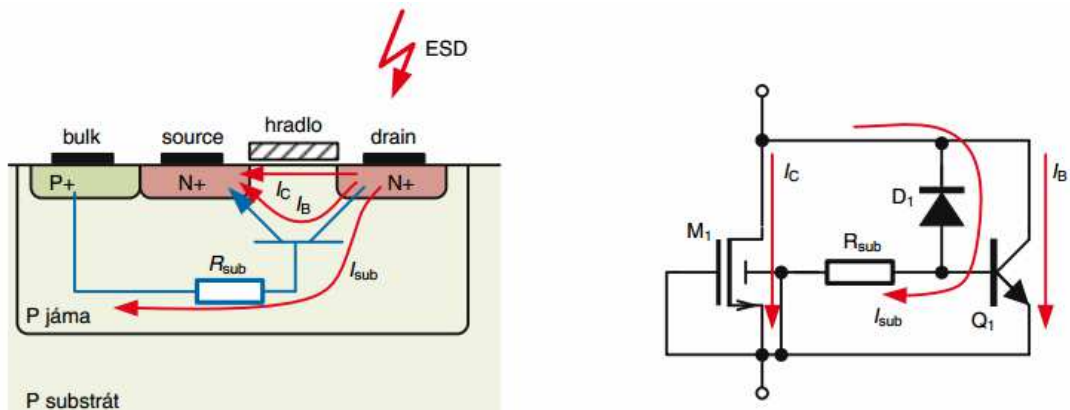
napětí, vedoucí k větší velikosti ochranných prvků, které musí zpracovávat velké výkonové ztráty. Použití omezovací ochrany je především u napájecích vývodů. Spínaná ochrana pracuje tak, že překročí-li napětí spouštěcí napětí, sníží se napětí na zařízení a obvod pracuje s velkými proudy s nižším napětím, získáme tak nižší výkonovou ztrátu. Tyto ochrany jsou rychlejší a menší, než je tomu u omezovací ochrany, avšak použití u napájecích vývodu je zde omezeno v závislosti na spínacím napětí.



Obrázek 11 voltampérové charakteristiky různých ochran proti ESD [11]

Mezi nejjednodušší ochrany proti ESD patří dioda s PN přechodem, propustný směr vykazuje velmi malý úbytek napětí a během samotného výboje je schopna odvést velké proudy, naopak použití v závěrném směru vlivem vysokého odporu není vhodné.

Laterální NPN tranzistor v režimu se záporným dynamickým odporem v grafu zobrazen červeně viz Obr.11. Jde o princip využíván u CMOS součástek, kde NMOS tranzistor má parazitní laterální bipolární tranzistor NPN, tento parazitní tranzistor je aktivován pouze vlivem elektrostatického pulzu, vzhledem k jeho velkému přípustnému proudu je schopen odvést během výboje značnou část proudu. Mnoho ochranných obvodů využívá právě tranzistoru NMOS, jenž může být navržen v několika konfiguracích, v závislosti zda je hradlo tranzistoru NMOS uzemněno, nebo je kapacitně vázáno pro zlepšení sepnutí ochrany.



Obrázek 12 tranzistor NMOS s uzemněným hradlem [11]

Základní nastavení tranzistoru s uzemněným hradlem viz Obr. 12. Při elektrostatickém výboji je indukovaný proud vložen do drainu tranzistoru. Po nahromadění elektrického pole uvnitř celého substrátu nastává lavinový průraz. Tento průraz generuje tok elektronů směrem k drainu a díry směřují do substrátu, tento proud způsobuje úbytek napětí na odporu substrátu. Proud se tak zvětšuje s růstem driftového proudu a napětí na odporu substrátu dosáhne přibližně 0,7 V, jenž vede otevření přechodu editor-báze. Dosáhne-li úbytek napětí spínacího napětí pro laterální tranzistor NPN, tranzistor sepne a začne pracovat se samonapájecím režimem značeno jako (*self bias*). Dochází-li k zvětšování proudu drainu, který vyvolal Elektrostatický výboj, dostává se tranzistor NMOS do režimu tepelného průrazu, jenž vede k nevratnému poškození obvodu. V Obr.11, je uveden také laterální PNP tranzistor s režimem snapback, ten se pro svůj vysoký odpor v sepnutém stavu příliš nepoužívá. [11]

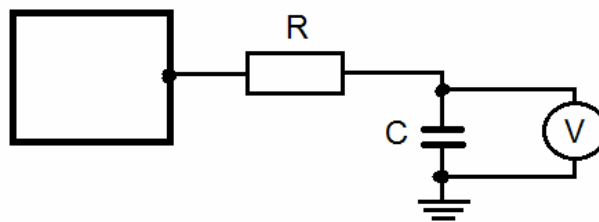
3.4 Měření elektrického náboje, Elektrometr

Součástí elektrostatiky je také měření a samotné určení velikosti elektrického náboje, k tomuto účelu se nejprve používal elektroskop. Je to druh elektrometru, jehož princip je v tom, že přiváděný elektrický náboj způsobí odpudivou sílu na souhlasně nabitých částech. Nevýhodou je nepřesnost způsobena malou citlivostí a také nedefinování znaménka přiváděného náboje. Elektrometr měří nejen elektrický náboj, ale také rozdíl potenciálů. Má velkou citlivost, která umožňuje definovat také znaménko měřeného elektrického náboje.

3.4.1 Měření elektrického náboje pomocí kondenzátoru

Použijeme-li těleso, které je nabité záporným nábojem, připojením rezistoru o malé hodnotě odporu, na kondenzátor, druhá elektroda je uzemněna. Rozdíl potenciálů, který vznikne mezi potenciálem nabitého tělesa vůči zemi a potenciálu elektrody připojený k rezistoru kondenzátoru způsobí přesun náboje a tedy samotné nabití kondenzátoru. Velikost kondenzátoru je mnohem větší než je kapacita nabitého tělesa, což způsobí, že těleso odevzdá praktický všechny svůj náboj kondenzátoru. Změřením napětí na kondenzátoru tak lze matematicky dopočítat velikost náboje .

$$Q = CU \quad (11)$$



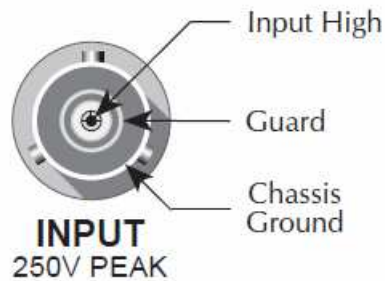
Obrázek 13 měření elektrického náboje [autor]

V této metodě je však jedna nepřesnost a to při měření napětí na kondenzátoru, kde dochází při měření k vybíjení kondenzátoru a nelze tak přesně určit hodnotu napětí.

3.4.2 Elektrometr Keithley model 6517A

Tento elektrometr byl využit při měření v laboratoři. Má velmi vysokou citlivost a přesnost měření napětí, proudu, náboje a odporu. Přístroj v režimu power-up testuje paměť EPROM a RAM, kde kontroluje uložena data, při zjištění poruchy se zobrazuje chybové hlášení, na displeji se zobrazí ERR + číslo. Číslo definuje přesnou chybu, lze zjistit z manuálu. Důležité pro měření je zahřátí přístroje pro dosažení jmenovité přesnosti, proto je vhodné po zapnutí elektrometru počkat alespoň minutu, výrobce uvádí ideální zahřátí až po 1 hodině. Nastavení a samotné ovládání je usnadněno pomocí displeje, kde se nachází samotné měřené hodnoty s jednotkami, nebo informační zprávy či menu nastavení přístroje. V zadním panelu je vstupní konektor, jedná se o triaxiální kabel obsahující 3

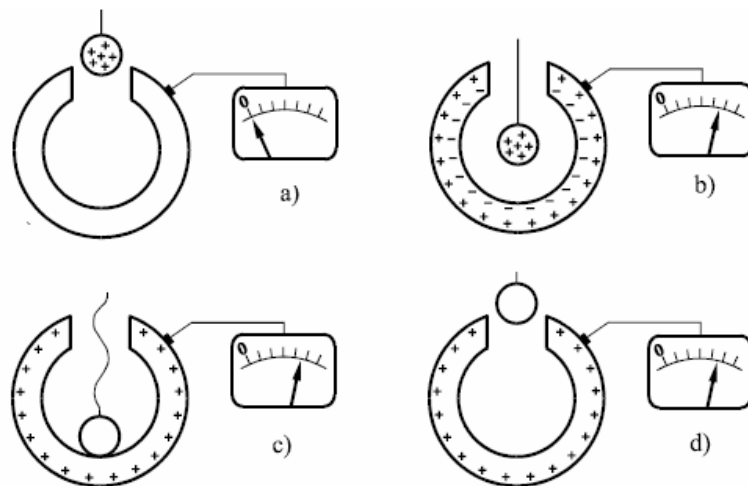
konektory. Při měření se bude využívat pouze dvou částí a to, Input High a Guard viz Obr .14. [7]



Obrázek 14 vstupní konektor elektrometru [7]

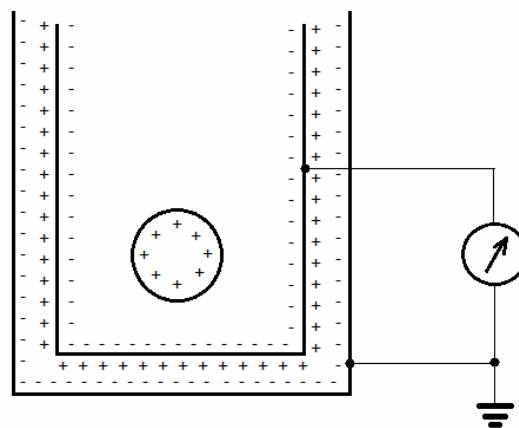
3.5 Elektrostatické experimenty

Základní experimenty se statickou elektřinou jsou tření různých materiálů, kdy vznikají přitažlivé či odpuzivé síly vlivem kladného či záporného náboje. Mezi další experimenty patří jev založený na elektrostatické indukci. Objeven Faradayem při pokusu s kbelíkem ledu. Vložíme-li kladně nabitou kovovou kuličku do vodivé nádoby, která je izolována od země, dojde přitom k jevu, kdy se na vnitřní stěně nádoby indukuje záporný náboj. Velikost tohoto náboje lze zjistit elektrometrem připojeným na vnější stranu nádoby, tato strana je viz Obr. 15 (b) nabitá kladným nábojem, který se rovna velikosti záporného náboje na vnitřní stěně. Vyjmutím kuličky z nádoby dojde ke zmizení indukovaného náboje. Příklad Obr.15. (c), kde se kulička dotkne vnitřní stěny, dojde k neutralizaci s nábojem vnitřní stěny, kulička je elektricky neutrální. Ovšem vyjmutím kuličky z nádoby nedojde k vytracení náboje, náboj kuličky se totiž přenesl na vnější stěnu nádoby.



Obrázek 15 Faraday Ice Pail [14]

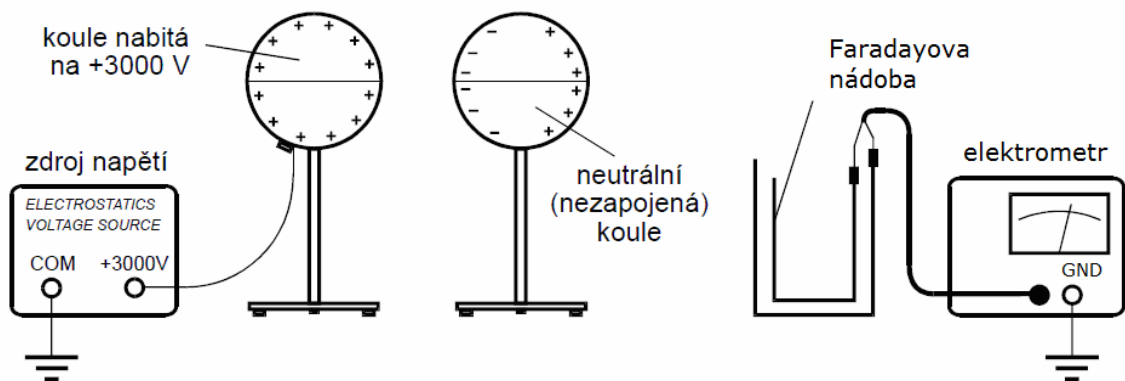
Tento experiment je využit při měření náboje na elektrosoučástkách pomocí Faradayova pohárku. Pohárek je složen z vodivého materiálu, vnější obal představuje zem uvnitř tohoto pohárku je vložen menší pohárek, jenž je od vnějšího izolován. Vnější obal působí jako stínění vnitřního pohárku a chrání tak před vnějšími náboji a vytváří s vnitřním pohárkem kondenzátor. Připojením elektrometru na Faradayův pohárek, kladná část jde na vnitřní pohárek, vnější je uzemněn. Velikost náboje zjistíme vložení daného tělesa na dno vnitřního pohárku, po dotyku tělesa s vnitřní stěnou dochází k indukci náboje na vnější stěně tak dojde k vzniku napětí, jenž je úměrně velikosti náboje.



Obrázek 16 Faradayův pohárek [autor]

3.5.1 Měření hustoty náboje na povrchu tělesa

Vychází se z Gaussova zákona (12), tedy vztah mezi tokem intenzity elektrického pole uzavřenou Gaussovou plochou a celkovým nábojem Q obklopeným touto plochou. Lze odvodit, že náboj se zdržuje na povrchu tělesa a jeho plošná hustota je přímo úměrná velikosti intenzity E v dané části tělesa. Je tak patrné, že hustota náboje na povrchu je v různých místech tělesa různá. Tento jev snadno experimentálně ověřit. Rozdělení hustoty náboje se změří na izolované kouli stojící v blízkosti nabité koule. Samotné rozdělení náboje na povrchu neutrální koule se bude zjišťovat pomocí sondy a Faradayovy nádoby připojené na elektrometr. Dotknutí sondy na povrchu nabité koule, stane se sonda součástí jeho povrchu a získá tak stejnou hustotu náboje a odebere také určitou část náboje. Část odebraného náboje se však musí do koule vrátit, protože pokud by se sonda s přijatým nábojem uzemnila nebo se dotkla Faradayovy nádoby, náboj by se odvedl do země a na měřené kouli by tak chyběl, koule by se začala nabíjet. Rozložení celého experimentu by mělo být: vzdálenost mezi tělesy alespoň 1 m, nabitá koule vzdálena od pohárku minimálně 1,5 m.



Obrázek 17 měření hustoty náboje na povrchu tělesa [14]

Testovací sondou se provede několik měření na různých místech koule, elektrometr udává velikost napětí, které je přímo úměrné hustotě náboje. [14]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

4 MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO NÁBOJE

V praktické části je popsán výběr použitých elektrických součástek, vytvoření měřicího pracoviště a výroba Faradayových pohárků. Jsou zde uvedeny naměřené hodnoty kapacit pohárků, popis základních měření jejich zhodnocení a výsledné tabulky naměřených hodnot viz přílohy. V závěrečné části je navržena laboratorní úloha a uvedeno její zadání formou protokolu.

4.1 Použité elektronické součástky

Vybráno bylo několik nepoužívanějších elektrických součástek a to v různých technologiích CMOS, TTL, JFET, současně také součástky s technologií SMT, rozpis těchto součástek viz Tab.7, pro další zpracování tabulky součástek je každá součástka identifikována svým číslem ID. Tyto součástky byly vybrány záměrně a to nejen pro jejich vysokou četnost používání v elektrotechnice, ale také pro jejich různou citlivost na elektrostatický náboj, jenž některé součástky dokáže úplně zničit. Největší citlivost na elektrostatický náboj mají právě součástky vyráběny technologiemi MOS, elektrická pevnost řídicího hradla je proti ostatním elektrodám velmi malá. Některé součástky jako jsou procesory, paměti, číslicové obvody obsahují vstupní ochranné obvody. Tyto ochranné obvody však mohou někdy negativně ovlivnit funkci součástky, například vysokofrekvenční tranzistory, které proto ochranné obvody neobsahují.

Elektrosoučástky se dodávají ve speciálních obalech vyrobených z materiálu s nízkou elektrickou vodivostí, chrání tak součástky před poškozením. Jsou to sáčky obsahující stínící vrstvu, nebo černé polyethylenové sáčky, či ochranné PVC tuby. Většina růžových polyethylenových sáčků poskytuje nedostatečnou ochranu, ovšem používají se v ochranných prostředích EPA, ale jen pro necitlivé součástky. Skladování elektrosoučástek by nemělo být s použitím obyčejných polyetylenových pytlíků, či uložením několika součástek dohromady.

Poškození, které elektrostatický náboj může způsobit taky běžným součástkám jako je bipolární tranzistor, kde dochází k poškození PN přechodu u tranzistorů MOS přechod drain-source, dostane se tak do lavinového průrazu. Proud prudce vzroste a následně nastane destruktivní průraz. Roztavení vodivých spojů nebo rezistorů, kde příčinou je zvýšený proud z elektrostatického výboje, tento proud však snadněji prochází

tenkými spoji rezistorů či integrovaných obvodů z technologií SMT. U kondenzátorů může dojít k průrazu dielektrika, kde napětí vzniklé výbojem je větší než je dielektrická pevnost. Tento jev vzniká především u výboje, jehož velmi rychlá náběžná hrana proudu a jeho velmi vysoká hodnota způsobí vznik vysokého napětí uvnitř součástky. U pamětí, měřena byla paměť EEPROM, dochází při elektrostatickém výboji, k možnému vymazání jejich obsahu.

Poškozené vývody způsobující selhání daných obvodů mohou být identifikovány měřením voltampérových charakteristik jednotlivých vývodů poškozené součástky. Ovšem poškození uvnitř samotného obvodu lze identifikovat pomocí měření charakteristik velmi obtížně. Někdy ovšem dochází pouze k přetížení součástky či celého obvodu a dochází tak jen ke skrytým vadám nebo zhoršení parametrů, jako je větší svodový proud.

Tabulka 7 seznam měřených elektrosoučástek [autor]

ID	Součástka	Typ
1	Rezistor	17W 22k
2	Termistor	TER640 100R
3	Trimr	PT10LV 100R
4	Kondenzátor	50VCD TK 100nF
5	Kondenzátor (SMT)	C0805 50V 100nF
6	Tlumivka	TL-EC24-1.uH
7	Dioda	1N4148
8	Bipolární NPN tranzistor	BC549C
9	Bipolární NPN tranzistor	BD241C
10	Unipolární tranzistor (N)	BF245A
11	Bipolární tranzistor PNP (SMT)	BC807-25
12	Stabilizátor	78L05
13	LED dioda zelená	L53GC
14	LED dioda zelená (SMT)	LED0805
15	CMOS 2vstup. NAND	4011
16	CMOS 2vstup. NAND	74HC00
17	TTL 2vstup.NAND	74LS00
18	Paměť EEPROM	24C04
19	IO časovač	NE555
20	Operační zesilovač JFET	TL084CD
21	CMOS IO časovač	CMOS555
22	Operační zesilovač	TL061CP

4.2 Popis laboratoře a měřících pomůcek

Pro měření byla využita laboratoř U53/304 na Fakultě aplikované informatiky UTB ve Zlíně. Základními pomůckami byly, elektrometr Keithley 6517A, tři Faradayovy pohárky, elektronické součástky jakožto měřené tělesa, kabeláž, přepínač a také antistatické pomůcky (plášť, náramek, obuv). Přístroj je při měření elektrického náboje velmi citlivý nejen na pohyb obsluhy, ale také pohyb měřícího kabelu. Proto byly provedeny úpravy měřícího obvodu tak, aby docházelo k co nejmenším rušivým vlivům. Měřící kabel 237-ALG-2 byl přiveden na přepínač a po dobu měření se tak zajistila jeho téměř nulová

manipulace. Měření samotného náboje na daných součástkách probíhalo nejprve bez využití antistatických pomůcek a poté s využitím těchto pomůcek. U elektrických součástek bylo provedeno také měření s využitím úložné tuby pro součástky.



Obrázek 18 fotografie měřícího pracoviště

4.3 Konstrukce Faradayova pohárku

Základním materiálem při konstrukci Faradayova pohárku byla nerezová ocel. Vyrobeny byly tři pohárky o různé velikosti s různým typem konektoru. Je tak možné porovnat více naměřených výsledků, popřípadě možnost zajistit přesnost měření a také umožnit měření součástek či malých těles o různých velikostech.

Velikostně největší pohárek má jako vnější plášť použitou dírkovanou ocel, vnitřní pohárek je čistě z nerezového plechu. Vývod pro měření elektrického náboje, tedy elektrické oddělení vnitřní a vnější části, je pomocí konektoru RCA neboli cinch, pro možné snímání BNC byla vyrobena redukce Cinch-BNC. Ostatní dva pohárky mají využit BNC konektor, tyto pohárky se liší pouze ve velikosti vnitřního pohárku. Izolace mezi vnitřním a vnějším pohárkem je u všech pohárků vyrobena z plastu. U pohárku č.1 byl BNC konektor napájen přímo na vnitřní pohárek, a to kvůli nedostatku prostoru mezi pohárky, posunutí konektoru směrem ven byla vyrobena mosazná podložka. Spojení je pomocí běžné páječky Sn40Pb60, avšak kvůli nerezovému materiálu, je spoj slabý proto je nutné dbát opatrnosti při manipulaci s vnitřní částí.



Obrázek 19 Faradayův pohárek č.1



Obrázek 20 Faradayův pohárek č.2



Obrázek 21 Faradayův pohárek č.3

4.3.1 Měření kapacity pohárků

Tabulka 8 naměřené hodnoty kapacity jednotlivých pohárků

	pohárek č.1	pohárek č.2	pohárek č.3
č. měření	C [pF]	C [pF]	C [pF]
1	27,15	16,23	28,12
2	27,19	16,48	27,82
3	27,18	16,26	27,85
4	27,25	16,37	27,98
5	27,06	16,55	27,93
6	27,26	16,41	27,66
7	27,13	16,28	27,65
8	27,11	16,65	27,67
9	27,08	16,12	27,65
10	27,19	16,62	28,21
Průměr	27,16±0,71	16,39±0.18	27,85±0.21

Kapacita byla měřena pomocí můstkového měření přístrojem Agilent e4980a Precision LCR meter. Kapacita pohárku číslo 1 a 3 je téměř stejná, je to zapříčiněno použitím stejného materiálu (dielektrika) pro oddělení vnitřní a vnější části pohárku. U měření byl použit měřicí koaxiální kabel, který byl připojen na konektor pohárku, to zapříčinilo změnu kapacity měřicího tělesa. Proto bylo nutné změřit kapacitu pohárku s kabelem. Měření byly pouze první dva pohárky, a to kvůli Cinch-BNC konektoru pohárku č.3, při jeho měření docházelo k velkým výchytkám měřeného náboje vlivem komplikovanějšího zapojení kabeláže celého obvodu, proto nebyl při dalším měření tento pohárek využit.

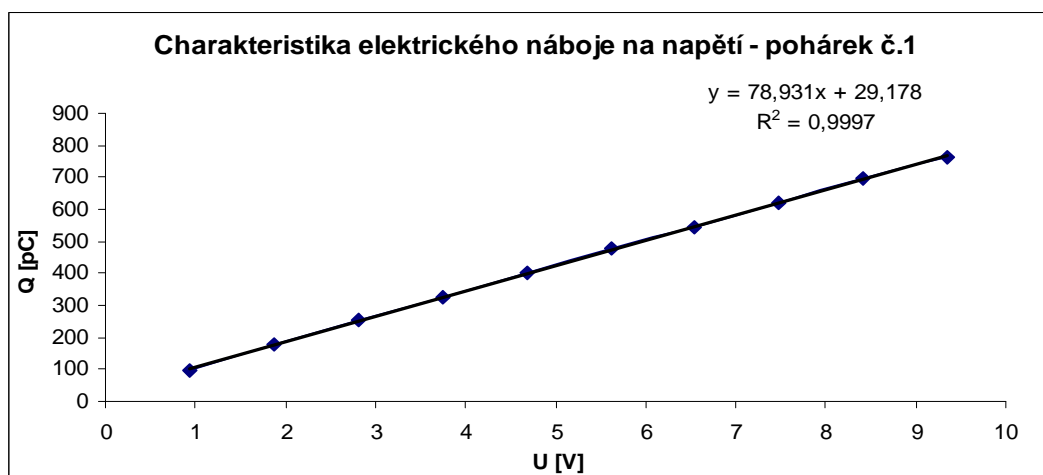
Tabulka 9 naměřené hodnoty kapacit pohárků s kabeláží

	pohárek č.1	pohárek č.2
č. měření	C [pF]	C [pF]
1	80,26	69,01
2	80,33	69,44
3	80,57	69,35
4	81,40	69,40
5	80,35	69,99
6	80,19	70,06
7	80,22	69,75
8	80,18	69,40
9	80,20	70,32
10	80,29	70,21
Průměr	80,39±0,37	69,69±0,44

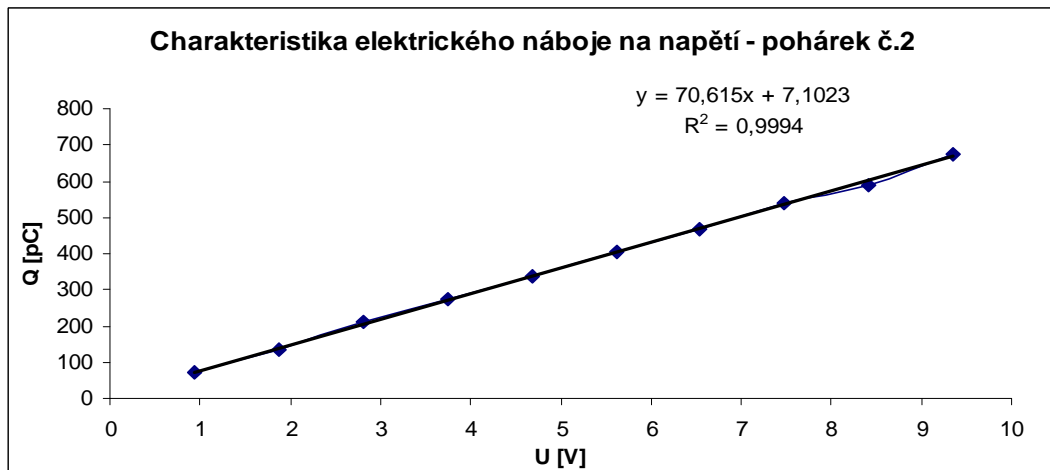
Pomocí elektrometru byla následně provedena měření elektrického náboje na pohárku. Způsobem přiložení napětí na pohárek, tedy jeho nabití na dané napětí a následně změření náboje.

Tabulka 10 měření elektrického náboje nabitého Faradayova pohárku

Pohárek č.1			Pohárek č.2		
U[V]	Uz[V]	Q[pQ]	U[V]	Uz[V]	Q[pQ]
1	0,935	97	1	0,936	71
2	1,871	176	2	1,872	136
3	2,807	253	3	2,808	209
4	3,741	326	4	3,741	276
5	4,676	402	5	4,677	337
6	5,613	478	6	5,613	404
7	6,546	543	7	6,547	468
8	7,482	620	8	7,483	539
9	8,418	695	9	8,419	591
10	9,352	762	10	9,352	673



Obrázek 22 charakteristika elektrického náboje pohárek č.1



Obrázek 23 charakteristika elektrického náboje pohárek č.2

U tohoto měření byl využit zdroj napětí uvnitř elektrometru, pro získání přesných hodnot byly jednotlivé hodnoty napětí změřeny viz Tabulka č.10 sloupec napětí U_z . Následně byly vykresleny grafy závislosti elektrického náboje na napětí, tyto charakteristiky vycházely téměř lineárně, což je patrné u hodnoty spolehlivosti R , která u obou pohárku byla rovna téměř přesně jedné. Z rovnic lineární regrese lze pomocí směrnice určit kapacitu měřeného obvodu.

Pohárek č.1

$$y = 78,931 x + 29,178$$

$$C = 78,93 \pm 0,15 pF$$

Pohárek č.2

$$y = 70,615 x + 7,1023$$

$$C = 70,61 \pm 0,23 pF$$

Výsledné hodnoty kapacit se téměř shodují s naměřenými hodnotami viz Tab.č 9.

4.4 Měření elektrického náboje pomocí elektrometru

4.4.1 Pohyb součástek v ochranné PVC tubě

Elektrické součástky byly vkládány do ochranné tuby, ve které proběhl jednoduchý pohyb, tedy tření při němž došlo k vzniku elektrického náboje na povrchu součástky. Následně se součástka vhodila do Faradayova pohárku, kde došlo přenesení náboje na povrch vnitřní části, hodnota tohoto náboje byla měřena elektrometrem. Takové změření náboje se provedlo 10krát pro každou součástku, s použitím pohárku č.1 a č.2. Zde však nebyly využity antistatické pomůcky, protože se součástkami nebyl člověk v kontaktu, tření probíhalo uvnitř tuby a přímo z té součástky vjela do pohárku. Tabulky naměřených hodnot viz Příloha I a II, při výpočtech nejistoty měření bylo počítáno s koeficientem rozšíření $k=1$, což odpovídá 68% pravděpodobnost správného výsledku.

4.4.2 Běžná manipulace se součástkami

Následující měření bylo provedeno při běžné manipulaci součástek v laboratoři, bez antistatických pomůcek a také i s jejich využitím. Výsledky těchto měření viz Příloha V, VI, IX, X.

4.5 Měření elektrického náboje pomocí kondenzátoru

Jako kondenzátor byl využit právě Faradayův pohárek, elektrometrem tak bylo měřeno napětí, jenž se vygenerovalo po vhození součástky do pohárku. Dle naměřené kapacity pohárku, tak lze dopočítat hodnotu elektrického náboje, jenž byla na dané součástce.

4.5.1 Pohyb součástek v ochranné PVC tubě

Stejná manipulace se součástkami v ochranné tubě proběhla pro měření elektrického napětí, tabulka naměřených hodnot pro oba pohárky viz Příloha III a IV.

4.5.2 Běžná manipulace se součástkami

Obdobné měření se součástkami jako v bodě 4.4.2, jen pro metodu měření elektrického napětí, výsledné hodnot viz Příloha VII, VIII, XI, XII.

5 ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

Získání přesných hodnot elektrického náboje na dané součástce je velmi obtížné, elektrometr měří náboj velmi přesně až v jednotkách piko Coulomb. Samotný pohyb měřicích kabelů, či pohyb osoby manipulující se součástkami, znamená změnu náboje mnohdy i velmi vysokých hodnot. Proto jsou výsledky naměřených hodnot velmi odlišné, mnohdy jsou velmi vysoké. Naopak, v některých případech je náboj na součástce neměřitelný, tedy nulový. Měření probíhalo dvěma metodami se dvěma pohárky s využitím 22 vybraných součástek, jednotlivé součástky byly měřeny 10krát, a to pro měření v PVC tubě a s běžnou manipulací. U metody měření pomocí kondenzátoru byla při výpočtech využita hodnota kapacity změřená pomocí elektrometru (metoda nabíjení pohárku na dané napětí). Jednalo se tak o velmi časově náročné měření, jenž bylo provedeno v několika týdnech při různých podmínkách teploty a vlhkosti prostředí. Teplota okolí v laboratoři byla v rozsahu 20 °- 23 °C, vlhkost v rozsahu 30-40%. Vlhkost byla měřena měřicím přístrojem Testo 435 s multifunkční sondou Testo 0632.1535. U metody měření pomocí kondenzátoru jsou v tabulkách naměřených hodnot uvedeny nejistoty měření, v metodě měření náboje elektrometrem, je nejistota měření vyjádřena směrodatnou odchylkou.

5.1 Manipulace součástek v ochranné tubě

Srovnání hodnot metodou měření náboje v pohárku č.1 vůči pohárku č.2 je u většiny součástek patrný ve snížení hodnoty náboje na pohárku č.2, je to zapříčiněno také jeho nižší kapacitou, což je patrné z rovnice $Q = C.U$. Samozřejmě u některých součástek došlo naopak ke zvýšení náboje, to je ovšem příčina nezajištění přesně stejné manipulace součástky. Nelze zajistit, že tření dané součástky v ochranné tubě bylo totožné u všech měření, proto jsou také znatelné odchylky, kdy občas náboj byl mnohonásobně vyšší či naopak nižší.

Obdobné rozdíly v hodnotách náboje vzhledem k porovnání obou pohárků byly zjištěny i při měření elektrického náboje metodou měření napětí, tedy pomocí kondenzátoru (Faradayova pohárku). Ovšem hodnoty vypočteného náboje byly celkově nižší, než je tomu u hodnot měření náboje elektrometrem, tyto rozdíly jsou příčinou právě oné změny metody měření samotného náboje. Napětí jenž je měřeno na kondenzátoru, je při samotném měření vybíjeno a není tak možné určit přesnou hodnotu napětí. Měřicí

obvod je také jiný, samotný elektrometr využívá jinou přesnost (nižší než je přesnost měření náboje), měření elektrického napětí a reakce nabití napětím je nižší, tudíž tak nelze zjistit velikost náboje, jako je tomu u konkrétního měření náboje elektrometrem.

Využity byly dvě odlišné tuby pro možnost vložení větších či menších (SMD) součástek. Náboj změřený u SMD součástek byl vůči ostatním součástkám mnohem nižší, ovšem pro tak malé součástky byl tak velký, že mnohdy dané součástky byly nábojem přichyceny k povrchu ochranné tuby.

Avšak pozoruhodné je srovnáme-li směrodatné odchylky měření náboje elektrometrem a pomocí kondenzátoru. U přesného měření elektrometrem jsou patrné mnohdy velké odchylky a to téměř u všech součástek, ovšem u druhé metody jsou tyto odchylky nižší. Tyto hodnoty by mohly vypovídat, že přesnější bude měření pomocí kondenzátoru, vezmeme-li v potaz samotné nabíjení součástky, které je velice náchylné na rychlost pohybu, stranu či hranu, kterou se součástka tře o daný materiál, je téměř nemožné zajistit, že součástka bude mít vždy náboj dané hodnoty s nízkou odchylkou. A samotná přesnost s jakou elektrometr měří náboj, je vynikající, takže nelze přisuzovat rozdíly odchylek v metodách měření jakožto parametr přesnosti. Měřit elektrický náboj na součástkách nebo různých tělesech je velmi obtížné a proto i „nepřesné“.

5.2 Běžná manipulace se součástkami

V této situaci byl měřen náboj na součástce, při manipulaci v rukou pohybem součástky na stole, různé uchopení a otáčení. Bylo tak simulováno běžné zacházení v praxi. Ovšem měřený náboj byl z celkového hodnocení nulový, odpovídající tabulky naměřených hodnot jsou uvedeny v příloze např. Příloha V. U obou metod měření byl náboj neměřitelný, občas se nepatrný náboj objevil a to vlivem větší snahy dosáhnout měřitelného náboje na součástce, případ tření součástky o oděv, což už ovšem nelze označit jako běžnou manipulaci. Ovšem i přes to se jednalo o náboj v jednotkách piko Coloumb, což je i na tak přesném přístroji téměř neměřitelné, hodnota náboje se vlivem okolního prostředí mění i uvnitř pohárku. Možnou příčinou nezměření žádného náboje na daných součástkách byla vlhkost na dlaních člověka. Přenést tak náboj s vlhkostí jaká je u lidské dlaně některých lidí nemožná a poměr velikosti kapacity dané součástky vůči kapacitě lidského těla je znatelný.

Pro otestování vlivu vlhkosti prostředí na velikost náboje bylo provedeno měření součástky v PVC tubě se zvýšením vlhkosti uvnitř tuby. Tuba se pouze profoukla a poté se provedl klasický pohyb součástky v tubě. Takto získána hodnota náboje byla téměř o 75% nižší, než při běžném pohybu součástky v „čisté“ tubě. Lidský dech obsahuje vodu rozptýlenou ve vzduchu, proto došlo v tubě k téměř vynulování elektrického náboje i přes to, že docházelo ke tření součástky.

V některých případech došlo k občasnému naměření určitého minimálního náboje, tento náboj vznikl i tím, že se daná součástka uchopila jinak, například u LED diody, kde je patrný i vyšší náboj. Zde bylo uchopení pouze za vývod a při pohybu tak vznikl na jejím povrchu náboj, nelze to však přímo považovat za běžnou manipulaci.

V případě metody měření napětí, byly hodnoty absolutně neměřitelné, napětí po vhození součástky do pohárku bylo nulové a to při jakékoliv běžné manipulaci. Odpovídá tomu také zjištění oné přesnosti měření elektrického náboje touto metodou, kdy je měřitelný náboj menší, než u metody měření náboje elektrometrem. Z předešlých výsledků u první metody, kdy byl náboj na součástkách nulový nebo velice malý, bylo patrné, že měřené hodnoty v této metodě budou úplně nulové.

V běžné manipulaci bylo také využito antistatických pomůcek, antistatický plášť, obuv a uzemňovací náramek. Zde však byl náboj neměřitelný a u všech součástek tak byla hodnota náboje nulová, a to pro obě měřicí metody. Ověřil se tak vliv těchto ochranných pomůcek, kdy se náboj opravdu minimalizoval.

Chyba měření je v tomto měření zanedbatelná, jelikož měření elektrického náboje je obtížné a jakýkoliv sebemenší pohyb, či změna okolního prostředí, mění měřené hodnoty někdy až ve stovkách procent. Specifikace chyby měření a samotné přesnosti měřícího elektrometru, je v jednotkách piko Coulomb což je vůči velikosti nejistoty měření daných metod zanedbatelné. Měřicí rozsah byl u všech měření 2 nC.

Tabulka 11 specifikace chyby měření elektrického náboje, elektrometr Keithley 6517A

COULOMBS			
RANGE	5½-DIGIT RESOLUTION	ACCURACY (1 Year) ^{1,2} 18°-28°C ±(%rdg+counts)	TEMPERATURE COEFFICIENT 0°-18°C & 28°-50°C ±(%rdg+counts)/°C
2 nC	10 fC	0.4 + 5	0.04 + 3
20 nC	100 fC	0.4 + 5	0.04 + 1
200 nC	1 pC	0.4 + 5	0.04 + 1
2 µC	10 pC	0.4 + 5	0.04 + 1

¹ Specifications apply immediately after charge acquisition. Add

5.3 Laboratorní úloha

Dle naměřených výsledků ze dvou použitých metod měření, které byly zjištěny, byla navržena úloha pro měření elektrického náboje. Základem úlohy je změřit velikost elektrického náboje, jenž působí na nejpoužívanější elektrické součástky. Pro přesnost měření se provede měření elektrického náboje metodou: 1. měření elektrického napětí a 2. měření pomocí elektrometru.

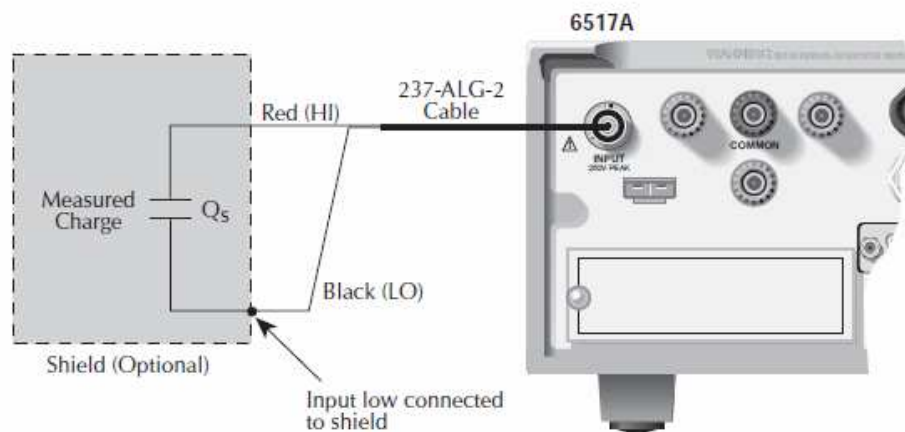
Zadání:

1. Seznamte se s ovládáním měřícího přístroje Elektrometr Keithley 6517A
2. Proveďte změření kapacity pohárku s kabeláží můstkovou metodou dle LCR metru.
3. Ověřte velikost kapacity pohárku měřením elektrického náboje pomocí elektrometru, nabíjecí napětí volte v rozsahu 0-5 V po krocích 0.5 V.
4. Na předložených elektrických součástkách proveďte měření elektrického náboje vzniklého pohybem součástky v ochranné tubě a to pomocí měření napětí a měření náboje.
5. Naměřené výsledky obou metod porovnejte a případně vysvětlete rozdílné hodnoty.

Postup měření:

Nejprve se provedeme změření kapacity přiloženého Faradayova pohárku včetně připojovacího koaxiálního kabelu a to pomocí LCR metru Agilent e4980a. Ověření

kapacity provádíme nabíjením pohárku na dané napětí v rozsahu 0-5 V, po každém nabití přepneme elektrometr na měření náboje Q (ZeroCheck) a zapíšeme hodnotu. Následně vyneseme graf závislosti elektrického náboje na napětí, proložením spojnice trendu charakteristiky získáme jako směrnicí regrese kapacitu pohárku, která by měla odpovídat naměřené hodnotě LCR metru. Měření náboje pomocí elektrometru viz Obr.č.24 s měřícím kabelem 237-AGL-2 se využije pouze kabelu High a Low, tedy červený a černý. Po každé výměně součástky provedeme na přístroji ZeroCheck, tedy vybití pohárku. Po celou dobu měření se snažíme co nejméně ovlivnit velikost změřeného náboje, vlivem náboje z lidského těla, tedy nezasahovat prsty do Faradayova pohárku, či nemanipulovat příliš s kabeláží.



Obrázek 24 měření elektrického náboje na elektrometru [7]

ZÁVĚR

Náplní práce bylo měření elektrického náboje, který se indukoval na elektrických součástkách vlivem různé manipulace. V teoretické části byly popsány základní jevy elektrostatického pole, statická elektřina, její vznik, eliminace působení na součástky a samotná ochrana před statickou elektřinou.

Součástí práce byla také výroba Faradayových pohárků. Pro možné srovnání výsledků byly vyrobeny 3 různé velikosti pohárků s různými druhy izolačních částí a také rozdílných zapojení výstupních konektorů. Při prvotních měřeních byl jeden pohárek pro další měření vyřazen, kvůli jeho nepřesnosti a nevhodnému použití daných součástí konektoru.

Velmi důležitým prvek pro měření bylo vytvoření vhodného měřicího pracoviště. Jednalo se o měření elektrického náboje velmi malých hodnot, kdy sebemenší pohyby s měřicími pomůckami znamenaly velké změny měřených hodnot. Pracoviště jsem proto sestavil tak, aby nedocházelo k žádné manipulaci měřících kabelů a měření tak probíhalo s využitím externího přepínače a samotného elektrometru.

Měření elektrického náboje jsem provedl dvěma různými metodami pro dva různé Faradayovy pohárky na dva a dvacet vybraných elektrických součástek. A to jak při manipulaci v rukou, tak v ochranné tubě, kde jsou součástky uloženy. Využito bylo taky antistatických pomůcek, kdy jsem z porovnání výsledků ověřil jejich ochranný vliv.

Z výsledků jsem zjistil, že běžnou manipulací samotné součástky v rukou nelze dosáhnout jejího zničení. Nebezpečí zničení však hrozí, je-li daná součástka na konkrétním plošném spoji, kde je vedeno uzemnění či ukostření. Náboj tak z člověka může projít skrz součástku a tu tak zničit. S manipulací v ochranné tubě, jenž je velmi často vyžívána k uchování integrovaných obvodů, jsem naměřil mnohem větší náboj, než u manipulace v rukou, ovšem i ten není pro součástky destruktivní. Zjistil jsem také, že stejný typ součástky, ovšem jiného druhu výroby (TTL a CMOS), má jinou schopnost generovat elektrický náboj. Na CMOS součástce byl 2x vyšší, než u součástky TTL. Obdobné zjištění bylo u integrovaných obvodu, kdy dva obvody stejné velikosti 14pinů, ovšem zcela jiného druhu součástky, generují na svém povrchu velmi odlišné náboje. To je samozřejmě dáno výrobou dané součástky, či samotné použití antistatických přísad uvnitř součástky.

Navrhl jsem laboratorní úlohu, na téma měření elektrického náboje na elektrosoučástkách, tu jsem realizoval a odzkoušel. Vypracoval jsem také vzorové zadání tohoto protokolu. Snažil jsem se tak, tuto problematiku statické elektřiny a jejího působení na součástky přiblížit i studentům.

Měření elektrického náboje na takto malých „tělesech“ je velice obtížné a časově náročné, lze tak toto měření rozvést, například využitím stejných materiálů o různých velikostech a zjistit tak vliv působení vlhkosti na danou plochu, jenž náboj eliminuje.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The part of the job was measured electric charge, which induced on electronic components, influence of different manipulation. In the theoretical part are described basic phenomenon electrostatic field, static electricity, elimination action for components and protection from static electricity.

Part of the work was produce Faraday cups. For possible comparison results was made 3 different size cups, with different types insulating segment and different connect output connector. In the first measurements was one cup, for following measurement excluded, because of his inaccuracy and inappropriate use of the connect components.

Very important element to measure was to creation the right measuring workplace. It was measurement electric charge very small values, when small move with measuring equipment meant big changes measured values. Workplace i have compiled so, that do not manipulated with measuring cables and measurement conducted with using external switch and only electrometer.

Measurement electric charge i made two different methods for two different cups on the 22 selected electronic components. And so at manipulation in the hands so in protective tube, where are the components deposited. It was used also antistatic tools, when i verified from observations results their protective effect.

From the results i found, that standard manipulation component in the hands can't be achieved its destruction. Danger of destruction is if this component is connected on the specific PCB, where is conducted grounded. Electric charge of human can pass through component and destroy it. With manipulation in the protective tube, which is very often used to deposited integrated circuits, i measured much greater charge than manipulation in the hands, of course even then it's not for component destructive. I also found, that same type of component indeed another type of production (TTL and CMOS), has a different ability to generate electric charge. On the CMOS component was 2x higher than on the TTL component. Similar finding was on the integrated circuits, where 2 circuits the same size 14 pins, but different species component, generating on its surface very different charges. It's of course given production components or the use of antistatic additives inside component.

I suggested laboratory task on the theme measurement electric charge on electronic device, that i realized and tested. I developed sample task this protocol. I tried this issue static electricity and its effects on components approximate to students.

Measurement electric charge on this small „solids“ is very difficult and time-consuming, this measurement can be expand, for example use the same materials on various sizes and find the effect of action humidity in a given area, who charge eliminates.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Syrový, A. Fyzika II B: *Elektrostatika a elektrodynamika*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1970.
- [2] Urbanová, M., Hofmann, J. *Fyzika II*. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická. Fakulta chemicko-inženýrská, 2000. Rozsah: 216 stran. ISBN 80-7080-372-X.
- [3] Frish, H. *Základy elektroniky a elektronických obvodů*. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1987. Rozsah: 316 stran.
- [4] Züglerová, H. *Elektrotechnická měření*. Praha: BEN- technická literatura, 2006. Rozsah: 255 stran. ISBN 80-7300-022-9.
- [5] Volkenštejn, M.V. Přeložil Jiří Dvořák. *Struktura a fyzikální vlastnosti molekul*. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1962. Rozsah: 721 stran.
- [6] ESD Association. *ESD Fundamentals*. Rome, NY. [online]. ©1999-2012 [cit 2012-2-2]. Dostupné z : <http://www.esda.org/fundamentalsP1.html>
- [7] Keithley Instruments, Inc. *Model 6517A Electrometer User's Manual*. Cleveland, Ohio, U.S.A., 1996, Rozsah: 343 stran. Dokument Numer: 6517A-900-01 Rev.D.
- [8] Šíma, M. *ESD – ElectroStatic Discharge: Elektrostatický výboj*. [online]. 2008.8, [cit. 2012-2-12]. Plzeň: Fakulta elektrotechnická ZČV, Dostupné z: [http://www. http://webs.zcu.cz/fel/ket/PELZ/Prednasky/ESD-prednaska.pdf](http://www.webs.zcu.cz/fel/ket/PELZ/Prednasky/ESD-prednaska.pdf).
- [9] Technologie. *Stická elektřina: proč vzniká a jak na ni* [online]. [cit. 2012-1-25]. Dostupné z: http://www.limex-technik.cz/Zdroje/Sticka_el_prirucka.pdf
- [10] Horský, P. Komponenty pro automatizaci. *Elektrostatický výboj a jeho vliv na spolehlivost integrovaných obvodů (1. část)*. [online]. 2009, 11, [cit. 2012-2-24]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39904.pdf>
- [11] Horský, P. Komponenty pro automatizaci. *Elektrostatický výboj a jeho vliv na spolehlivost integrovaných obvodů (2. část)*. [online]. 2009, 12, [cit. 2012-2-24]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/40177.pdf>
- [12] Lonský, J. Výměna zkušeností. *Stická elektřina* [online]. 2011, 12, [cit. 2012-4-3]. Dostupné z: http://www.lontech.cz/files/simco_nl/staticka_elektrina_elekro_12-2011.pdf

- [13] Künzel,K. *Ochrana citlivých součástek a zařízení před škodlivými účinky elektrostatických jevů*. Fakulta elektrotechnická, ČVUT Praha. [online].[cit.2012-2.12]. Dostupné z: http://martin.feld.cvut.cz/~kuenzel/13TAK/13TAK_ESD.pdf
- [14] Tögel,T a kol. *Elektrostatické experimenty*. Fakulta aplikovaných věd Katedra fyziky, Plzeň [online].2002,[cit.2012-1-21]. Dostupné z : http://www.kfy.zcu.cz/prakt/Prakt_I/UF104/8/elstat34.pdf
- [15] ČSN EN 61340-5-1 ed.2. *Elektrostatika - Část 5-1: Ochrana elektronických součástek před elektrostatickými jevy - Všeobecné požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2008.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

PVC	Polvinylchlorid.
AC	Střídavý proud.
DC	Stejnoseměrný proud.
ESD	Elektrický výboj.
ESDS	Součástka citlivá na elektrostatický náboj
EPA	Ochranná oblast proti ESD
SMT	Technologie povrchové montáže
SMD	Součástka povrchové montáže
LED	Světlo emitující dioda
EEPROM	Elektricky mazatelná programovatelná paměť pouze ke čtení
TTL	Tranzistorově-tranzistorová logika
JFET	Tranzistor řízený polem
IO	Integrovaný obvod
CMOS	Technologie Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
RAM	Paměť s náhodným přístupem
HBM	Model lidského těla
MM	Strojový model
CDM	Model nabíjené součástky
UTB	Univerzita Tomáše Bati
FAI	Fakulta aplikované informatiky
PCB	Deska plošných spojů

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 coulombův zákon bodových nábojů [autor]	13
Obrázek 2 elektrostatické pole bodového náboje [autor]	15
Obrázek 3 tok vektoru intenzity elementární plochou [autor]	16
Obrázek 4 elektrostatické stínění [autor]	19
Obrázek 5 triboelektrická řada [autor]	20
Obrázek 6 účinky elektrostatického výboje na vodivé cesty plošného spoje [13]	24
Obrázek 7 triboelektrické nabíjení, dotyk a oddělení materiálů [6]	25
Obrázek 8 pracovní stanice ESD [6]	28
Obrázek 9 citlivostní symbol ESD [6]	29
Obrázek 10 ochranný symbol ESD [6]	30
Obrázek 11 voltampérové charakteristiky různých ochran proti ESD [11]	31
Obrázek 12 tranzistor NMOS s uzemněným hradlem [11]	32
Obrázek 13 měření elektrického náboje [autor]	33
Obrázek 14 vstupní konektor elektrometru [7]	34
Obrázek 15 Faraday Ice Pail [14]	35
Obrázek 16 Faradayův pohárek [autor]	35
Obrázek 17 měření hustoty náboje na povrchu tělesa [14]	36
Obrázek 18 fotografie měřícího pracoviště	41
Obrázek 19 Faradayův pohárek č.1	42
Obrázek 20 Faradayův pohárek č.2	42
Obrázek 21 Faradayův pohárek č.3	42
Obrázek 22 charakteristika elektrického náboje pohárek č.1	44
Obrázek 23 charakteristika elektrického náboje pohárek č.2	45
Obrázek 24 měření elektrického náboje na elektrometru [7]	51

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 relativní permitivita různých látek [3]	19
Tabulka 2 napětí nebezpečná elektrickým součástkám	24
Tabulka 3 příklady prostředků generující statickou elektřinu [6].....	25
Tabulka 4 třídění polovodičových součástek dle odolnosti HBM v IEC 60749-26 [8]	26
Tabulka 5 rozdělení součástek dle odolnosti MM v IEC 60749-27 [8].....	28
Tabulka 6 rozdělení součástek dle odolnosti CDM v IEC 60749 [8].....	29
Tabulka 7 seznam měřených elektrosoučástek [autor]	40
Tabulka 8 naměřené hodnoty kapacity jednotlivých pohárků.....	42
Tabulka 9 naměřené hodnoty kapacit pohárků s kabeláží	43
Tabulka 10 měření elektrického náboje nabitého Faradayova pohárku.....	44
Tabulka 11 specifikace chyby měření elektrického náboje, elektrometr Keithley 6517A	50

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha P I: Tabulka naměřených hodnot náboje pohárek č.1, manipulace V PVC tubě
- Příloha P II: Tabulka naměřených hodnot náboje pohárek č.2, manipulace V PVC tubě
- Příloha P III: Tabulka naměřených hodnot napětí pohárek č.1, manipulace V PVC tubě
- Příloha P IV: Tabulka naměřených hodnot napětí pohárek č.2, manipulace V PVC tubě
- Příloha P V: Tabulka naměřených hodnot náboje pohárek č.1, běžná manipulace
- Příloha P VI: Tabulka naměřených hodnot náboje pohárek č.2, běžná manipulace
- Příloha P VII: Tabulka naměřených hodnot napětí pohárek č.1, běžná manipulace
- Příloha P VIII: Tabulka naměřených hodnot napětí pohárek č.2, běžná manipulace
- Příloha P IX: Tabulka naměřených hodnot náboje pohárek č.1, běžná manipulace, využití antistatických pomůcek
- Příloha P X: Tabulka naměřených hodnot náboje pohárek č.2, běžná manipulace, využití antistatických pomůcek
- Příloha P XI: Tabulka naměřených hodnot napětí pohárek č.1, běžná manipulace, využití antistatických pomůcek
- Příloha PXII: Tabulka naměřených hodnot napětí pohárek č.2, běžná manipulace, využití antistatických pomůcek

CD obsahuje pdf a doc soubor předložené bakalářské práce.

PŘÍLOHA PI: TABULKA NAMĚŘENÝCH HODNOT NÁBOJE POHÁREK Č.1, MANIPULACE V PVC TUBĚ

ID	Q [pC]										Průměr. Q [pC]	Směr. Odchylnka Q [pC]
	č.měř.1.	č.měř.2.	č.měř.3.	č.měř.4.	č.měř.5.	č.měř.6.	č.měř.7.	č.měř.8.	č.měř.9.	č.měř.10.		
1	1 386	2 076	1 845	906	1 244	1 440	1 555	1 718	1 223	1 494	1 490	320
2	720	577	804	990	807	1 098	1 000	828	779	634	824	158
3	304	329	181	256	80	379	97	330	141	205	232	100
4	650	522	848	645	372	307	540	362	498	441	520	156
5	101	76	80	44	74	90	51	78	120	45	76	24
6	765	792	620	887	1 026	712	895	588	607	820	772	136
7	607	720	212	1 277	465	493	373	550	708	650	606	270
8	365	377	466	526	569	573	607	1 087	615	920	612	218
9	870	235	220	1 097	898	220	300	602	298	359	510	316
10	667	1 061	651	537	717	468	1 011	912	799	850	768	186
11	36	44	60	47	58	51	92	39	45	100	58	22
12	525	698	614	590	690	1 100	819	635	884	1 375	794	252
13	655	846	959	1 233	787	590	720	715	628	495	764	202
14	33	16	11	20	31	34	15	27	8	19	22	10
15	660	351	607	505	419	508	444	322	362	160	434	140
16	207	221	287	333	174	199	145	182	163	255	218	58
17	204	391	259	823	754	380	710	422	280	450	468	208
18	145	75	85	420	91	144	302	195	105	142	172	106
19	262	151	122	101	37	201	391	169	185	110	174	94
20	62	423	290	130	1 100	610	670	412	272	1 058	504	340
21	196	250	308	317	413	598	200	238	416	1 057	400	250
22	280	539	220	170	998	274	230	190	512	176	360	248

PŘÍLOHA P II: TABULKA NAMĚŘENÝCH HODNOT NÁBOJE POHÁREK Č.2, MANIPULACE V PVC TUBĚ

ID	Q [pC]										Průměr. Q [pC]	Směr. Odchylka Q [pC]
	č.měř.1.	č.měř.2.	č.měř.3.	č.měř.4.	č.měř.5.	č.měř.6.	č.měř.7.	č.měř.8.	č.měř.9.	č.měř.10.		
1	958	1 334	1 077	1 251	1 611	1 450	1 026	1 186	1 340	1 920	1 316	276
2	1 380	1 552	1 730	890	1 120	1 260	635	890	652	907	1 102	354
3	170	519	273	190	100	140	165	151	242	100	206	118
4	1 170	582	320	223	243	307	562	400	710	407	494	272
5	226	107	144	74	112	160	120	66	126	151	130	44
6	642	415	557	786	860	742	675	849	770	634	694	132
7	840	1 400	651	633	560	920	697	955	731	871	826	230
8	150	157	116	422	625	817	458	560	678	440	444	228
9	1 392	689	1 124	527	1 270	425	345	270	365	333	674	406
10	250	204	182	645	815	390	559	525	644	668	490	210
11	145	78	84	83	91	58	81	37	52	112	84	30
12	200	415	361	600	504	398	616	787	628	1 114	564	244
13	2 261	800	1 914	1 096	1 302	879	480	759	897	2 057	1 246	588
14	79	59	64	57	90	45	39	55	24	50	58	18
15	162	189	184	179	548	420	482	390	542	386	350	150
16	355	293	140	300	190	205	175	418	293	253	264	84
17	109	500	204	859	548	971	1 235	618	740	781	658	324
18	200	121	102	182	109	420	151	97	225	157	178	92
19	102	159	110	138	165	271	130	192	244	214	174	54
20	200	219	131	180	247	276	477	366	324	335	276	98
21	162	285	56	201	216	280	102	201	168	225	190	68
22	83	261	72	128	145	425	219	186	160	267	196	100

PŘÍLOHA P III: TABULKA NAMĚŘENÝCH HODNOT NAPĚTÍ POHÁREK Č.1, MANIPULACE V PVC TUBĚ

ID	U [V]										Průměr. U [V]	Vypočten. Q [pC]
	č.měř.1.	č.měř.2.	č.měř.3.	č.měř.4.	č.měř.5.	č.měř.6.	č.měř.7.	č.měř.8.	č.měř.9.	č.měř.10.		
1	4,280	2,930	2,790	3,670	3,700	3,740	4,660	5,180	4,640	4,700	4,03 ± 0,75	320 ± 59
2	1,450	0,950	1,250	1,020	1,800	1,920	1,420	0,820	1,300	1,880	1,38 ± 0,38	110 ± 30
3	0,570	0,418	0,190	0,361	0,565	0,339	0,193	0,451	0,251	0,694	0,41 ± 0,16	34 ± 13
4	1,020	1,240	1,400	1,560	1,890	1,100	1,200	2,190	1,332	1,880	1,49 ± 0,36	118 ± 29
5	0,120	0,089	0,050	0,098	0,123	0,110	0,087	0,074	0,100	0,090	0,11 ± 0,02	10 ± 02
6	1,500	1,720	1,660	1,720	1,020	1,490	1,270	1,850	1,880	2,030	1,62 ± 0,28	128 ± 23
7	1,240	1,800	1,230	2,060	1,130	1,100	1,600	1,300	1,350	1,260	1,41 ± 0,29	112 ± 24
8	1,390	1,060	1,140	1,030	0,760	1,380	1,430	1,360	1,210	1,630	1,24 ± 0,23	98 ± 72
9	0,442	0,845	1,048	1,330	0,767	1,350	0,638	0,649	0,493	1,340	0,89 ± 0,33	72 ± 27
10	2,170	1,220	1,700	1,900	1,920	1,560	1,120	2,050	1,770	2,330	1,77 ± 0,37	140 ± 30
11	0,225	0,059	0,171	0,082	0,116	0,950	0,235	0,045	0,104	0,800	0,28 ± 0,31	24 ± 23
12	1,150	1,890	1,330	1,514	1,620	1,800	1,220	1,020	1,570	1,910	1,51 ± 0,29	120 ± 34
13	2,290	1,670	1,270	1,600	1,360	1,410	1,970	2,020	1,890	1,710	1,72 ± 0,31	136 ± 25
14	0,116	0,044	0,026	0,280	0,037	0,102	0,021	0,300	0,054	0,029	0,11 ± 0,09	10 ± 07
15	1,410	1,700	2,400	2,810	1,620	0,430	1,770	0,600	1,280	1,930	1,59 ± 0,69	126 ± 55
16	1,910	1,860	2,410	1,890	1,730	2,840	2,820	3,390	1,300	2,480	2,26 ± 0,61	180 ± 48
17	1,290	2,090	3,510	2,310	2,623	2,330	1,190	2,050	1,050	1,785	2,03 ± 0,71	162 ± 56
18	0,890	0,730	1,430	0,602	0,750	1,100	0,796	1,190	0,589	1,007	0,91 ± 0,26	72 ± 21
19	0,610	0,662	1,380	0,765	0,640	1,330	1,460	0,668	0,462	0,799	0,88 ± 0,35	70 ± 28
20	2,270	1,330	1,621	3,310	2,474	1,331	4,170	2,480	2,410	2,560	2,41 ± 0,83	192 ± 66
21	0,561	0,700	0,550	1,050	0,648	0,630	0,850	1,240	1,150	0,533	0,79 ± 0,25	64 ± 20
22	0,990	1,050	2,240	1,470	0,776	1,670	0,992	1,530	1,240	0,712	1,27 ± 0,44	102 ± 35

PŘÍLOHA P IV: TABULKA NAMĚŘENÝCH HODNOT NAPĚTÍ POHÁREK Č.2, MANIPULACE V PVC TUBĚ

ID	U [V]										Průměr. U [V]	Vypočten. Q [pC]
	č.měř.1.	č.měř.2.	č.měř.3.	č.měř.4.	č.měř.5.	č.měř.6.	č.měř.7.	č.měř.8.	č.měř.9.	č.měř.10.		
1	6,900	8,400	5,100	4,450	4,254	4,820	4,410	3,750	5,350	5,090	5,3 ± 1,3	372 ± 93
2	1,560	1,750	1,852	1,530	1,380	3,350	1,336	2,440	1,270	0,790	1,72 ± 0,68	122 ± 47
3	0,568	1,430	0,707	1,330	0,521	0,452	0,808	1,100	0,741	1,020	0,86 ± 0,32	62 ± 22
4	0,972	1,092	1,130	0,745	1,080	0,992	1,240	2,090	1,200	1,340	1,18 ± 0,33	84 ± 23
5	0,074	0,112	0,082	0,057	0,100	0,065	0,080	0,156	0,098	0,120	0,09 ± 0,03	8 ± 02
6	1,440	1,020	0,665	0,635	1,740	2,290	1,280	1,003	1,710	1,550	1,33 ± 0,49	96 ± 34
7	1,060	1,130	1,132	1,410	1,150	1,950	1,290	1,430	1,220	1,190	1,29 ± 0,24	92 ± 17
8	1,520	1,360	1,420	2,010	1,620	1,640	2,420	2,210	1,880	0,740	1,68 ± 0,45	120 ± 32
9	2,760	2,830	1,250	1,012	0,997	1,380	2,310	0,805	0,815	2,490	1,66 ± 0,79	118 ± 55
10	0,333	0,956	0,856	1,400	1,720	1,040	1,690	1,610	1,130	0,650	1,13 ± 0,44	82 ± 31
11	0,066	0,144	0,157	0,061	0,236	0,097	0,186	0,270	0,058	0,110	0,13 ± 0,07	10 ± 05
12	1,690	2,699	2,480	1,190	1,050	2,920	0,756	1,590	1,150	2,220	1,77 ± 0,72	120 ± 34
13	2,370	1,320	2,050	1,990	2,270	1,190	1,920	1,520	1,830	1,380	1,78 ± 0,38	126 ± 27
14	0,017	0,040	0,050	0,111	0,068	0,037	0,084	0,100	0,046	0,020	0,06 ± 0,03	6 ± 02
15	1,490	1,100	1,350	1,520	0,787	2,260	1,450	1,270	1,870	1,580	1,47 ± 0,38	104 ± 26
16	1,080	2,080	2,550	2,230	2,950	2,090	0,950	1,240	1,980	0,870	1,81 ± 0,68	128 ± 48
17	0,187	0,227	0,519	0,330	0,149	2,450	0,935	0,758	1,180	0,680	0,75 ± 0,65	54 ± 46
18	0,522	1,420	0,892	0,702	0,916	1,300	1,050	1,340	2,010	0,740	1,09 ± 0,42	78 ± 29
19	0,615	1,570	0,590	0,505	0,688	0,927	0,386	0,620	0,870	0,500	0,73 ± 0,32	52 ± 22
20	0,770	0,919	0,852	3,150	1,420	0,720	1,650	2,340	1,000	0,640	1,34 ± 0,78	196 ± 55
21	0,891	1,097	0,740	0,887	1,950	0,607	0,697	0,670	0,490	0,580	0,86 ± 0,39	63 ± 28
22	1,002	0,652	0,712	0,529	1,190	0,884	0,735	0,680	1,050	1,340	0,87 ± 0,24	62 ± 17

