

# **Výskyt elektrostatického náboje a vyhodnocení rizikovosti poruch výpočetní techniky**

The presence of electrostatic charge and evaluation of its effect on malfunctions of computerized equipment

Viktor Lokaj

---

Bakalářská práce  
2010



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
akademický rok: 2009/2010

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Viktor LOKAJ**  
Studijní program: **B 3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**

Téma práce: **Výskyt elektrostatického náboje a vyhodnocení rizikovosti poruch výpočetní techniky**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s principy elektromagnetické kompatibility.
2. Osvětlete principy měřicí techniky pro oblast identifikace a kvantifikace výskytu statického elektrického náboje.
3. Popište charakteristiky elektrostatického náboje a výboje.
4. Popište metodiku ochrany elektronických obvodů před statickou elektřinou a včetně rizikovosti poruch výpočetní techniky.
5. Proveďte měření elektrostatického napětí generovaného pohybem obsluhy měřicí a výpočetní techniky ve vybraných laboratořích FAI UTB.
6. Vyhodnoťte vlastnosti a vliv základních ochranných pomůcek eliminující statickou elektřinu.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. **SVAČINA, J. : Elektromagnetická kompatibilita – principy a metody. Monografie. VUTIUM vydavatelství, Brno 2001**
2. **SEDLÁČEK, M.: Zpracování signálů v měřicí technice. Dotisk 2. vyd. – Praha : ČVUT, 1999**
3. **KVASNICA, J.: Teorie elektromagnetického pole. Academia Praha, 1985.**
4. **PAUL, C. R.: Introduction to Electromagnetic Compatibility. John Wiley, New York 1992**
5. **REGTIEN P. P. L.: Measurement science for engineers, London and Sterling, VA, 2004**
6. **FRADEN, J.: Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications, 2nd ed. New York, Springer Verlag, 1996**

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Milan Navrátil, Ph.D.**

Ústav elektroniky a měření

Datum zadání bakalářské práce:

**19. února 2010**

Termín odevzdání bakalářské práce:

**19. května 2010**

Ve Zlíně dne 19. února 2010

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.  
*děkan*



doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.  
*ředitel ústavu*

## **ABSTRAKT**

Cílem této práce je seznámit její čtenáře se základními pojmy elektrostatiky, objasnit principy základní techniky pro oblast identifikace a kvantifikace výskytu statického elektrického náboje a popsat způsoby ochrany elektronických obvodů a výpočetní techniky před statickou elektřinou. Provést sérii měření elektrostatického napětí generovaného pohybem obsluhy měřicí a výpočetní techniky a zhodnotit výsledky.

Klíčová slova: EMC, ESD, elektrostatický náboj, elektrometr, antistatický, ochrana

## **ABSTRACT**

The aim of this work is to acquaint the readers with the basic notions of electrostatics, explain the principles of the fundamental techniques for the area of identification and quantification of the occurrence of static electrical charge and to describe the means of protection of electronic circuits and computing equipment against static electricity. To carry out a series of measurements of electrostatic voltage generated by the movement of attendants that are using measuring and computing equipment and to review the results.

Keywords: EMC, ESD, electrostatic charge, electrometer, antistatic, protection

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Milanu Navrátilovi, Ph.D. za pomoc při psaní této práce a doc. RNDr. Vojtěchu Křesálkovi, CSc. za zapůjčení elektrometru a antistatických ochranných pomůcek. Také bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu při studiu.

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.

Ve Zlíně

.....  
podpis diplomanta

**OBSAH**

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST</b> .....	<b>11</b>
<b>1 SEZNÁMENÍ S ELEKTROMAGNETICKOU KOMPATIBILITOU</b> .....	<b>12</b>
1.1 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA BIOLOGICKÝCH SYSTÉMŮ.....	12
1.2 ELEKTROMAGNETICKÁ KOMPATIBILITA TECHNICKÝCH SYSTÉMŮ .....	12
1.3 ZÁKLADNÍ ROZDĚLENÍ PROBLEMATIKY EMC .....	13
1.3.1 Elektromagnetická interference (EMI).....	14
1.3.2 Elektromagnetická susceptibilita (EMS).....	14
1.4 ZDROJE RUŠIVÝCH SIGNÁLŮ .....	14
1.4.1 Přírodní a umělé zdroje rušení .....	15
1.4.2 Funkční a parazitní zdroje rušení .....	15
1.4.3 Nízkofrekvenční (NF) a vysokofrekvenční (VF) zdroje rušení.....	15
1.4.4 Úzkopásmové a širokopásmové zdroje rušení .....	15
1.4.5 Šum, impulzy a přechodné jevy .....	16
1.4.6 Impulzní, spojitě a kvazi-impulzní rušení.....	16
<b>2 ÚVOD DO ELEKTROSTATIKY</b> .....	<b>17</b>
2.1 ZÁKLADNÍ POJMY .....	17
2.1.1 Elektrický náboj .....	17
2.1.2 Elektrostatické pole .....	17
2.1.3 Intenzita elektrického pole .....	17
2.1.4 Ekvipotenciální plocha.....	18
2.1.5 Siločára.....	18
2.1.6 Elektrický potenciál.....	19
2.1.7 Elektrostatická potenciální energie .....	19
2.1.8 Vodič v elektrostatickém poli .....	19
2.1.9 Kapacita.....	20
2.1.10 Permittivita .....	20
2.1.11 Dielektrikum v elektrickém poli .....	21
2.1.12 Elektrická pevnost .....	21
2.2 MAXWELLOVY ROVNICE .....	22
2.2.1 Maxwellovy rovnice a veličiny v nich .....	22
2.2.2 Maxwellovy rovnice elektrostatického pole.....	22
<b>3 PRINCIPY MĚŘÍCÍ TECHNIKY PRO OBLAST IDENTIFIKACE A KVANTIFIKACE VÝSKYTU STATICKÉHO ELEKTRICKÉHO NÁBOJE</b> .....	<b>24</b>
3.1 IDENTIFIKACE ELEKTRICKÉHO NÁBOJE.....	24
3.1.1 Elektroskop .....	24
3.1.2 Princip činnosti jednoduchého elektroskopu.....	24
3.1.3 Elektronický elektroskop s FET tranzistorem.....	25
3.1.4 Princip elektronického elektroskop s FET tranzistorem .....	25

3.2	KVANTIFIKACE ELEKTRICKÉHO NÁBOJE.....	26
3.2.1	Elektrometr.....	26
3.2.2	Elektronický elektrometr.....	27
3.2.3	Elektronický elektrometr WT5000.....	27
<b>4</b>	<b>CHARAKTERISTIKY ELEKTROSTATICKEHO NÁBOJE A VÝBOJE.....</b>	<b>29</b>
4.1	CHARAKTERISTIKA ELEKTROSTATICKEHO NÁBOJE .....	29
4.1.1	Triboelektrické nabíjení .....	30
4.2	CHARAKTERISTIKA ELEKTROSTATICKEHO VÝBOJE .....	31
4.2.1	Elektrostatický výboj (ESD).....	31
4.2.2	Typy elektrostatického výboje.....	31
4.2.3	Dva nejčastější způsoby vzniku elektrostatického výboje .....	31
4.2.4	Nejčastější podmínky vzniku elektrostatického výboje na pracovištích.....	32
4.2.5	Energie lokálního elektrostatického výboje .....	33
4.2.6	Vliv lokálního elektrostatického výboje.....	34
<b>5</b>	<b>METODIKA OCHRANY ELEKTRONICKÝCH OBVODŮ A VÝPOČETNÍ TECHNIKY PŘED STATICOU ELEKTRINOU .....</b>	<b>35</b>
5.1	AKTIVNÍ OCHRANA.....	35
5.1.1	Podlahy, podlahové systémy a rohožky.....	35
5.1.2	Pracovní stoly, židle a skříňky .....	35
5.1.3	Antistatické boty a ponožky .....	36
5.1.4	Uzemňovací prvky .....	37
5.1.5	Pláště a rukavice.....	38
5.1.6	Ionizér materiálu .....	38
5.2	PASIVNÍ OCHRANA.....	39
5.3	KONSTRUKČNÍ OCHRANA OBVODŮ A SOUČÁSTEK.....	39
5.3.1	Hlavní požadavky na ochranné obvody .....	39
5.3.2	Základní typy ochranných obvodů .....	40
5.4	KOMBINOVANÁ OCHRANA.....	40
<b>II</b>	<b>PRAKTICKÁ ČÁST .....</b>	<b>41</b>
<b>6</b>	<b>MĚŘENÍ ELEKTROSTATICKEHO NAPĚTÍ GENEROVANÉHO POHYBEM OBSLUHY V LABORATORÍCH FAI UTB .....</b>	<b>42</b>
6.1	POPIS PROSTŘEDÍ.....	42
6.2	MĚŘÍCÍ PRACOVIŠTĚ.....	43
6.3	MĚŘENÍ PŘI PŘEDEM DEFINOVANÝCH ČINNOSTECH .....	43
6.3.1	Nejčastější činnosti (pohyby) v laboratoři:.....	44
6.4	DĚLKA MĚŘENÍ A UKLÁDÁNÍ DAT .....	44
<b>7</b>	<b>ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ.....</b>	<b>46</b>



---

7.1	HODNOTY Z MĚŘENÍ BEZ ANTISTATICKÝCH POMŮCEK.....	46
7.2	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ BEZ ANTISTATICKÝCH POMŮCEK.....	47
7.3	HODNOTY Z MĚŘENÍ S POUŽITÍM ANTISTATICKÝCH POMŮCEK .....	48
7.4	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ PŘI POUŽITÍ ANTISTATICKÉHO PLÁŠTĚ A BOT .....	50
<b>ZÁVĚR .....</b>		<b>51</b>
<b>ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....</b>		<b>52</b>
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>		<b>53</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>		<b>54</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>55</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>		<b>56</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>		<b>57</b>

## ÚVOD

V posledních desetiletích prodělal a stále prodělává polovodičový průmysl velký pokrok ve vývoji nových obvodů. Obvody jsou stále rychlejší, roste jejich integrace, mají mnohem menší spotřebu a menší rozměry. Ale jsou také tím pádem více náchylnější na poškození nebo zničení vlivem elektrostatického náboje, který se nahromadí až do takového potenciálu, že způsobí elektrostatický výboj.

Elektrostatický náboj na povrchu předmětů vzniká např. při tření dvou různých materiálů, z nichž alespoň jeden je špatný vodič, kontaktem s již nabitým materiálem nebo indukci.

V dnešní době je velmi důležitá prevence proti tomuto poškození nebo zničení a obvody jsou vyráběny s ochranou proti tomuto poškození. Tyto ochrany musí být doplněny dalšími ochrannými prostředky a postupy, aby se minimalizovalo riziko poškození byť jen jediné součástky, která by měla za následek nefunkčnost celého obvodu nebo zařízení.

V této práci se zaměřím na vysvětlení základů elektrostatiky, osvětlením základních principů pro identifikaci a kvantifikaci výskytu statického elektrického náboje, způsoby ochrany před statickou elektřinou, měřením elektrostatického napětí generovaného pohybem obsluhy v laboratoři FAI UTB a vyhodnocením vlivu základních pomůcek eliminujících statickou elektřinu.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 SEZNÁMENÍ S ELEKTROMAGNETICKOU KOMPATIBILITOU

Elektromagnetická kompatibilita (EMC) je schopnost zařízení, systému či přístroje vykazovat správnou činnost i v prostředí, v němž působí jiné zdroje elektromagnetických signálů (přírodní či umělé), a naopak svou vlastní „elektromagnetickou činností“ nepřípustně neovlivňovat své okolí, tj. nevyzařovat signály, jež by byly rušivé pro jiná zařízení. [1]

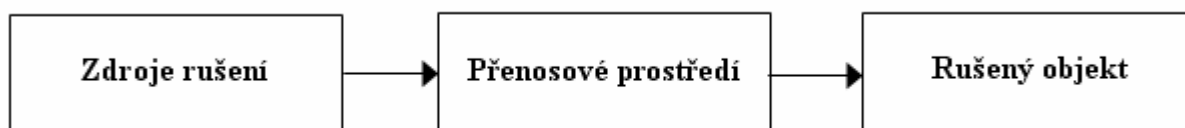
### 1.1 Elektromagnetická kompatibilita biologických systémů

Zabývá se přípustnými hladinami přírodních i umělých elektromagnetických signálů a jejich vlivem na živé organismy.

### 1.2 Elektromagnetická kompatibilita technických systémů

Zabývá se koexistencí a působením technických prostředků jako např. elektrotechnických zařízení, elektronických přístrojů, výpočetní a komunikační a měřicí techniky.

Principy a návrhy EMC lze chápat jako praktickou aplikaci obecných principů elektrotechniky a elektroniky pro danou situaci.



Obr. 1 Základní řetězec EMC

Každé zařízení nebo systém může ale být současně zdrojem rušení i rušeným objektem. Objekty, které jsou však méně citlivé na rušení a spíše generují větší úroveň rušení můžeme označit jako **zdroje rušení**. Naopak objekty, které jsou velmi citlivé na rušení a rušení jiných zařízení téměř nezpůsobují můžeme označit jako **rušené objekty**.

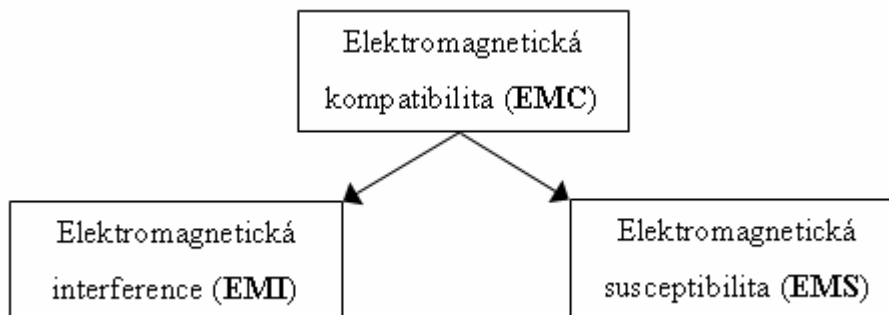
Tab. 1 Příklady ze základního řetězce EMC

Zdroje elektromag. rušení	Přenosová prostředí	Rušený objekt
Motory	Energetické kabely	Číslicová technika
Spínače	Napájecí vedení	Počítače
Relé	Zemnění	Měřicí přístroje
Energetické rozvody	Stínění	Telekomunikační systémy
Číslicové systémy	Signálové vodiče	Rozhlasové přijímače
Elektrostatické výboje	Datové vodiče	Televizní přijímače
Počítače	Vzdušný prostor	Datový přenos

V praxi nikdy nedosáhneme, aby systém byl absolutně kompatibilní, tomuto stavu se však chceme co nejvíce přiblížit. A to tou nejjednodušší nebo nejlevnější cestou, kterou zároveň dosáhneme nejvyššího efektu EMC. Upravují se tedy vlastnosti zdroje rušení, přenosového prostředí i objektu citlivého na rušení.

### 1.3 Základní rozdělení problematiky EMC

Problematika EMC se člení do dvou základních skupin: **elektromagnetická interference** (rušení) a **elektromagnetická susceptibilita** (odolnost).



Obr. 2 Základní členění problematiky EMC

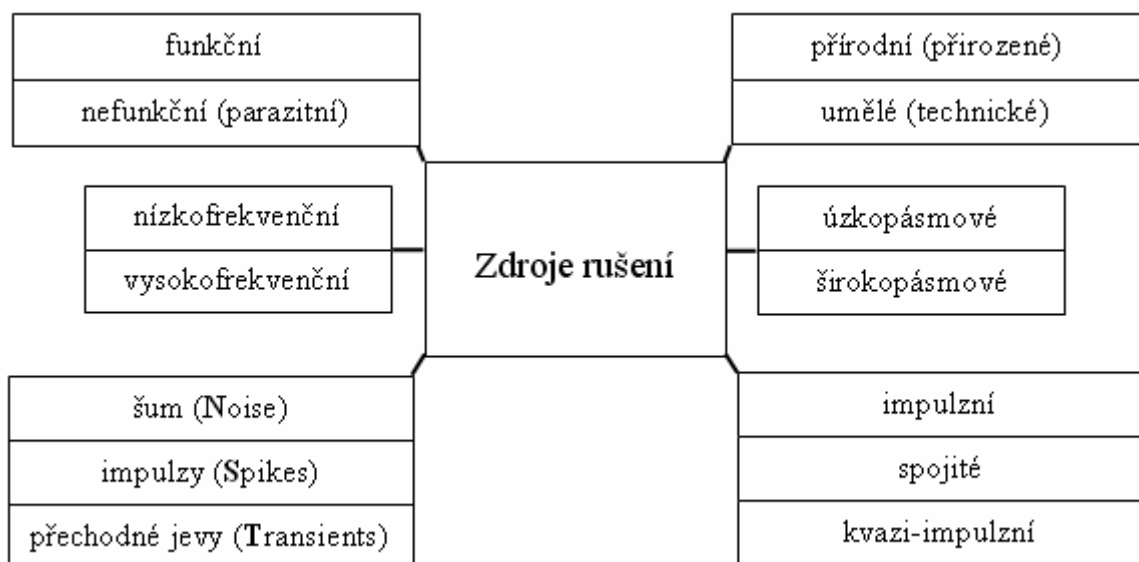
### 1.3.1 Elektromagnetická interference (EMI)

EMI je proces, ve kterém se signál generovaný zdrojem rušení přenáší prostřednictvím elektromagnetické vazby do rušených objektů. Elektromagnetická vazba je způsob i cesta, kterou energie ze zdroje rušení přechází do rušených objektů. EMI se hlavně zabývá identifikací hlavních zdrojů rušení, jejich popisem a měřením. Kompatibility se zde dosahuje technickými opatřeními na zdrojích rušení. **EMI se tedy snaží odstranit příčiny rušení.**

### 1.3.2 Elektromagnetická susceptibilita (EMS)

EMS je vlastnost zařízení či systému pracovat bez poruch nebo s přesně definovaným přípustným vlivem v daném prostředí. EMS se zabývá technickými opatřeními na objektu (přijímači rušení), které zvyšují jeho odolnost vůči vlivu různých zdrojů rušení. **EMS se zabývá odstraňováním důsledků rušení, bez odstraňování jeho příčin.**

## 1.4 Zdroje rušivých signálů



Obr. 3 Klasifikace interferenčních signálů

#### 1.4.1 Přírodní a umělé zdroje rušení

Vznikům **přírodních zdrojů** rušení z velké části zabránit nemůžeme, můžeme však předcházet jejich následkům.

**Umělé zdroje** rušení jsou pak ty, které jsou závislé na činnosti člověka, případně technických a technologických zařízeních.

#### 1.4.2 Funkční a parazitní zdroje rušení

**Funkční zdroje** jsou takové, které jsou tvořeny primární funkcí nějakého zařízení např. vysílaným signálem vysílače.

**Parazitní** neboli nefunkční jsou naopak ty, kde zařízení při svém běžném provozu produkují navíc ještě rušivá pole či napětí.

#### 1.4.3 Nízkofrekvenční (NF) a vysokofrekvenční (VF) zdroje rušení

**Nízkofrekvenční rušení** se může projevat dvěma způsoby:

**Energetické NF rušení** je ve frekvenčním rozsahu 0 až 2 kHz a působí převážně na napájecí soustavu a zkresluje napájecí napětí a odebíraný proud. Zdrojem takového rušení je každá nelineární zátěž, která způsobuje deformaci odebíraného proudu.

**Akustické NF rušení** se vyskytuje ve frekvenčním pásmu do 10 kHz a ovlivňuje funkci komunikačních systémů jako jsou telefony, rozhlas a některé měřicí a řídicí zařízení. Toto rušení nejčastěji vzniká činností radarů a číslicových systémů přenosu dat.

**Vysokofrekvenční rušení** je ve frekvenčním pásmu 10 kHz až 400 Ghz.

#### 1.4.4 Úzkopásmové a širokopásmové zdroje rušení

**Úzkopásmové zdroje** jsou nejčastěji signály televizních a jiných vysílačů.

**Širokopásmové zdroje** mohou být všechny přírodní zdroje rušení a také technické (průmyslové) zdroje rušení jako např. zářivka, která může být zdrojem rušení v pásmu 0,1 Hz až 3 MHz ve vedení a 100 Hz až 3 MHz při rušení šířeném prostorem.

#### 1.4.5 Šum, impulzy a přechodné jevy

**Šum** je takový rušivý signál, který ovlivňuje tvar užitečného signálu. Šum v EMC má jiný význam jako šum v elektrotechnice, který se vyskytuje při činnosti elektrických a elektronických součástí a obvodů (např. tepelný šum). Šum v EMC je nejčastěji periodického charakteru a jeho zdrojem jsou nejčastěji elektromotory.

**Impulzy** jsou rušivé signály, které mají velkou velikost v poměru k době svého trvání. Na užitečném signálu pak tyto impulzy vytvářejí kladné nebo záporné „špičky“. Nejčastější příčinou vzniku impulzů jsou spínací obvody.

**Přechodné jevy** jsou jednorázové rušivé signály s obvyklou dobou trvání od ms po několik sekund, pak totiž dojde k ustálení. Energetické sítě je jejich typickým zdrojem zapínání a vypínání spotřebičů s vysokým výkonem.

#### 1.4.6 Impulzní, spojitě a kvazi-impulzní rušení

Podle časového průběhu rušivého signálu můžeme jeho zdroje rozdělit na:

**Impulzní** má charakter po sobě jdoucích impulzů nebo přechodných jevů.

**Spojitě** je opakem impulzního a působí nepřetržitě na rušené zařízení.

**Kvazi-impulzní** je kombinací spojitěho a impulzního rušení.



## 2 ÚVOD DO ELEKTROSTATIKY

### 2.1 Základní pojmy

#### 2.1.1 Elektrický náboj

Fyzikální veličina, která vyjadřuje schopnost působit elektrickou silou. Elektrický náboj je charakteristickou veličinou elektrostatického pole. Značí se  $Q$  a v soustavě SI je jednotkou náboje jeden coulomb – 1 C. Elektrický náboj může mít kladnou nebo zápornou hodnotu. Elektrické náboje všech reálných částic jsou rovny celistvému násobku elementárního náboje  $e_0 = (1,602\ 189 \pm 0,000\ 005) \cdot 10^{-19}$  C. [2]

#### 2.1.2 Elektrostatické pole

Je prostředí, ve kterém se projevují silové účinky elektrických nábojů, které jsou v klidu. Elektrostatické pole může existovat jen v nevodivém prostředí. Zobrazujeme ho siločarami. Popisuje ho elektrická intenzita a elektrický potenciál.

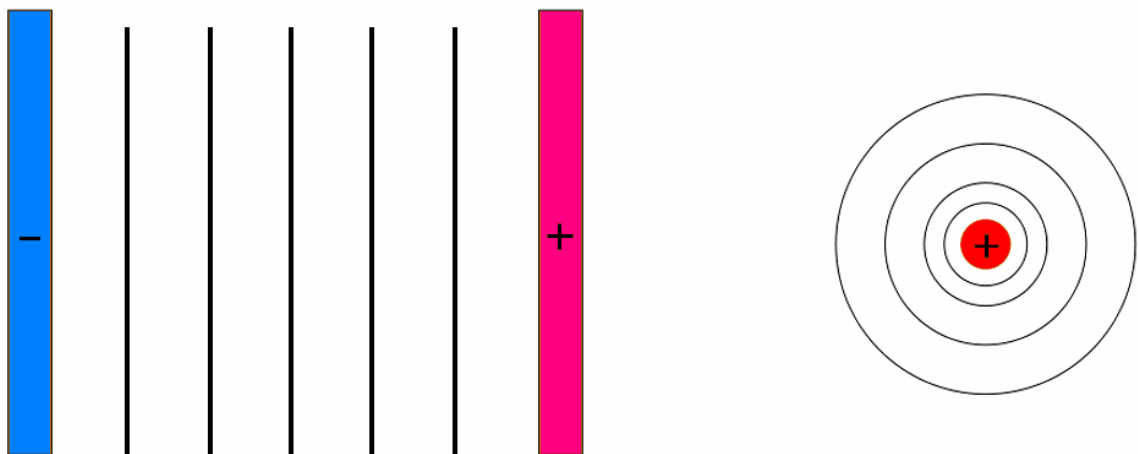
#### 2.1.3 Intenzita elektrického pole

Fyzikální veličina, které vyjadřuje velikost a směr elektrického pole. Definována je jako elektrická síla působící na těleso s kladným jednotkovým elektrickým nábojem. Vektor intenzity elektrického pole  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}$ . Intenzita el. pole

v pomyslném bodě A, vzdáleném  $r$  od náboje  $Q$  se vypočítá  $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \cdot \frac{Q}{r^2}$ . Jako jednotku intenzity pak v praxi používáme V/m.  $\epsilon_0$  je permitivita vakua a  $\epsilon_r$  permitivita prostředí ve kterém se náboj nachází. Graficky se intenzita elektrického pole zobrazuje pomocí ekvipotenciálních ploch nebo siločar. [3]

### 2.1.4 Ekvipotenciální plocha

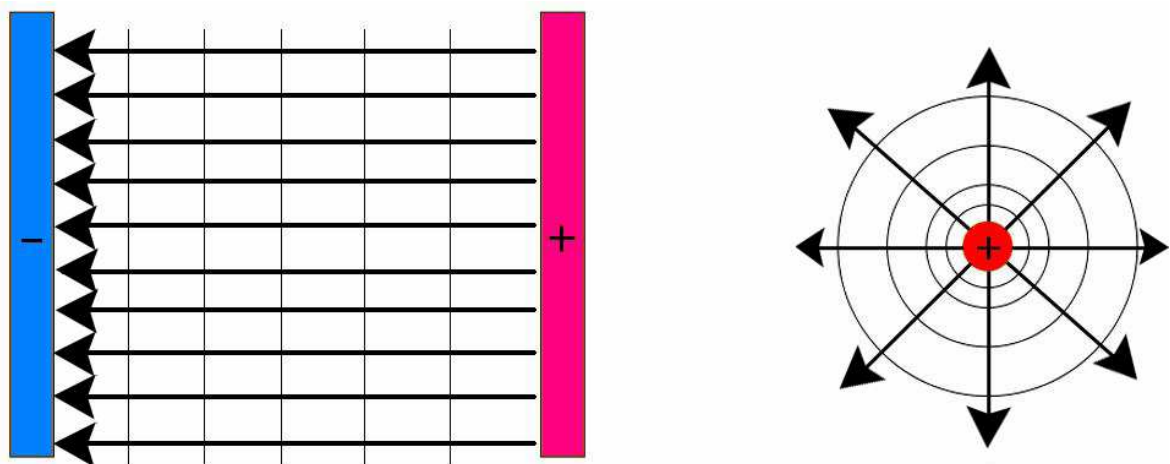
Ekvipotenciální plochy se využívají ke grafickému znázornění elektrického pole. Jsou tvořeny množinou bodů, které se vyznačují stejným potenciálem. Ekvipotenciální plochy jsou vždy kolmé na siločáry.



Obr. 4 Ekvipotenciální plochy homogenního a radiálního pole

### 2.1.5 Siločára

Siločára je orientovaná křivka, má stejnou orientaci jako směr intenzity daného pole. Siločáry se využívají ke grafickému znázornění např. elektrického pole a nikdy se neprotínají. Hustotu siločar lze využít k určení velikosti intenzity pole v určité části prostoru



Obr. 5 Siločáry (tučně), kolmé na ekvipotenciální plochy homogenního a radiálního pole

### 2.1.6 Elektrický potenciál

Elektrický potenciál je skalární fyzikální veličina, která popisuje potenciální energii jednotkového elektrického náboje v neměnném elektrickém poli. Značí se  $\varphi$  a jednotkou je 1 volt V. Jde tedy o množství práce potřebné k přenesení jednotkového elektrického náboje ze vztažného bodu, kterému je přisouzen nulový potenciál, do daného místa. Za místo s nulovým elektrickým potenciálem se obvykle bere v praktických úlohách povrch Země.

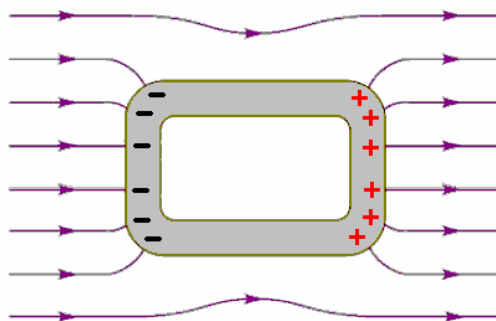
$$\varphi = \frac{W}{Q}, \text{ kde } W \text{ je potenciální energie nabitého tělesa a } Q \text{ je jeho náboj.}$$

### 2.1.7 Elektrostatická potenciální energie

Potenciální energie bodového náboje závisí na jeho poloze v elektrostatickém poli. Při pohybu ve směru působení elektrostatické síly se jeho potenciální energie zmenšuje, při pohybu proti elektrostatické síle se zvětšuje. Elektrostatická potenciální energie systému vztažená k nulovému bodu je rovna celkové práci, která musí být vykonána, aby se náboje přenesly pomalu, jeden po druhém z nekonečné vzdálenosti do stavu, který máme v systému.

### 2.1.8 Vodič v elektrostatickém poli

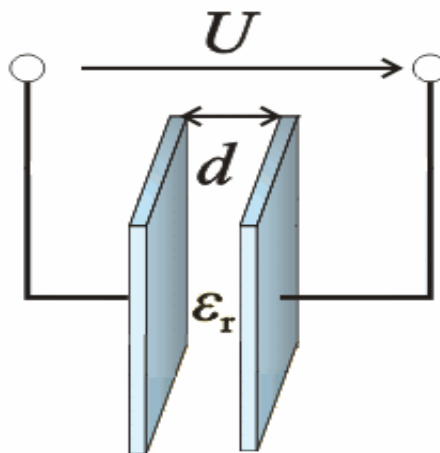
Za vodiče považujeme materiály, u kterých proběhne přemístění jejich nábojů do polohy odpovídající nulové výsledné intenzitě elektrického pole za dobu kratší než  $10^{-6}$  s. Pokud se vodič nabije, pak se náboj na jeho povrchu rozprostře tak, že uvnitř vodiče bude nulová intenzita elektrického pole. Povrch vodiče tedy tvoří ekvipotenciální plochu.[4]



Obr. 6 Vodič v elektrostatickém poli

### 2.1.9 Kapacita

Elektrickou kapacitu můžeme definovat jako množství elektrického náboje vodiče s jednotkovým elektrickým potenciálem. Značí se  $C$ , jednotkou je 1 farad F. Mějme vodič, který nabijeme nábojem  $Q$  a na jeho povrchu je konstantní potenciál  $\varphi_0$ . Změní-li se náboj  $k$ -krát, pak se také podle principu superpozice změní potenciál  $k$ -krát. Platí  $\frac{Q}{\varphi} = \frac{kQ}{k\varphi}$ , tento poměr závisí pouze na geometrickém uspořádání tělesa a zvoleném bodu ve kterém určujeme potenciál. Na povrchu tělesa (vodiče), kde  $\varphi_0 = \varphi$  je tedy elektrická kapacita  $C = \frac{Q}{\varphi_0}$ . Elektrická kapacita se využívá především v kondenzátoru. Pro nejjednodušší deskový kondenzátor pak  $C = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2} = \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \frac{S}{d}$ , kde  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$  jsou potenciály desek,  $Q$  je celkový náboj,  $\epsilon_0$  je permitivita vakua,  $\epsilon_r$  je permitivita prostředí mezi deskami,  $S$  je plocha desek a  $d$  je vzdálenost mezi deskami. [4]



Obr. 7 Schéma deskového kondenzátoru

### 2.1.10 Permitivita

Je fyzikální veličina popisující izolační vlastnosti dielektrika (v případě statického elektrického pole). Permitivita vakua  $\epsilon_0 = 8,854\,187\,817 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ . Relativní permitivita je podíl permitivity daného materiálu a permitivity vakua, např. vzduchu, kde  $\epsilon_r = 1$ .

### 2.1.11 Dielektrikum v elektrickém poli

Teoretické dielektrikum (izolant) je látka která neobsahuje volné náboje. Skutečné dielektrikum však vodí, ale proud je z hlediska praxe zanedbatelný. Dielektrika obsahují elektrické náboje obou polarit. Elektrické pole pak na tyto náboje působí a mění jejich polohu. To způsobuje následnou změnu elektrického pole – polarizaci (posuv elektronů vůči jádrům atomů). Vzniknou tak dipóly. Při přerušení působení elektrického pole na dielektrikum pak dipóly ve většině látek zanikají. [4]

### 2.1.12 Elektrická pevnost

Elektrická pevnost je charakteristická vlastnost pro elektroizolační materiály. Elektrická pevnost  $E_p$  je poměr velikosti průrazného napětí  $U_p$  ku tloušťce dielektrika  $d$ .  $E_p = \frac{U_p}{d}$  Jednotkou elektrické pevnosti pak kV/m. Pokud intenzita elektrického pole dosáhne elektrické pevnosti dielektrika, nastane u pevných dielektrik průraz, u kapalných a plyných pak přeskok. Při průrazu pevných dielektrik dojde k jejich trvalému mechanickému poškození. Elektrická pevnost plynů je dána intenzitou elektrického pole, při které dochází k zlomové ionizaci. Tato ionizace se projevuje často jako koróna (světelný jev) v místech, kde intenzita elektrostatického pole přesáhla elektrickou pevnost plynu. Koróna bývá pak často zdrojem vysokofrekvenčního rušení.

Pozn. Elektrická pevnost vzduchu je za normálního tlaku a vlhkosti přibližně 3 kV/mm. [4]

## 2.2 Maxwellovy rovnice

Maxwellovy rovnice jsou základní zákony v makroskopické teorii elektromagnetického pole, které zformuloval James Clerk Maxwell v roce 1865. Lze je zapsat v integrálním nebo v diferenciálním tvaru. V integrálním tvaru popisují elektromagnetické pole v jisté oblasti, kdežto v diferenciálním tvaru v určitém bodu této oblasti. [5]

### 2.2.1 Maxwellovy rovnice a veličiny v nich

Tab. 2 Fyzikální proměnné použité v Maxwellových rovnicích [5]

Označení	Význam	Jednotka SI
$E$	intenzita elektrického pole	V/m
$H$	intenzita magnetického pole	A/m
$D$	elektrická indukce	C/m <sup>2</sup>
$B$	magnetická indukce	T
$\rho$	hustota volného náboje	C/m <sup>3</sup>
$j$	hustota elektrického proudu	A/m <sup>2</sup>

### 2.2.2 Maxwellovy rovnice elektrostatického pole

Oblast elektrostatických jevů je charakterizována časovou nezávislostí všech veličin a neexistencí proudů ( $j = 0$ ).

Výchozí rovnice elektrostatického pole jsou:

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = 0, \quad \operatorname{div} \mathbf{D} = \rho,$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = 0, \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0.$$

K těmto rovnicím připadají hraniční podmínky:

$$E_{1t} - E_{2t} = 0, \quad D_{1n} - D_{2n} = \eta,$$

$$H_{1t} - H_{2t} = 0, \quad B_{1n} - B_{2n} = 0.$$

Rovnice pole včetně hraničních podmínek se rozpadají na dvě nezávislé soustavy, tudíž lze elektrické pole zkoumat nezávisle na poli magnetickém. [2]

Pozn. **Rotace** je matematický operátor definovaný pro vektorové funkce n proměnných, který v každém bodě udává lokální míru rotace. Značí se  $\text{rot}$ . Ve třech rozměrech (pro funkci tří proměnných) jej lze zapsat ve tvaru:

$$\text{rot } \mathbf{E} = \left( \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z}, \frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x}, \frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} \right).$$

**Divergence** je diferenciální operátor ve vektorovém počtu udávající zřídlovost vektorového pole. Je-li zkoumaným polem např. gradient teploty (vektory udávají rychlost vedení tepla), potom kladná divergence v daném bodě znamená, že v daném bodě vzniká teplo a záporná, že v daném bodě teplo zaniká. Značí se  $\text{div}$ .

Jsou-li  $x, y, z$  kartézské souřadnice v 3-rozměrném prostoru, a  $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$  báze jednotkových vektorů a  $\mathbf{F} = F_x \mathbf{e}_x + F_y \mathbf{e}_y + F_z \mathbf{e}_z$  je spojitě diferencovatelné vektorové pole, pak jeho

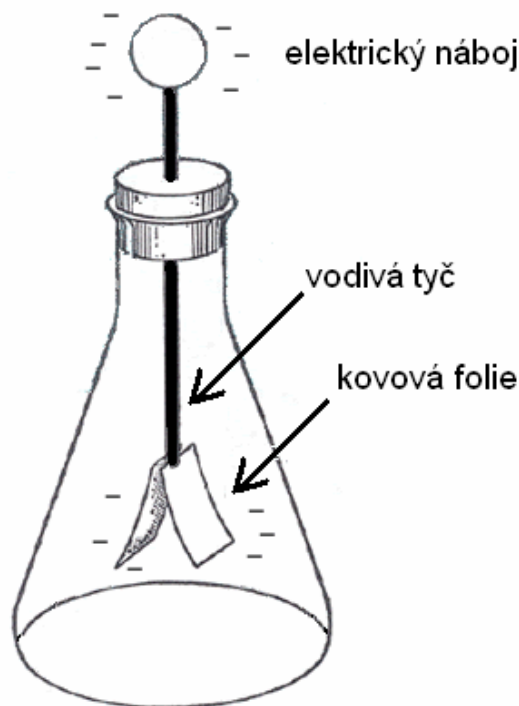
divergenci definujeme jako skalární veličinu  $\text{div } \mathbf{F} = \left( \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \right)$ .

### 3 PRINCIPY MĚŘÍCÍ TECHNIKY PRO OBLAST IDENTIFIKACE A KVANTIFIKACE VÝSKYTU STATICKÉHO ELEKTRICKÉHO NÁBOJE

#### 3.1 Identifikace elektrického náboje

##### 3.1.1 Elektroskop

Elektroskop je přístroj, který zjišťuje přítomnost elektrického náboje. Dokáže zjistit přítomnost kladného i záporného elektrického náboje stejně. Běžné foliové elektroskopy detekují potenciál elektrických nábojů až od několika stovek voltů.



Obr. 8 Primitivní elektroskop

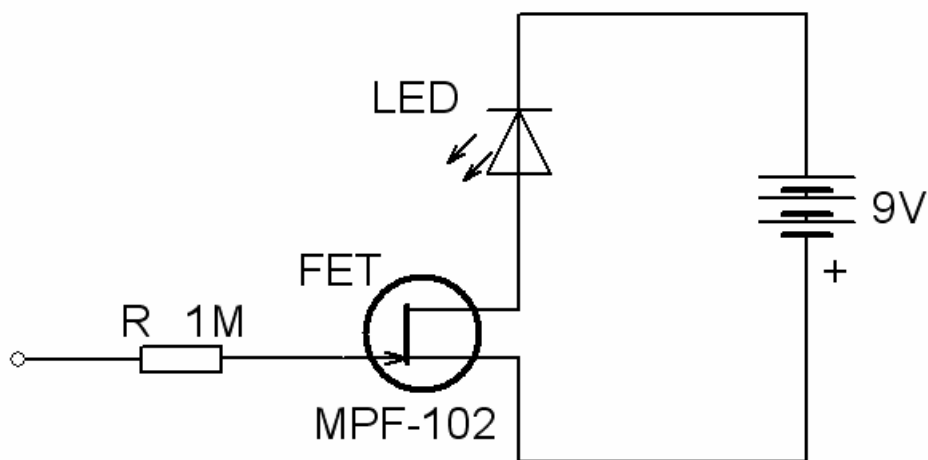
##### 3.1.2 Princip činnosti jednoduchého elektroskopu

Vodivou elektrodu přiložíme k objektu nebo místu kde chceme zjistit přítomnost elektrického náboje. Pokud je náboj přítomen putuje z elektrody vodičem na pásy kovové folie, oba pásy se nabijí (stejným nábojem). Podle jeho velikosti jsou pak pásy kovové folie od sebe odtlačovány odpudivou silou stejných elektrických nábojů.



### 3.1.3 Elektronický elektroskop s FET tranzistorem

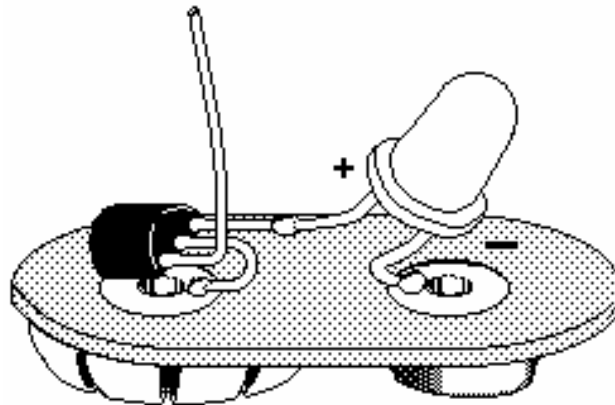
Elektronické elektroskopy pracující s FET tranzistory dokáží detekovat i mnohem menší potenciály než foliové elektroskopy. Pro praxi zajímavé zdroje nebo místa s elektrostatickým nábojem v našem okolí mají elektrický potenciál o více než stovkách voltů. Proto může kterýkoliv citlivý elektronický elektroskop tyto náboje detekovat i na větší vzdálenosti, za předpokladu, že bude mít vhodnou elektrodu (anténu). Při přímém dotyku elektrody může tento elektroskop detekovat malé náboje o potenciálu až v jednotkách voltů. [6]



Obr. 9 Schéma zapojení jednoduchého elektroskopu s FET tranzistorem

### 3.1.4 Princip elektronického elektroskopu s FET tranzistorem

Elektrický potenciál – elektrické napětí přes elektrodu (anténu) a odpor ovlivňuje FET tranzistor (jeho přechod Source-Drain), který podle své polaritě buď přotevřívá nebo přizavírá a tím se ovlivňuje proud LED diodou, která svítí více nebo méně a indikuje tak přítomnost elektrického náboje.

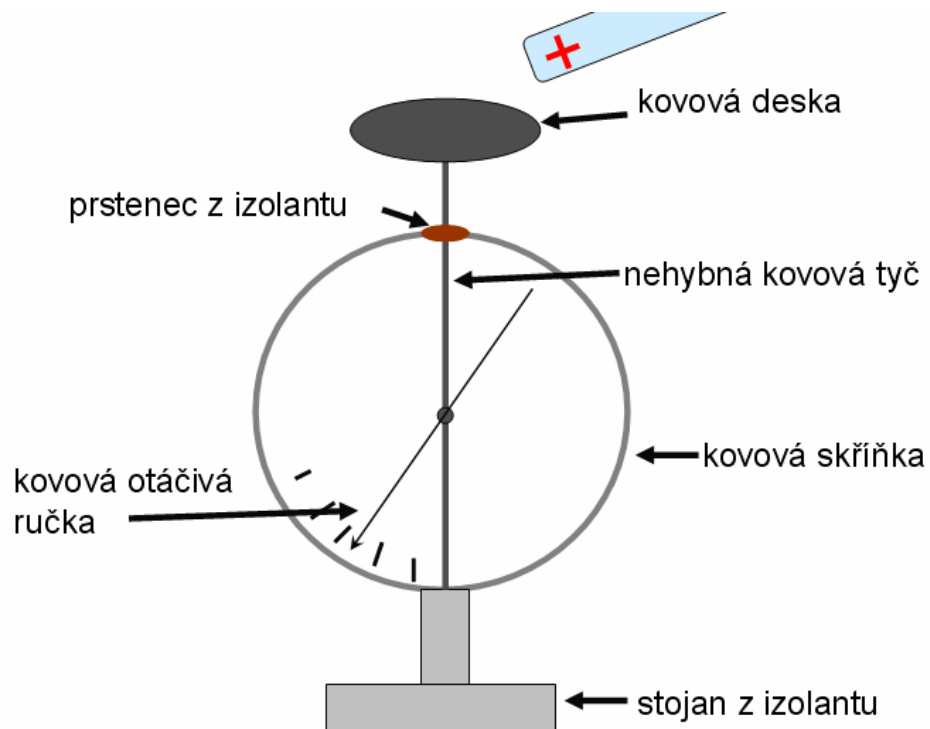


Obr. 10 Realizace elektroskopu na konektoru k 9V baterii [6]

## 3.2 Kvantifikace elektrického náboje

### 3.2.1 Elektrometr

Přístroj k měření velikosti elektrického náboje. Princip jednoduchého elektrometru je velmi podobný elektroskopu, jenom že nemá dva pohyblivé kovové pásky, ale jednu pevnou část a druhou část tvoří ručka, která na stupnici ukazuje velikost elektrického náboje.



Obr. 11 Schéma jednoduchého elektrometru

### 3.2.2 Elektronický elektrometr

V dnešní době se k měření elektrostatického náboje používají elektronické elektrometry s různými typy elektrod, sond nebo antén. Elektronický elektrometr je vlastně voltmetr s velmi velkou vstupní impedancí – některé až  $10^{16} \Omega$ . Proto se hodí pro měření napětí zdrojů s velmi vysokou impedancí.

### 3.2.3 Elektronický elektrometr WT5000

Pro naše měření elektrostatického náboje v laboratoři byl použit tento elektrometr od firmy Wolfgang Warmbier e.K. Součástí sady k tomuto elektrometru je AD převodník pro zobrazení výsledků měření na počítači. Elektrometr používá jako sondu k měření kovovou elektrodu, která je k němu připojena izolovaným vodičem. WT5000 je schopný měřit ve dvou rozsazích  $\pm 500 \text{ V}$  a  $\pm 5000 \text{ V}$ .

Zásady použití elektrometru WT5000:

- Elektrometr musí být vždy při měření řádně uzemněn..
- Elektrometr nedetekuje střídavá pole o frekvenci větší než 100Hz.
- Elektrometr není určen pro měření v místech s možností výbuchu.
- Používání elektrometru v elektrárnách není dovoleno.

#### Electrometer

Dimensions:	190 x 148 x 67 mm (L x W x H)
Weight:	ca. 500g
Input voltage:	$\pm 500\text{V} / \pm 5000\text{V}$
Input impedance:	$> 10^{14} \Omega$
Input capacity:	$< 5 \text{ pF}$
Response time:	$\leq 10 \text{ ms}$
Output:	Analog $\pm 5\text{V}$
Display:	21-digit logarithmic LED display with "Peak Hold"
Power supply:	4 pcs. NiMH rechargeable batteries (AA)
Operating duration:	several hours
Charger:	7,5V DC, 300 mA
Ranges:	$\pm 500\text{V}, \pm 5000\text{V}$
Accuracy:	$< 5\%$
Battery monitoring:	audible

Obr. 12 Parametry elektrometru WT5000 [7]



Obr. 13 Měřící elektoda

**Front side**

- ( 1 ) Measurement input
- ( 2 ) Input range indicator LED x10
- ( 3 ) Input range selector
- ( 4 ) Trimmer for zero adjustment
- ( 5 ) "Peak Hold" reset button
- ( 6 ) 21-digit logarithmic LED display

**Back side**

- ( 7 ) On-/off button
- ( 8 ) Power supply socket for the charger
- ( 9 ) Grounding socket
- ( 10 ) Analog output (BNC socket) - Analog signal for the A/D-converter

Obr. 14 Vzhled elektrometru WT5000 [7]

## 4 CHARAKTERISTIKY ELEKTROSTATICKÉHO NÁBOJE A VÝBOJE

### 4.1 Charakteristika elektrostatického náboje

- Elektrický náboj je fyzikální veličina, která vyjadřuje velikost schopnosti působit elektrickou silou.
- Velikost elektrických sil, kterými na sebe působí dva bodové náboje, je přímo úměrná absolutní hodnotě součinu jejich velikostí a nepřímo úměrná druhé mocnině jejich vzdálenosti  $F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{|Q_1Q_2|}{r^2}$  – Coulombův zákon.
- Síly působící mezi dvěma různě nabitými tělesy jsou přitažlivé, pokud mají tělesa náboje se shodnými znaménky působí na ně síly odpuzivé. Tyto síly se označují jako elektrostatické. Nabitá tělesa, které se pohybují na sebe navíc působí silami magnetickými.
- Elektrický náboj je skalární veličinou.
- Tělesa, které mají elektrický náboj rovný nule nazýváme tělesa elektricky neutrální.
- Elektrický náboj může mít kladnou nebo zápornou hodnotu.
- Elektrické náboje na tělesech vznikají přemístěním elektronů z jednoho tělesa na druhé.
- Pohybující se elektrický náboj je popisován pomocí elektrického proudu.
- Pokud se v tělese nachází více elektrických nábojů, je výsledný elektrický náboj tělesa roven algebraickému součtu elektrických nábojů jednotlivých částí.
- V některých případech není rozložení náboje po tělese podstatné a celé těleso můžeme nahradit tzv. bodovým nábojem.
- Celkové množství náboje v elektricky izolované soustavě se nemění. Tato skutečnost se označuje jako zákon zachování elektrického náboje. Podle tohoto zákona nelze elektrický náboj vytvořit ani zničit, lze jej jen přemístit.

- Elektrické náboje, které se mohou volně pohybovat (např. ve vodičích), se označují jako volné náboje. Při polarizaci dielektrika se objevuje také polarizační náboj. Polarizační náboje se na rozdíl od nábojů ve vodičích nemohou v dielektriku přemisťovat na makroskopické vzdálenosti. Proto bývají označovány jako vázané náboje. Celková hodnota vázaných nábojů vzniklých polarizací v celém objemu tělesa je vždy nulová. Existence a rozložení těchto polarizačních nábojů je spojena s přítomností nejčastěji elektrostatického pole.
- Celkový elektrický náboj je vždy celočíselným násobkem elementárního náboje.
- I malé množství látky může obsahovat velké množství elektrických nábojů, což nás opravňuje přiřazovat celkovému náboji makroskopického tělesa hodnoty, které nemusí být celočíselným násobky elementárního náboje.
- Velikost elektrického náboje se při jeho pohybu nemění.

[3]

Pozn. V našem případě laboratoří a měření v nich se budeme zabývat elektrostatickým nábojem, který je generovaný pohybem obsluhy v laboratoři tzv. triboelektrickým nabíjením.

#### 4.1.1 Triboelektrické nabíjení

Jde o jev, při kterém je náboj generován kontaktem a oddělením dvou povrchů.

Velikost náboje generovaným triboelektrickým nabíjením závisí na:

- velikosti plochy kontaktu materiálů.
- rychlosti pohybu (oddělení).
- relativní vlhkosti okolního vzduchu (s větší relativní vlhkostí se podstatně snižuje velikost generovaného náboje).
- druhem materiálů podle velikosti a polaritý náboje vytvořeného při jejich kontaktu a oddělení.

## 4.2 Charakteristika elektrostatického výboje

Pro naše podmínky budeme uvažovat elektrické výboje ve vzduchu. A to ve vnitřním prostředí (v laboratořích FAI UTB). Elektrostatický výboj patří k umělým zdrojům přepětí, jejichž význam v posledních letech stále vzrůstá.

### 4.2.1 Elektrostatický výboj (ESD)

ESD (electrostatic discharge) je definován jako přenos náboje mezi tělesy s různými elektrickými potenciály, který byl vyvolán **přímým kontaktem** nebo **indukován elektrostatickým polem**.

### 4.2.2 Typy elektrostatického výboje

- Kontaktní výboj – přenos elektrického náboje mezi tělesy s různým elektrostatickým potenciálem přímým kontaktem.
- Vzdušný výboj (přeskok) – přenos elektrického náboje vzduchem mezi tělesy s různým elektrostatickým potenciálem.
- Obloukový výboj – výboj charakterizovaný velkou intenzitou světla, teplotou a proudem.

Pozn. Pro naše laboratorní měření mají pak význam pouze kontaktní a vzdušné výboje – obloukový se zde nevyskytuje.

### 4.2.3 Dva nejčastější způsoby vzniku elektrostatického výboje

Elektrostatický výboj vznikne mezi nabitým předmětem (např. částí lidského těla) a uzemněným obvodem (např. při manipulaci s elektrickým zařízením nebo integrovaným obvodem).

Elektrostatický výboj vznikne mezi nabitým obvodem a uzemněným zařízením (např. při manipulaci s integrovanými obvody nebo při dotyku testovacím nástrojem).

#### 4.2.4 Nejčastější podmínky vzniku elektrostatického výboje na pracovištích

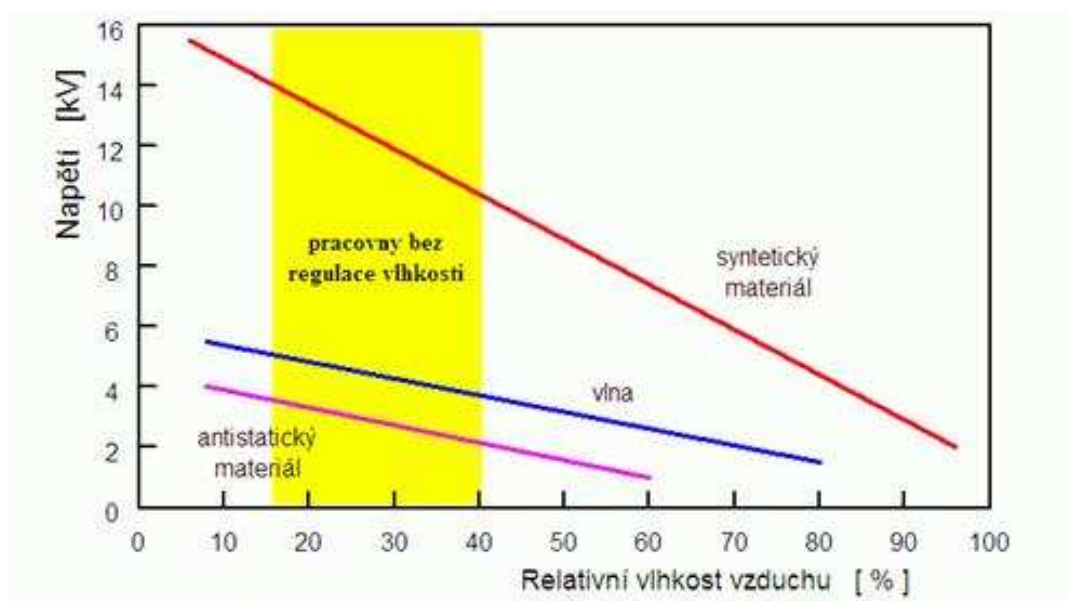
K elektrostatickým výbojům dochází převážně při současné kumulaci následujících podmínek:

- Pracovníci obsluhující elektronické přístroje mají nevhodné oblečení z hlediska vzniku vysokého elektrostatického napětí - jejich oděvy jsou ze syntetických tkanin.
- Povrchy stolů, židlí a podlahová krytina jsou z umělých hmot s vysokým izolačním odporem.
- Nízká vlhkost vzduchu v místnosti.

Tab. 3 Triboelektrické nabíjení a relativní vlhkost [8]

Pohyb při 21,1 ° C	20 % RH	80% RH
Chůze po vinylové podlaze	12 kV	250 V
Chůze po umělém koberci	35 kV	1.5 kV
Vytáhnutí součástky z pěnového obalu	18 kV	1.5 kV
Zvednutí polyuretanového sáčku	20 kV	600 V
Posun polystyrenové krabice po koberci	18 kV	1.5 kV

Pozn. Triboelektrické nabíjení je tedy problematické hlavně při vlhkostech kolem 20%



Obr. 15 Závislost napětí ESD na relativní vlhkosti pro různé textilní materiály [1]

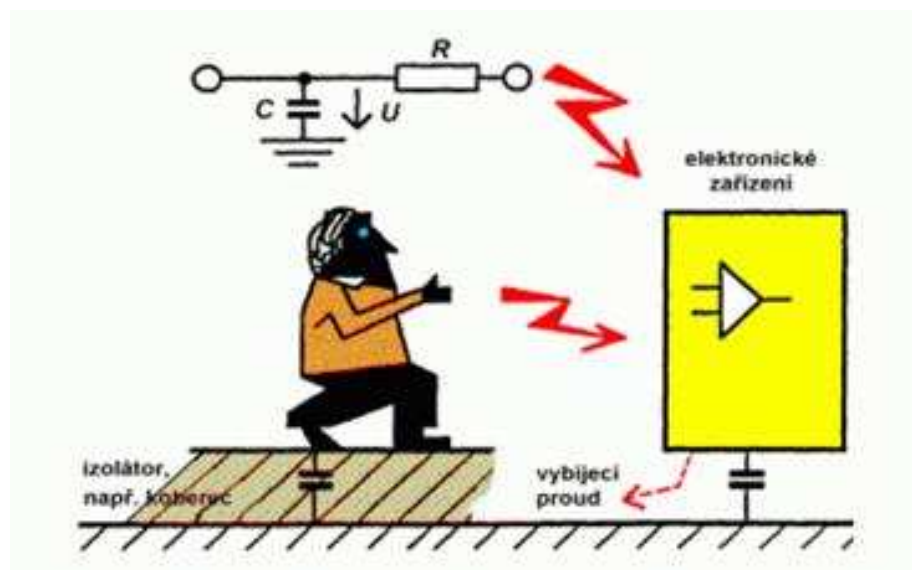


#### 4.2.5 Energie lokálního elektrostatického výboje

Při dotyku pracovníka s povrchem elektrického zařízení o vztažném potenciálu okolí se pak náboj kapacity těla člověka vybije. Ekvivalentní kapacita těla je cca  $100 \div 200$  pF, odpor "vybíjecí" paže člověka je  $100 \Omega$  až  $2 \text{ k}\Omega$ . Vznikající výboj o napětí až  $15 \text{ kV}$  má sice velmi malou energii

$$W = \frac{1}{2} \cdot C U^2 = \frac{1}{2} \cdot (100 \div 200) \cdot 10^{-12} \cdot (15 \cdot 10^3)^2 \approx (10 \div 20) \text{ mJ}$$

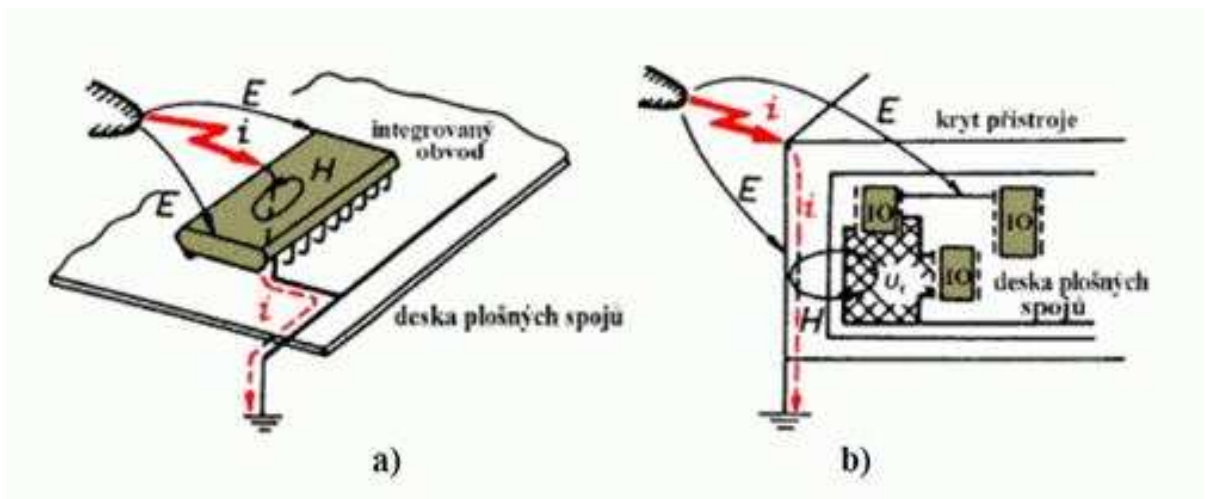
avšak jeho napěťová úroveň jednotek až desítek kV velmi nebezpečná pro elektronické prvky a zařízení. Pro většinu moderních elektronických součástek a integrovaných obvodů pracujících s nepatrnými proudy a vysokými pracovními odpory (obvody CMOS apod.) je pravděpodobně největším provozním nebezpečím triboelektrické nabíjení vznikající při chůzi, pohybu končetin či třením částí oděvu. Osoba tak může běžně dosáhnout napětí proti zemi  $5 \div 15 \text{ kV}$ . [1]



Obr. 16 Vznik lokálního elektrostatického výboje [1]

#### 4.2.6 Vliv lokálního elektrostatického výboje

Elektrostatický výboj tak může ovlivnit funkci i životnost elektronického zařízení či jeho součástek buď přímo (přímý výboj), nebo indukcí magnetickým či elektrickým polem do jiných obvodů. Výboje mikroskopického charakteru nemusí přitom v integrovaných obvodech způsobit jen jejich okamžité zničení, ale mohou vyvolat drobná poškození či zúžení vodivých drah, příp. zhoršení jejich izolačních parametrů. To se projeví jako zjevná závada až později, avšak v době mnohem kratší, než je normální životnost dané součástky či integrovaného obvodu. [1]



Obr. 17 Působení ESD na elektronické součástky a obvody:

a) přímé působení (vybití); b) působení indukcí [1]

## 5 METODIKA OCHRANY ELEKTRONICKÝCH OBVODŮ A VÝPOČETNÍ TECHNIKY PŘED STATICOU ELEKTŘINOU

Ochranu elektrických obvodů a výpočetní techniky před statickou elektřinou lze rozčlenit na:

- aktivní ochranu.
- pasivní ochranu.
- konstrukční ochranu obvodů a součástek.
- kombinovanou ochranu.

### 5.1 Aktivní ochrana

Aktivní ochrana se zaměřuje na zabránění vzniku tak velkého potenciálu statické elektřiny, který by případně mohl ohrozit elektrický obvod nebo zařízení.

#### 5.1.1 Podlahy, podlahové systémy a rohožky

- PVC – speciální podlahy pro elektrotech. průmysl např. ECOSTAT® DUO 2.0.
  - elektrostatický rozptylující materiál.
  - izolační odpor pro personální bezpečnost podle DIN VDE 0100-410.
  - vodivá spodní strana.
  - běžný odpor proti zemi  $R_g = 10^6 - 10^8 \Omega$ .
- Polyamid – např. ECOSTAT® CENTRA-NV.
  - běžný odpor proti zemi  $R_g = 10^6 - 10^8 \Omega$ .

#### 5.1.2 Pracovní stoly, židle a skříňky

- Stoly – spodní železná struktura.
  - laminovaná deska z elektrostaticky rozptylujícího materiálu.
  - sloty na banánky pro další uzemnění.
  - běžný odpor proti zemi  $R_{gp} = 10^5 - 10^7 \Omega$ .

- PU židle – např. Industrial PU-Chair -standard model.
  - sedadlo a zadní opěrka vyrobeny z vodivé PU pěny.
  - vodivá kolečka s automatickým brzděním.
  - běžný odpor proti zemi  $R_{gp} = 10^5 - 10^7 \Omega$ .



Obr. 18 PU židle z laboratoří UTB

- Skříňky – povrch pokryt vodivou barvou, případně celokovové.
  - posuvné na kolečkách nebo pevně stojící.
  - u posuvných vodivá kolečka s automatickým brzděním.
  - běžný odpor proti zemi  $R_{gp} = 10^5 - 10^7 \Omega$ .

### 5.1.3 Antistatické boty a ponožky

- Boty – např. ABEBA® - 31037.
  - PU podrážka.
  - ocelová špička pro ochranu prstů před úrazem.
- Sandály – např. značky Electra.
  - PUR podrážka z elektrostaticky rozptylujícího materiálu.
  - běžný nositelův celkový odpor  $R_{gp} = 10^5 - 10^7 \Omega$ .
- Ponožky – např. značky Jalas.
  - obsahují 3% vodivých stříbrných vláken.

#### 5.1.4 Uzemňovací prvky

- Zemnící náramky – plastové nebo kovové.
  - elastické s nastavitelnou šířkou.
  - plastové s vodivými stříbrnými vlákny.
  - odpor  $R < 10^3 \Omega$  na vnitřní straně a  $< 10^9 \Omega$  na vnější straně.



Obr. 19 Kovový zemní náramek

- Uzemňovací pásy na boty – pro více použití nebo jednorázové samolepící.
  - obsahují vodivé kovové pásy.
  - běžný nositelův celkový odpor  $R_{gp} = 10^6 \Omega$ .



Obr. 20 Uzemňovací pásy na obyčejné boty

### 5.1.5 Pláště a rukavice

- Pláště – např. ANTI-STATIC.
  - 64 % polyester, 35 % bavlna, 1 % kovová vlákna.
  - z elektrostaticky rozptylujícího materiálu.
- Rukavice – např. ESD Polyesterové rukavice.
  - z elektrostaticky rozptylujícího materiálu.
  - běžný nositelův celkový odpor  $R_{gp} < 10^8 \Omega$ .

### 5.1.6 Ionizér materiálu

Např. Ionizér IZS30 odstraňuje elektrostatický náboj dodáním nedostatkových iontů na povrch ionizovaného předmětu.

Ionizér může pracovat ve dvou režimech:

- První je pulsní stejnosměrný režim, kdy jsou střídavě emitovány kladné a záporné ionty s frekvencí 1 až 33 Hz. Frekvence závisí na vzdálenosti ionizéru od povrchu, který se má zbavit elektrostatického náboje.
- Druhý je stálý stejnosměrný režim, kdy jsou po zjištění polaritu povrchu emitovány pouze kladně či záporně nabitě ionty nutné pro neutralizaci náboje.

Vzdálenost mezi ionizérem a neutralizovaným povrchem může být od 50 do 2 000 mm. Pro urychlení neutralizace náboje a při větší vzdálenosti mezi ionizérem a neutralizovaným povrchem (0,5 m a více) se používá externí zdroj stlačeného vzduchu, který protéká tryskami mezi elektrodami vytvářejícími kladně nebo záporně nabitě ionty. Ofukování povrchu takto upraveným vzduchem způsobuje, že povrch je neutralizován během velmi krátké doby. Spotřeba ionizéru je 4 W a v klidovém režimu 2,5 W. Ionizér IZS30 má mnoho možností využití např. v obalovém a potravinářském průmyslu, při výrobě elektronických zařízení a v mnoha jiných oborech. Je tedy možné jej použít pro odstranění elektrostatického náboje z PET lahví, slévárenských forem, reflektorů, filmů, skla a desek plošných spojů v elektronickém průmyslu. [9]

## 5.2 Pasivní ochrana

Pasivní ochrana je taková, která zamezuje vybití nebo přeskočení elektrického náboje v blízkosti citlivé části obvodu nebo zařízení. Realizuje se nejčastěji umístěním citlivé části do dostatečné vzdálenosti a dále vhodným zapouzdrněním elektrického obvodu nebo zařízení. Tuto ochranu nejčastěji realizuje výrobce.

## 5.3 Konstrukční ochrana obvodů a součástek

Jde o ochranu speciálními přídavnými obvody a součástkami tak, aby případný blízký elektrostatický náboj byl spolehlivě odveden bez poškození citlivé části obvodu. Téměř všechny obvody CMOS, u nichž to funkce umožňuje mají dnes vestavěny ochranné prvky, které mají za úkol případný proud vyvolaný ESD bezpečně odvést.

### 5.3.1 Hlavní požadavky na ochranné obvody

- omezení napětí odvedením proudu vzniklého při ESD.
- rychlé sepnutí (pod 1 ns).
- velká proudová zatížitelnost, 3 A nebo více, po dobu 150 ns.
- malý odpor v sepnutém stavu.
- minimální plocha na čipu.
- malá kapacita.
- malý sériový odpor.
- malá citlivost na rozptyl výrobního procesu a teplotu.
- odolnost proti opakovaným pulzům.
- ochrana proti různým projevům ESD.
- nesmí ovlivnit správnou funkci obvodu.
- nesmí zvýšit klidový svodový proud. [10]

### 5.3.2 Základní typy ochranných obvodů

**Omezovací ochrana** (*turn-on clamp*) se chová jako Zenerova dioda. Nevýhodou je vysoký výkon (zejména pro velká pracovní napětí), vedoucí k větší velikosti ochranných prvků, které musí být schopny zpracovávat velké výkonové ztráty. Omezovací ochrana se používá hlavně pro napájecí vývody.

**Spínaná ochrana** se záporným dynamickým odporem (*snapback clamp*) pracuje takto: jestliže napětí překročí spouštěcí napětí, sníží se napětí na zařízení a obvod pracuje s velkými proudy, ale s nižším napětím (tzn. menší výkonovou ztrátu). Spínané ochrany jsou rychlé a malé, ale často nemohou být použity pro napájecí vývody (záleží na spínacím napětí). Některé typy elektromagnetického rušení mohou způsobit, že napětí na spínané ochraně překročí spouštěcí napětí. Je-li maximální napájecí napětí vyšší než přídržné napětí, mohla by ochrana zůstat aktivní s velmi velkým proudem tekoucím z napájecího zdroje do ochrany a ochranný prvek by byl zničen. [10]

## 5.4 Kombinovaná ochrana

Kombinovaná ochrana se používá tam, kde jsou zařízení extrémně citlivá tj. především ve výrobě nebo při interních opravách. Jde o kombinaci více typů ochran tak, aby se riziko poškození citlivého obvodu nebo zařízení minimalizovalo jak z hlediska prostředí, manipulace, samotné konstrukce a zapouzdrění.



## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 6 MĚŘENÍ ELEKTROSTATICKÉHO NAPĚTÍ GENEROVANÉHO POHYBEM OBSLUHY V LABORATOŘÍCH FAI UTB

### 6.1 Popis prostředí

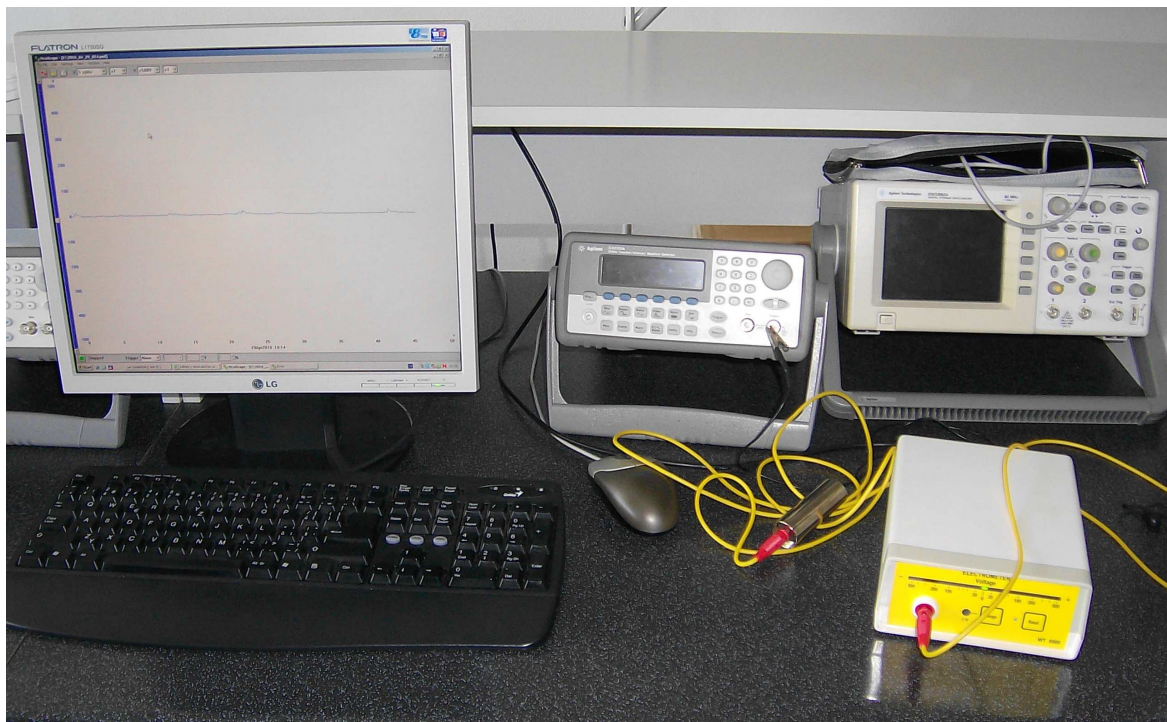
Všechna měření probíhala na FAI UTB ve Zlíně v laboratoři instrumentace a měření 304/U53. Měření byla prováděna v různou denní dobu ve 14ti náhodně vybraných dnech od 10.2.2010 do 5.5.2010. Při měřeních byla zapisována teplota v místnosti a oblečení, které jsem měl při měření na sobě. Také byly zaznamenány další stavy, které by mohly mít vliv na výsledky měření, jako např. mokrá podlaha v laboratoři.



Obr. 21 Fotky laboratoře instrumentace a měření 304/U53

## 6.2 Měřicí pracoviště

Před začátkem každého měření jsem nejdříve popsal prostředí a oblečení. Poté jsem nachystal pracoviště na měření tj. elektrometr jsem uzemnil, připojil jsem k němu měřící elektrodu, výstup z elektrometru připojil k AD převodníku (ADC-42) a ten zapojil do PC, v PC se spustil měřicí program PicoScope, měřicí program jsem nastavil podle zvoleného rozsahu elektrometru, zapnul elektrometr a začal jednotlivá měření.



Obr. 22 Připravené měřicí pracoviště v laboratoři s elektrometrem WT5000

Pozn. Hodnoty při všech měřeních mají toleranci  $< 5\%$  danou výrobcem elektrometru WT5000.

## 6.3 Měření při předem definovaných činnostech

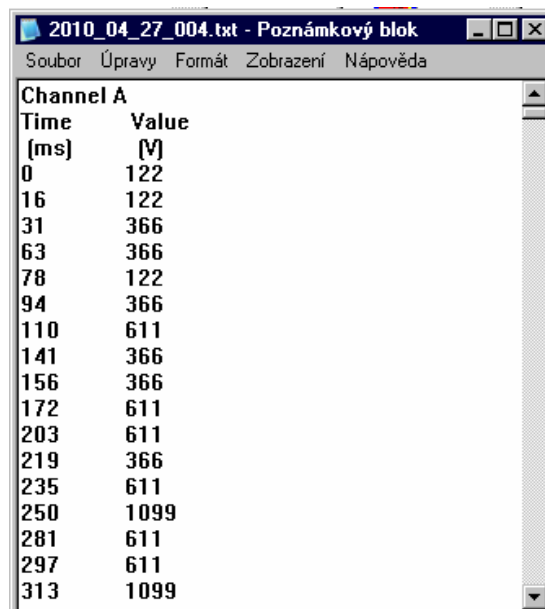
Před měřením jsem si definoval 8 základních činností, které jsou nejčastějšími pohyby v laboratoři a tyto pohyby jsem pak při každém měření opakoval, aby se výsledky z jednotlivých měření daly lépe srovnávat a případně zjistit nejrizikovější činnosti v laboratoři. Tj. ty při kterých vzniká největší elektrostatické napětí a tyto pak ošetřit např. režimovými opatřeními doplněnými k řádu laboratoří.

### 6.3.1 Nejčastější činnosti (pohyby) v laboratoři:

- pomalá chůze.
- rychlá chůze.
- posuv na židli s nohama na zemi.
- posuv na židli s nohama na židli.
- tření pohybem na židli.
- tření pohyby rukávů na stole.
- tření částí oblečení o sebe.
- přesouvání měřících přístrojů.

## 6.4 Délka měření a ukládání dat

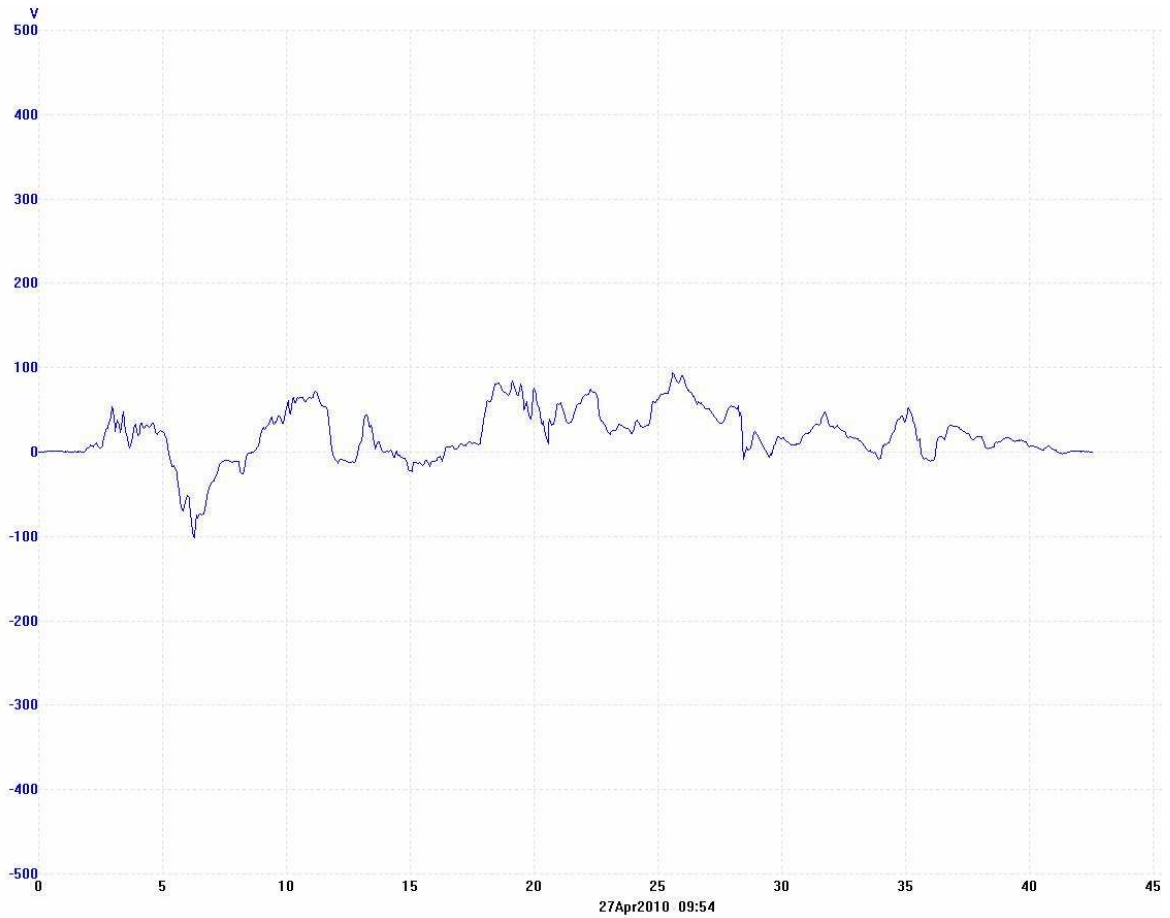
Elektrostatické napětí generováno určitým pohybem obsluhy v laboratoři jsem měřil pro každý pohyb cca 45 s. Bylo tedy zachyceno cca 2500 hodnot v textové i v grafické podobě. Všechny tyto soubory jsou uloženy a na přiloženém datovém mediu.



Time (ms)	Value (V)
0	122
16	122
31	366
63	366
78	122
94	366
110	611
141	366
156	366
172	611
203	611
219	366
235	611
250	1099
281	611
297	611
313	1099

Obr. 23 Hodnoty měření v textovém formátu

Pozn. Měřicí program ukládá do textového souboru, že hodnoty jsou ve voltech, ale ve skutečnosti jsou v mV, takže pracuji s hodnotami jako s mV.



Obr. 24 Průběh měření uložený v grafickém formátu

Tab. 4 Vzor jednoho protokolu z měření

Měření elektrostatického napětí		Datum: 21.4.10	Čas: 18:22	Teplota: 23 °C	Vlhkost: -	Popis oblečení: bavlněné kalhoty tričko s krátkým rukávem a tenisky									
Popis situace při měření	Pomalá chůze	Rychlá chůze	Posuv na židli s nohama na zemi	Posuv na židli s nohama na židli	Tření pohybem na židli	Tření pohyby rukávů na stole	Tření částí oblečení o sebe	Přesouvání měřících přístrojů							
t[ms]	U[mV]	t[ms]	U[mV]	t[ms]	U[mV]	t[ms]	U[mV]	t[ms]	U[mV]	t[ms]	U[mV]	t[ms]	U[mV]		
0	1343	0	4274	0	44567	0	-13553	0	-366	0	-3053	0	366	0	2076
16	1343	15	4029	15	44322	15	-13553	16	122	16	-2808	15	611	16	2076
32	1343	31	4274	31	45543	31	-13553	32	-122	32	-2808	31	611	32	2076
63	1587	62	4274	62	48962	62	-13553	63	366	63	-2808	62	855	63	2076
78	2320	78	4518	78	50427	78	-13553	79	366	79	-2808	78	855	79	1832
94	2808	94	4762	94	51648	93	-13309	94	366	94	-3053	93	855	94	2076
110	3297	109	5739	109	52625	109	-13553	110	122	110	-3053	109	1099	110	2076
141	4029	140	8913	140	54823	140	-13553	141	-122	141	-3297	140	1099	141	2076
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓

Pozn. Všechny tyto protokoly jsou uloženy na přiloženém datovém mediu.

## 7 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ

Celkem bylo provedeno 96 měření bez antistatických pomůcek a 96 měření s antistatickým pláštěm a botami. Zpracováno bylo tedy 12 protokolů pro měření bez antistatických pomůcek a dalších 12 protokolů pro měření s antistatickým pláštěm a botami. Z těchto měření byly vybrány maximální hodnoty elektrostatického napětí generovaného pohybem obsluhy v laboratoři a to jak pro jednotlivá měření tak i pro jednotlivé předem definované činnosti v laboratoři.

### 7.1 Hodnoty z měření bez antistatických pomůcek

Tab. 5 Minimální nebo maximální hodnoty napětí z měření bez antistatických pomůcek

Minimální nebo maximální hodnoty napětí [V] z měření												
Popis situace při měření	Čísla měření											
	č.1	č.2	č.3	č.4	č.5	č.6	č.7	č.8	č.9	č.10	č.11	č.12
Pomalá chůze	-353	-53	-34	-87	115	84	-181	497	222	79	88	27
Rychlá chůze	-488	-89	82	176	164	-117	-158	500	433	183	126	90
Posuv na židli s nohama na zemi	216	71	75	260	379	169	-315	408	485	147	176	131
Posuv na židli s nohama na židli	-138	111	234	-190	291	-83	-293	137	249	183	-170	101
Tření pohybem na židli	185	-42	199	106	-95	127	164	-163	253	85	142	42
Tření pohyby rukávů na stole	-489	8	-94	-47	-84	-209	-205	-140	-179	32	35	12
Tření částí oblečení o sebe	-256	-24	96	-175	232	111	-359	145	-86	14	-51	44
Přesouvání měřících přístrojů	-53	-35	15	-234	60	-44	-171	-90	-84	20	26	30

Tab. 6 Minimální nebo maximální hodnoty napětí pro jednotlivé činnosti bez použití antistatických pomůcek

Minimální nebo maximální hodnoty napětí [V]	
Pomalá chůze	497
Rychlá chůze	500
Posuv na židli s nohama na zemi	485
Posuv na židli s nohama na židli	-293
Tření pohybem na židli	253
Tření pohyby rukávů na stole	-489
Tření částí oblečení o sebe	-359
Přesouvání měřících přístrojů	-234

Tab. 7 Průměr z velikostí maximálních hodnot napětí pro jednotliví činnosti bez použití antistatických pomůcek

Průměr z velikostí max. hodnot napětí [V]	
Pomalá chůze	152
Rychlá chůze	217
Posuv na židli s nohama na zemi	236
Posuv na židli s nohama na židli	182
Tření pohybem na židli	134
Tření pohyby rukávů na stole	128
Tření částí oblečení o sebe	133
Přesouvání měřících přístrojů	72

Tab. 8 Průměrné velikosti z max. hodnot pro jednotlivé měření napětí bez antistatických pomůcek

Průměrné velikosti z max. hodnot měření napětí [V]	
Měření č.1	272
Měření č.2	54
Měření č.3	103
Měření č.4	159
Měření č.5	178
Měření č.6	118
Měření č.7	231
Měření č.8	260
Měření č.9	249
Měření č.10	93
Měření č.11	102
Měření č.12	60

## 7.2 Zhodnocení výsledků měření bez antistatických pomůcek

Největší průměrné velikosti maximálních hodnot z měření byly v měřeních č.1, č.8 a č.9. Při těchto měřeních jsem měl na sobě zimní boty s vysoce izolační 6,5 cm vysokou platformou. Tudíž tyto boty fungovaly jako pravý opak vodivé antistatické obuvi použité v další sérii měření. Přesto však nepřekročili maximální hodnoty při měřeních hodnotu 500 V s výjimkou při měření č.8, kde jsem se při pohybu po laboratoři dotkl nabitého kolegy a napětí krátce vyskočilo nad 500 V, tuto nahodilou situaci se už později nepovedlo replikovat.



Z hlediska předem definovaných činností v laboratoři jsou nejmenší napětí skutečně generované při činnostech s nejmenším pohybem:

- přesouvání měřících přístrojů.
- tření pohyby rukávů na stole.
- tření částí oblečení o sebe.
- tření pohybem na židli.

Nejvíce rizikové činnosti (pohyby) v laboratoři jsou posuv na židli s nohama na zemi a rychlá chůze, kde napětí bývá nejvyšší – v průměru z velikostí maximálních hodnot je to 236 V pro posuv na židli s nohama na zemi a 217 V rychlou chůzi.

### 7.3 Hodnoty z měření s použitím antistatických pomůcek

Tab. 9 Minimální nebo maximální hodnoty napětí z měření s antistatickými pomůckami

Minimální nebo maximální hodnoty napětí [V] z měření												
Popis situace při měření	Čísla měření											
	č.1	č.2	č.3	č.4	č.5	č.6	č.7	č.8	č.9	č.10	č.11	č.12
Pomalá chůze	26	21	12	24	20	8	20	20	30	17	21	17
Rychlá chůze	35	45	45	42	68	27	44	26	-38	30	38	40
Posuv na židli s nohama na zemi	69	85	106	81	97	59	70	77	68	49	63	82
Posuv na židli s nohama na židli	92	93	67	66	67	32	75	44	56	87	84	-99
Tření pohybem na židli	49	26	-40	23	42	30	31	30	27	28	50	35
Tření pohyby rukávů na stole	31	59	-30	22	15	29	23	31	25	20	52	32
Tření částí oblečení o sebe	18	18	-13	37	44	41	21	39	14	55	53	23
Přesouvání měřících přístrojů	11	8	27	8	15	25	16	13	17	29	23	16



Tab. 10 Minimální nebo maximální hodnoty napětí pro jednotlivé činnosti s použitím antistatických pomůcek

Minimální nebo maximální hodnoty napětí [V]	
Pomalá chůze	30
Rychlá chůze	68
Posuv na židli s nohama na zemi	106
Posuv na židli s nohama na židli	93
Tření pohybem na židli	50
Tření pohyby rukávů na stole	59
Tření částí oblečení o sebe	55
Přesouvání měřících přístrojů	29

Tab. 11 Průměr z velikostí maximálních hodnot napětí pro jednotlivé činnosti s použitím antistatických pomůcek

Průměr z velikostí max. hodnot napětí [V]	
Pomalá chůze	20
Rychlá chůze	40
Posuv na židli s nohama na zemi	75
Posuv na židli s nohama na židli	72
Tření pohybem na židli	34
Tření pohyby rukávů na stole	31
Tření částí oblečení o sebe	31
Přesouvání měřících přístrojů	17

Tab. 12 Průměrné velikosti z max. hodnot pro jednotlivé měření napětí s antistatickými pomůckami

Průměrné velikosti z max. hodnot měření napětí [V]	
Měření č.1	41
Měření č.2	44
Měření č.3	42
Měření č.4	38
Měření č.5	46
Měření č.6	31
Měření č.7	37
Měření č.8	35
Měření č.9	34
Měření č.10	39
Měření č.11	48
Měření č.12	43

#### 7.4 Zhodnocení výsledků měření při použití antistatického pláště a bot

Při těchto měřeních jsou největší průměrné velikosti maximálních hodnot z jednotlivých měření téměř shodné a pohybují se mezi 30 až 50 V, což je velký rozdíl oproti hodnotám 54 až 272 V z měření bez antistatických pomůcek.

Maximální hodnoty napětí z pohledu předem definovaných činností s antistatickými pomůckami byly zjištěny při posuvech na židli ( posuv na židli s nohama na zemi 106 V a posuv na židli s nohama na židli 93 V). Nejvíce rizikové činnosti (pohyby) v laboratoři s antistatickými pomůckami jsou tedy posuvy na židli. Sezení na židli totiž zmenšuje účinnost antistatických bot. Antistatické boty tedy odvádí elektrostatický náboj rychleji do země, hodí se tedy především pro minimalizaci napětí při chůzi a jiném podobném pohybu. Antistatický plášť se naopak hodí při manipulaci na pracovišti, protože účinně rozptyluje elektrostatický náboj.

Z hlediska předem definovaných činností v laboratoři jsou nejmenší napětí generované u přesouvání měřících přístrojů a pomalé chůzi. Přesouvání přístrojů totiž není dostatečný pohyb, aby elektrostatické napětí dosáhlo vysoké hodnoty, navíc zde pomáhá antistatický plášť, kterým se často přístrojů při přesouvání dotýkáme a náboj z jejich povrchu tedy odvádíme pryč. Při pomalé chůzi stačí antistatické boty dostatečně rychle odvádět vznikající náboj a tudíž napětí při tomto měření nepřekročilo ani hodnotu 30 V.

## ZÁVĚR

Cílem mé bakalářské práce bylo přiblížit čtenářům problematiku elektrostatiky a ochrany před škodlivým působením elektrostatického náboje na elektroniku, měřicí a výpočetní techniku. Popsal jsem základní způsoby ochrany na laboratorním pracovišti před vznikem vysokého elektrostatického napětí, které by mohlo poškodit zařízení v laboratoři.

Provedl jsem sérii celkem 192 měření elektrostatického napětí generovaného pohybem obsluhy v laboratoři a srovnal výsledky se situací, kde byly použity antistatické ochranné pomůcky (antistatický plášť a boty). Výsledky jsem zpracoval ve 24 protokolech, které jsou uloženy na přiloženém datovém médiu.

Použité antistatické ochranné pomůcky značně redukuje elektrostatické napětí vznikající pohybem až na hodnoty pod 50V což je bezpečné pro běžnou práci v laboratoři. Při měřeních bez antistatických pomůcek jsem nedosáhl napětí, které by bylo větší než 1 kV, největší napětí, kterých se dosáhlo byla kolem 500 V.

Zjistil jsem nejrizikovější pohyby v laboratoři a ty jsou rychlá chůze a posuv na židli, nejméně rizikové je přesouvání měřících přístrojů po pracovišti.

Pro běžnou činnost studentů v laboratoři s výpočetní technikou a měřicí technikou jako osciloskopy a generátory se použití antistatických pomůcek hodí pouze při manipulaci se součástkami případně při manipulaci s vnitřním hardware výpočetní nebo měřicí techniky. Pro ostatní činnosti je dostatečná ochrana konstrukčním provedením výpočetní techniky a měřících přístrojů – např. konektory k osciloskopu mají uzemnění kolem signálového vodiče, tudíž je nepravděpodobné, že by se napětí z obsluhy dostalo na signálovou část.

Uvažovat o nějakých dalších opatřeních v laboratoři by bylo vhodné až v případě, že by se skutečně nějaký přístroj poškodil právě elektrostatickým napětím z obsluhy.

## ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The aim on my bachelors work was to enlighten the readers in the problems of electrostatics and protection of electronics, measuring and computing equipment against harmful electrostatic charge.

I've described the basic means of protecting laboratory workplace against the rise of high electrostatic potential, which could harm the equipment in the laboratory.

I've conducted a series of total 192 measurements of electrostatic potential generated by the movement of laboratory personnel and compared the results with the situation where I used antistatic protection utilities (antistatic coat and boots). I processed the results in 24 measuring protocols, which are stored on the included data media.

The used antistatic protection utilities considerably decrease the electrostatic potential generated by movement to a value below 50 V and that is safe for normal work in the laboratory. In the measurements without antistatic protection the voltage didn't exceed at any point the mark of 1 kV, the highest voltage that were recorded were about 500 V.

I concluded that the most hazardous movements in the laboratory were fast walking and moving around on the chair and the least hazardous movement is the moving of measuring instruments on the workplace.

For the common activity of students in the laboratory with computing and measuring equipment such as oscilloscopes and generators is the use of antistatic protection clothing only necessary when manipulating with integrated circuits or transistors or when working with the internal hardware of computing or measuring equipment. For other activities the protection that is placed there by the manufacturer of this equipment is enough for example - the connectors to an oscilloscope have the grounding all around the signal wire, therefore it is not likely that the voltage from the operating personnel will get to the signal part.

To reason about some other preemptive actions in the laboratory would be fit only after at least one expensive measuring instrument was damaged by exactly the electrostatic charge from the attending personnel.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] SVAČINA, Jiří. *Elektromagnetická kompatibilita : Principy a metody*. Vyd. 1. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2001.156 s. ISBN 80-214-1873-7.
- [2] KVASNICA, Josef. *Teorie elektromagnetického pole*. Vyd. 1. Praha : Academia, 1985. 450 s.
- [3] SEDLÁK, Bedřich; ŠTOLL, Ivan. *Elektřina a magnetismus*. Praha : Academia, 1993. 632 s. ISBN 80-200-0172-7.
- [4] MYSLÍK, Jiří. *Elektromagnetické pole : základy teorie*. 1.vydání. Praha : Nakladatelství BEN, 1998. 159 s. ISBN 80-86056-43-0.
- [5] Maxwellovy rovnice In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, , 23. 2. 2010 [cit. 2010-03-26]. Dostupné z WWW: <[http://cs.wikipedia.org/wiki/Maxwellovy\\_rovnice](http://cs.wikipedia.org/wiki/Maxwellovy_rovnice)>.
- [6] BEATY, William. *Build this simple \"electronic electroscopes,\" a FET electrometer* [online]. c1987, May 16, 2005 [cit. 2010-03-28]. RIDICULOUSLY SENSITIVE ELECTRIC CHARGE DETECTOR. Dostupné z WWW: <<http://www.eskimo.com/~billb/emotor/chargdet.html>>.
- [7] WARMBIER, Wolfgang. *User's Manual Walking Test Kit 7100.WT5000*. June 2005. Hilzingen/Germany : [s.n.], 2005. 7 s.
- [8] RYNE, Allen. *Esdsystems* [online]. 1998 [cit. 2010-04-11]. Humidity and ESD Control. Dostupné z WWW: <[http://www.esdsystems.com/whitepapers/wp\\_humidity.html](http://www.esdsystems.com/whitepapers/wp_humidity.html)>.
- [9] Rychlé a spolehlivé odstranění elektrostatického náboje. *Automa : časopis pro automatizační techniku* [online]. 2007, 1, [cit. 2010-05-06]. Dostupný z WWW: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=34320](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=34320)>.
- [10] HORSKÝ, Pavel. Elektrostatický výboj a jeho vliv na spolehlivost integrovaných obvodů (2. část) : 5. Základní principy ochrany. *Automa : časopis pro automatizační techniku* [online]. 2009, 12, [cit. 2010-05-06]. Dostupný z WWW: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=40177](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=40177)>.

**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

EMC	Elektromagnetická kompatibilita
EMI	Elektromagnetická interference
EMS	Elektromagnetická susceptibilita
NF	Nízkofrekvenční
VF	Vysokofrekvenční
FET	Tranzistor řízený polem
LED	Světlo vyzařující dioda
AD	Analogově-digitální
FAI	Fakulta aplikované informatiky
UTB	Univerzita Tomáše Bati
ESD	Elektrostatický výboj
RH	Relativní vlhkost
CMOS	Technologie Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
PVC	Polyvinylchlorid
DIN	Německá průmyslová norma
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik e.V.
PU	Polyuretan
PUR	Polyuretan
PET	Polyetylen

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1 Základní řetězec EMC .....	12
Obr. 2 Základní členění problematiky EMC.....	13
Obr. 3 Klasifikace interferenčních signálů .....	14
Obr. 4 Ekvipotenciální plochy homogenního a radiálního pole .....	18
Obr. 5 Siločáry (tučně), kolmé na ekvipotenciální plochy homogenního a radiálního pole .....	18
Obr. 6 Vodič v elektrostatickém poli.....	19
Obr. 7 Schéma deskového kondenzátoru.....	20
Obr. 8 Primitivní elektroskop .....	24
Obr. 9 Schéma zapojení jednoduchého elektroskopu s FET tranzistorem .....	25
Obr. 10 Realizace elektroskopu na konektoru k 9V baterii [6] .....	26
Obr. 11 Schéma jednoduchého elektrometru.....	26
Obr. 12 Parametry elektrometru WT5000 [7].....	27
Obr. 13 Měřicí elektoda .....	28
Obr. 14 Vzhled elektrometru WT5000 [7] .....	28
Obr. 15 Závislost napětí ESD na relativní vlhkosti pro různé textilní materiály [1] .....	32
Obr. 16 Vznik lokálního elektrostatického výboje [1].....	33
Obr. 17 Působení ESD na elektronické součástky a obvody: a) přímé působení (vybití); b) působení indukcí [1].....	34
Obr. 18 PU židle z laboratoří UTB .....	36
Obr. 19 Kovový zemnicí náramek .....	37
Obr. 20 Uzemňovací pásy na obyčejné boty.....	37
Obr. 21 Fotky laboratoře instrumentace a měření 304/U53.....	42
Obr. 22 Připravené měřicí pracoviště v laboratoři s elektrometrem WT5000.....	43
Obr. 23 Hodnoty měření v textovém formátu.....	44
Obr. 24 Průběh měření uložený v grafickém formátu.....	45

**SEZNAM TABULEK**

Tab. 1 Příklady ze základního řetězce EMC.....	13
Tab. 2 Fyzikální proměnné použité v Maxwellových rovnicích [5].....	22
Tab. 3 Triboelektrické nabíjení a relativní vlhkost [8] .....	32
Tab. 4 Vzor jednoho protokolu z měření.....	45
Tab. 5 Minimální nebo maximální hodnoty napětí z měření bez antistatických pomůcek .....	46
Tab. 6 Minimální nebo maximální hodnoty napětí pro jednotlivé činnosti bez použití antistatických pomůcek .....	46
Tab. 7 Průměr z velikostí maximálních hodnot napětí pro jednotlivé činnosti bez použití antistatických pomůcek .....	47
Tab. 8 Průměrné velikosti z max. hodnot pro jednotlivé měření napětí bez antistatických pomůcek .....	47
Tab. 9 Minimální nebo maximální hodnoty napětí z měření s antistatickými pomůckami .....	48
Tab. 10 Minimální nebo maximální hodnoty napětí pro jednotlivé činnosti s použitím antistatických pomůcek .....	49
Tab. 11 Průměr z velikostí maximálních hodnot napětí pro jednotlivé činnosti s použitím antistatických pomůcek .....	49
Tab. 12 Průměrné velikosti z max. hodnot pro jednotlivé měření napětí s antistatickými pomůckami.....	49



## SEZNAM PŘÍLOH