

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Testování citlivosti elektronických součástek
na elektrostatické jevy v laboratorních podmínkách**

**vedoucí práce: Ing. Milan Šíma
autor: Jiří Vrána**

2012

Anotace

Hlavním cílem této práce je navrhnout a realizovat měřicí přípravek, na kterém bude možné demonstrovat vybrané testovací metody odolnosti proti elektrostatickým jevům. Dalším důležitým bodem této práce je soubor laboratorních úloh, v nichž studenti budou měřit parametry součástek, které se vlivem těchto jevů mění.

Práce nejprve poukazuje na to, že elektrostatické výboje nejsou pouhý fakt, ale je to problém, který musíme respektovat a akceptovat. Dále se práce zaměřuje na teoretický rozbor parametrů testování, testovacích modelů a jejich budoucnosti. Na závěr již zmiňovaný měřicí přípravek a laboratorní úloha, která byla cílem této práce.

Klíčová slova

elektrostatický výboj (ESD), model lidského tělo (HBM), model nabitě součástky (CDM), strojní model (MM), součástka citlivá na elektrostatický výboj, triboelektrické nabíjení, latentní porucha, katastrofální porucha, zkoušená jednotka (UUT), selhání zkoušené jednotky (UUT failure),

Abstract

Main aim these work is to design and realize measurement device on which to demonstrate selected test methods for resistance to electrostatic phenomena. Another important point of this work is a set of laboratory exercises in which students will measure the parameters of the components that influence these phenomena change.

First point of this thesis is that electrostatic discharge is not pure fact, but it's a problem that we must respect and accept. The thesis is focuses on the theoretical analysis of parameters tested, test models and their future. At the conclusion of the above mentioned measurement device and measuring laboratory exercises that was the goal of this work.

Key words

Electrostatic discharge (ESD), Human Body Model (HBM), Charged Device Model (CDM), Machine Model (MM), Electrostatic Discharge Sensitive Device (ESDS), triboelectric charge, latent defect, catastrophic defect, unit under test (UUT), UUT failure,

Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne: 10.5.2012

Jiří Vrána

.....

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce panu Ing. Milanu Šímovi za metodické vedení práce a poskytnutí kvalitních materiálů.

Dále bych rád poděkoval panu Ing. Tomáši Blechovi, Ph.D. za ochotu, výdrž, vstřícnost a cenná doporučení při realizaci praktické části diplomové práce.

Obsah

1	ÚVOD	1
2	ELEKTROSTATICKÝ VÝBOJ	2
2.1	MATERIÁLY A ELEKTROSTATICKÝ VÝBOJ	3
2.2	VZNIK ELEKTROSTATICKÉHO VÝBOJE	4
2.3	TYPY PORUCH ELEKTRONICKÝCH SOUČÁSTEK VLIVEM ESD	7
2.3.1	Roztavení vodivých spojů nebo rezistorů	8
2.3.2	Poškození polovodičových přechodů nebo kontaktů	9
2.3.3	Průraz dielektrika	10
2.4	ZÁKLADNÍ PRINCIPY OCHRANY	10
3	KLASIFIKACE ODOLNOSTI ELEKTRONICKÝCH SOUČÁSTEK	11
3.1	HBM – HUMAN BODY MODEL	12
3.1.1	Termíny a definice.....	13
3.1.2	Přístroje	13
3.1.3	Požadavky na přístroje.....	14
3.1.4	Požadavky na průběh proudu HBM.....	15
3.1.5	Hodnocení odolnosti zkoušených jednotek (UUT) proti ESD	17
3.2	CDM – CHARGED DEVICE MODEL.....	19
3.2.1	Termíny a definice.....	20
3.2.2	Přímé kontaktní nabití.....	21
3.2.3	Nepřímé nabití	21
3.3	MM – MACHINE MODEL	24
3.3.1	Termíny a definice.....	26
3.3.2	Požadavky na průběh proudu MM.....	26
3.3.3	Hodnocení odolnosti zkoušených jednotek (UUT) proti ESD	28
3.3.4	Zkušební postup	29
4	FAKTA A SROVNÁNÍ TESTOVACÍCH MODELŮ – MM, HBM A CDM	30
4.1	AKTUÁLNĚ	30
4.2	MM vs. HBM A CDM.....	32
4.3	SHRNUTÍ.....	33
5	MĚŘICÍ PŘÍPRAVEK	34
5.1	TEORETICKÝ ROZBOR	34
5.2	PRINCIP FUNKCE	35
5.3	PULZY PŘIVÁDĚNÉ NA UUT.....	35
5.4	POUŽITÉ SOUČÁSTKY	38
5.5	NÁVRH.....	39
5.5.1	Schéma zapojení.....	39
5.5.2	Desky plošných spojů.....	40
5.5.3	Shrnutí.....	41

6	LABORATORNÍ ÚLOHA	42
6.1	TEORETICKÝ ROZBOR	42
6.2	SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	43
6.3	TESTOVANÉ SOUČÁSTKY	44
6.4	POUŽITÉ PŘÍSTROJE K MĚŘENÍ.....	45
6.5	POSTUP MĚŘENÍ	47
6.6	VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	48
6.6.1	<i>Měření citlivosti bipolárního tranzistoru BF 199 na ESD HBM</i>	48
6.6.2	<i>Měření citlivosti unipolárního tranzistoru BS 170 na ESD HBM</i>	50
6.7	ZHODNOCENÍ.....	55
7	ZÁVĚR	57
8	POUŽITÁ LITERATURA	59
9	SEZNAM PŘÍLOH	61

Seznam použitých symbolů a zkratk

Q	[C]	náboj
C	[F]	kapacita
U	[V]	napětí
W	[J]	energie
ESD	Elektrostatic discharge	elektrostatický výboj
RV	[%]	relativní vlhkost
ESDS	Elektrostatic discharge sensitive	citlivý na elektrostatický výboj
IO		integrováný obvod
HBM	Human body model	model lidského těla
MM	Machine model	model strojního zařízení
CDM	Charged device model	model nabíjené součástky

1 Úvod

Rozvoj elektroniky a výpočetní techniky v posledních desetiletích je umožněn pokroky v oblasti integrovaných obvodů. Moderním trendem je součástky a zařízení neustále zmenšovat a tím soustředit více elektronických prvků na menší plochy. Stálému zmenšování je v literatuře věnována značná pozornost. Nicméně je mezi technickou veřejností málo známo, že je nutné již při návrhu integrovaných obvodů dbát na jejich odolnost vůči vlivu statické elektřiny.

Při neustálém zdokonalování integrovaných obvodů jsou tyto obvody náchylnější na tento druh rušení. A proto, abychom dosáhli co největší spolehlivosti, je nutné porozumět tomu, proč toto rušení vzniká, jak je možné vznik omezit či jak tento rušivý jev odstranit, nebo zabránit jeho působení. V dnešní době jsou některé z těchto náležitostí normovány a jsou přísně dodržovány.

Již z historie jsou dochované záznamy o tom, že se člověk snažil před těmito jevy chránit.

- *Ze 14. století jsou dochovány záznamy o použití ochranných prostředků k ochraně skladu černého střelného prachu v evropských a karibských námořních pevnostech.*
- *V roce 1860 papírny v USA používaly zemnění, ionizaci pomocí plamene a parní válečky k rozptýlení statického náboje vznikajícího při průchodu pásu papíru sušícím procesem.*

Člověk cítí výboj od 2000 V až 4000 V. U citlivých elektronických součástek může mnohokrát menší napětí tyto součástky poškodit nebo úplně zničit. V minulosti, kdy se často používali součástky diskrétní, nebyl tento problém natolik známý, jelikož některé součástky snesly přepětí až několik kV. Ale vlivem neustálého vývoje dochází ke zvyšování hustoty integrace (několik miliónů součástek na chipu) a součástky jsou poškozeny napětím již od několika voltů. Tyto součástky jsou v normách přesně definovány a to jako **ESDS** (*Electrostatic Discharge Sensitive Device – součástka citlivá na elektrostatický výboj*). Dalším nepříznivým faktorem je rychlost odezvy součástek. Čím rychlejší odezva, tím větší reakce na krátké rušivé signály. Takže daň placená za technický pokrok je neustálé zvyšování citlivosti součástek na elektrostatické výboje.

2 Elektrostatický výboj

Nejprve je důležité si uvědomit, co je to vůbec statická elektřina. Statická elektřina je definovaná jako elektrický výboj způsobený nerovnováhou elektronů na povrchu materiálu, vytvářející měřitelné elektrické pole, které působí na objekty v jeho blízkosti. Jedním z takovýchto zdrojů statické elektřiny je blesk. Patří mezi zdroje přírodní a je vůbec nejsilnějším přírodním výbojem. Ale tímto přírodním zdrojem rušení se tato diplomová práce zabývat nebude. Existují tzv. umělé zdroje přepětí. Jsou to prakticky všechna spínací zařízení, kde velikost rušivého napětí závisí na velikosti spínaného proudu a napětí. Samozřejmě závisí i na kvalitě konstrukce spínače. Nicméně tato práce se bude zabývat jiným umělým zdrojem rušení a to **lokálním elektrostatickým výbojem** (ESD – *Electrostatic Discharge*), jehož působení na integrované obvody nelze již v současné době opomenout. [1]



S vlivem ESD je nutné počítat téměř všude. Hlavně tam, kde se vyskytuje třecí pohyb částic a to ať se jedná o částice kovové, dielektrické či plynné. V tomto případě se jedná o tzv. **triboelektrické nabíjení**. Ačkoliv energie těchto výbojů je velmi malá, většinou menší než 10 mJ, jejich napěťová úroveň dosahuje až desítek kV. To je velmi nebezpečné pro citlivé elektronické součástky integrovaných obvodů pracujících s velmi nízkými proudy a mají vysoké pracovní odpory. Často se jedná o součástky CMOS.

Jedním z nejpravděpodobnějších vzniků elektrostatického výboje je vznik výboje na osobách při jejich chůzi a to díky tření oděvu, nebo když je elektrická součástka vkládána či vyjímána z obalu, či v případě součástky pohybující se v zásobníku osazovacího stroje apod.

Velikost náboje závisí na níže uvedených parametrech:

- Velikost plochy kontaktu materiálů
- Rychlost oddělení
- Relativní vlhkost okolního vzduchu (s větší relativní vlhkostí se podstatně snižuje velikost generovaného náboje).
- Druh materiálu a to podle velikosti a polaritý náboje vytvořeného při jejich kontaktu a oddělení. Materiály dál od sebe v tab. 2.1 generují větší náboj, než ty sousedící.

Tab. 2.1 Triboelektrická řada [2]

Králičí srst, lidské tělo Sklo Slída Lidské vlasy Nylon Vlna Kožešina Olovo Hedvábí Hliník Papír BAVLNA	
Ocel Dřevo Tvrdá guma Nikl, měď, mosaz, stříbro Zlato, platina Acetátová vlákna (umělé hedvábí) Polyester Filmový pás Silikon Teflon	

2.1 Materiály a elektrostatický výboj

Pokud materiál obsahuje elektrický náboj, říká se, že je elektrostaticky nabitý. Z hlediska času se nabití materiálu bude zmenšovat. Jak rychle, tak to záleží na odporu materiálu. Existují dva případy a to plast a kov. Jelikož jsou plastické nebo syntetické materiály charakterizovány velmi vysokým odporem, vykazují delší elektrostatické nabití nežli kov, jelikož kov má nižší odpor.

Z detailnějšího hlediska to znamená, že plast, jakožto izolační materiál, zabraňuje či značně omezuje tok elektronů po jeho povrchu nebo objemu. Což má za následek, že se záporný nebo kladný náboj udrží v materiálu delší dobu. [2]

U kovu neboli elektrostaticky vodivého materiálu je to naopak. Elektrony se v materiálu snadno pohybují, materiál má nízký elektrický odpor a náboj se rovnoměrně rozloží po celém jeho povrchu. Tudíž se náboj snadno přenesse na jiný vodič, a pokud je uzemněn, elektrostatický materiál neutralizuje. [2]

Dalším typem materiálu je materiál, který se svým elektrickým odporem nachází mezi vodivými a izolačními materiály. Jsou to materiály tzv. elektrostaticky ztrátové – disipativní materiály. Přenos náboje je tedy mnohem rychlejší než u izolantů, ale mnohem pomalejší než u vodičů. [2]

Na obr. 2.1 je vidět výše uvedené rozdělení materiálů podle povrchové rezistivity.

VODIVÉ	DISIPATIVNÍ	IZOLAČNÍ
$< 1.10^5 \Omega$	$\geq 1.10^5 \Omega$ a $< 1.10^{11} \Omega$	$\geq 1.10^{11} \Omega$

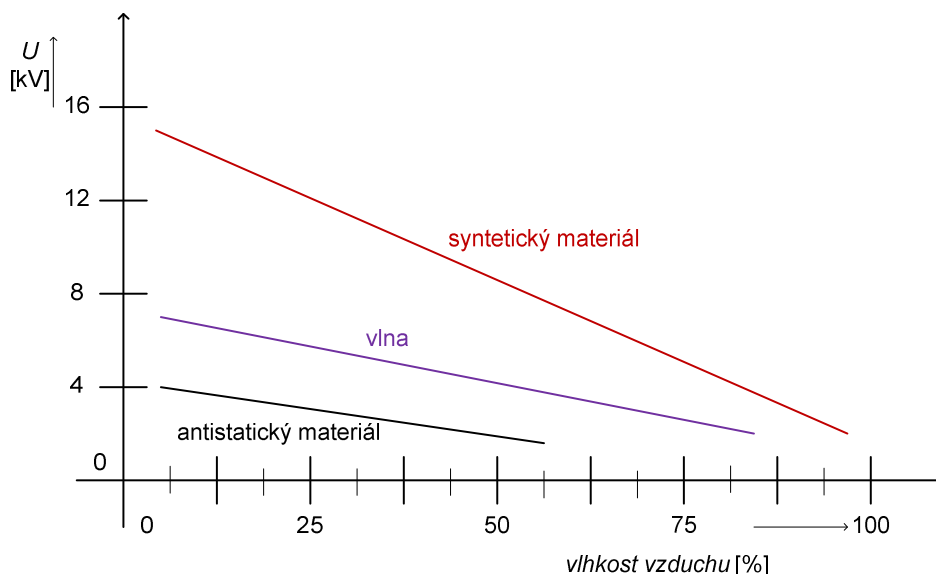
Obr. 2.1 Rozdělení materiálu podle velikosti povrchové rezistivity. [4]

2.2 Vznik elektrostatického výboje

Jak již bylo uvedeno výše, tak k nejčastějšímu vzniku ESD dochází třením ploch různého materiálu a to zejména oděvu člověka.

Při tření dvou materiálů dochází k tzv. přecházení povrchových elektronů. Jelikož atomy dvou materiálů se k sobě velmi přibližují, dochází k tomu, že elektrony přecházejí z jednoho materiálu do druhého. Jakým směrem se elektrony pohybují, závisí na triboelektrické řadě (viz. tab. 2.1). Materiál, který se nachází na kladné straně, bude odevzdávat své elektrony, tudíž se bude nabíjet kladně. Materiál na záporné straně bude chtít tyto elektrony získat, tudíž se bude nabíjet záporně. Čím více oba materiály třou, tím vzniká větší náboj. Dokonce čím rychleji se třou, tím vzniká větší náboj a to z důvodu, že pokud se materiály třou rychle, vzniká tepelná energie, kterou elektrony získávají navíc.

Osoba tak může v běžné chůzi dosáhnout napětí proti zemi 5 – 15 kV. Ovšem taková velikost napětí je možná v ideálních případech s vlhkostí téměř 0%, což je extrémní případ. V předchozí kapitole bylo řečeno, že záleží na parametrech materiálů, ale záleží i na dalších okolnostech a to zejména na vlhkosti daného prostředí. Problém působí nízká vlhkost vzduchu, neboť při nízkých hodnotách vlhkosti vzduchu jsou mnohem příznivější podmínky pro vznik ESD, a proto je potřeba zavádět regulace vlhkosti a klimatizace nejen z důvodu regulace teploty, která je příjemná pro člověka, ale i z důvodu snižování pravděpodobnosti vzniku ESD či jeho omezení na nižší napětí. Na obr. 2.2 je uvedena závislost velikosti napětí elektrostatického výboje a vlhkosti vzduchu na použitém materiálu, který elektrostatický výboj vytváří. [1]



Obr. 2.2 Závislost napětí elektrostatického výboje na relativní vlhkosti vzduchu pro různé textilní materiály [1]

Zvláště v zimních měsících, kdy vlhkost vzduchu dosahuje jen malých hodnot, může v extrémním případě napětí dosahovat hodnot až 15 kV. Následující tab. 2.2 ukazuje další příklady vzniku ESD podle druhu materiálu či situace v závislosti na vlhkosti vzduchu.

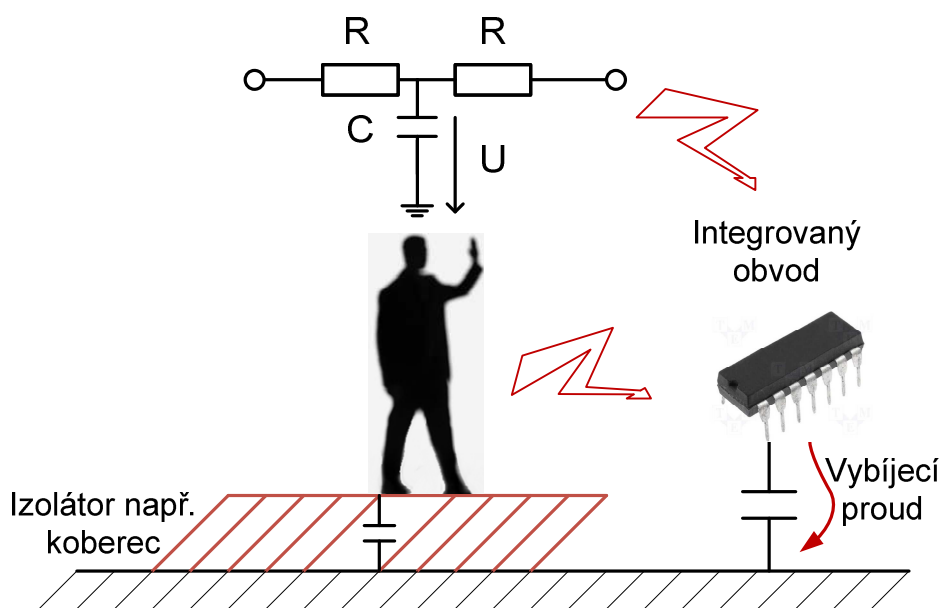
Tab. 2.2 Elektrostatické napětí jako funkce relativní vlhkosti. [3]

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

Dalším typem vzniku ESD je tzv. separací. Tento typ je velice podobný tření. Když se dva materiály setkají, opět se povrchové elektrony nacházejí blízko sebe, přičemž projevují tendenci přilnout k jednomu nebo druhému materiálu. Velikost rušivého napětí závisí opět na poloze materiálu v triboelektrické řadě.

Možným typem je i bombardováním ionty, tzv. ionizace, která se používá i jako neutralizace elektrostatického napětí. V neposlední řadě je to také kontakt s jiným nabitým tělesem, což je opět jiná forma tření.

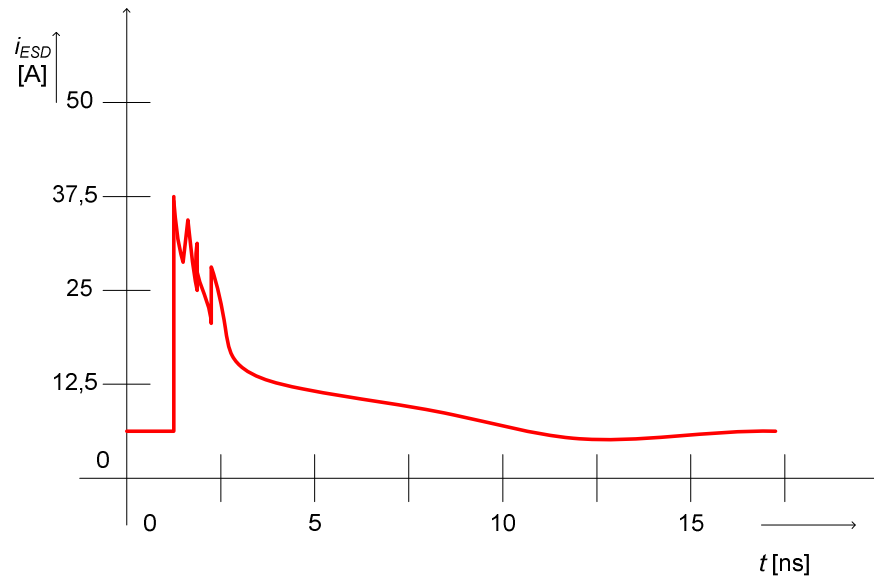
Na obr. 2.3 je uveden demonstrativní příklad pracovníka pohybujícího se po laboratoři, která nemá uzemněný povrch, po kterém se pracovník pohybuje, jedná se o koberec ze syntetického vlákna. Při pohybu pracovníka dochází ke tření jeho oděvu, který se tře sám o sebe a navíc ke tření bot o koberec. Vzniká elektrostatické napětí, které s každým dalším krokem pracovníka narůstá, někdy až do extrémních hodnot kolem 15 kV. Jelikož lidské tělo je ekvivalentní kondenzátor o velikosti cca 100 – 200 pF, snadno si udrží náboj. Potom, co se dotkne pracovník integrovaného obvodu, dojde k vybití náboje. Náboj se vybije přes paži pracovníka. Vybíjecí odpor paže člověka je 100 Ω – 2 kΩ. Samostatný výboj o napětí 15 kV má sice malou energii (viz. rovnice 2.1), ale impuls vybíjecího proudu, který je vidět na obr. 2.4, dosahuje nebezpečných hodnot proudu a jeho časový průběh je velice rychlý. Jak je vidět na časovém průběhu, tak proudový impuls v řádově několika ns dosáhne velikosti jednotek až desítek A. Následně proud klesá po dobu desítek ns. Tento proud již dokáže ovlivnit funkci a životnost elektronického zařízení, nebo jeho součástí.



Obr. 2.3 Vznik ESD třením

$$W = \frac{1}{2} \cdot CU^2 = \frac{1}{2} \cdot (100 \div 200) \cdot 10^{-12} \cdot (15 \cdot 10^3)^2 \approx 10 \div 20 \text{ mJ} \quad (2.1)$$

Pokud impuls neovlivní součástky přímo, může jej ovlivnit magnetickým nebo elektrickým polem. A to tím způsobem, že proudový impuls protéká krytem přístroje a pomocí induktivní vazby se do plošných spojů indukuje rušivé napětí, které může mít za následek poškození funkce přístroje.



Obr. 2.4 Časový průběh vybíjecího proudového pulsu [1]

2.3 Typy poruch elektronických součástek vlivem ESD

Vlivem ESD může docházet k několika druhům poruch integrovaného obvodu (dále IO). Jedním z nejběžnějších typů vad je tzv. zvětšený zbytkový proud (z anglického slova leakage) nebo zkrat odporového charakteru, což znamená zkrat mezi vývody (piny) integrovaného obvodu. Dalším poškozením může být např. nadměrný napájecí proud, vadná funkce IO, částečné omezení funkce, odpojené některé vývody apod. Rozeznat typy těchto poruch je velice obtížné, obzvlášť jedná-li se o poruchu, kterou nemůžeme identifikovat měřením voltampérových charakteristik jednotlivých vývodů. Typický příklad je vidět na obr. 2.5, kde je vidět reálné poškození vnitřní struktury integrovaného obvodu. Výše uvedené poruchy se řadí dvou hlavních skupin: [3]

- **Katastrofické / totální** – to jsou takové poruchy, které zapříčiní to, že obvod nebo celá sestava neprojde z výroby. Jinými slovy, porucha byla odhalena.
- **Latentní / potencionální** – tzn. částečná degradace součástky, která sice neovlivňuje funkci během testování, ale je snížena její odolnost proti dalšímu ESD, tudíž i její životnost a spolehlivost. [2] Tyto poruchy se neobjeví ve výrobě, ale mohou se objevit až při používání konkrétního přístroje. Tudíž předcházet těmto poruchám je v dnešní době velice důležité.

Další rozdělení poruch je podle typu poškození:

- Roztavení vodivých spojů nebo rezistorů
- Poškození polovodičových přechodů nebo kontaktů
- Poškození dielektrické izolace



Obr. 2.5 Porucha struktury integrovaného obvodu vlivem ESD [5]

2.3.1 Roztavení vodivých spojů nebo rezistorů

Princip tohoto druhu poškození je velice jednoduchý. K roztavení vodičů nebo rezistorů dochází u tenkých spojů, tenkovrstvých rezistorů, tlustovrstvých rezistorů a křemíkových polykrystalických rezistorů nebo spojů. Podstata je jednoznačná - vlivem průchodu velkého proudu, který vznikl vlivem ESD, se tyto spoje nebo rezistory působením Jouelova tepla ohřívají. Jakmile je překročena teplota tavení křemíku nebo vodiče, dochází k nevratnému poškození. V některých případech je velice obtížné určit poškození, jelikož může být uvnitř IO, a kde se toto poškození nachází, je pomocí měření charakteristik zcela nemožné zjistit. Jediným zdárným způsobem je vyměnit celý IO. Obr. 2.6 ukazuje úzký kovový spoj, který byl přerušen vlivem nadměrného proudu.



Obr. 2.6 Přerušený vodivý spoj – roztavením kovového vodiče [6]

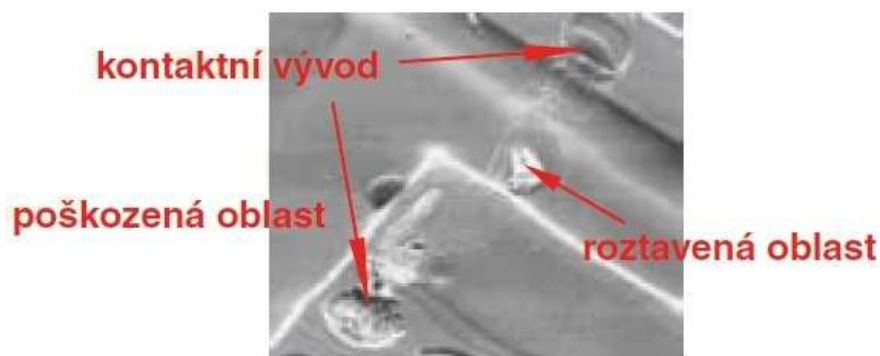
2.3.2 Poškození polovodičových přechodů nebo kontaktů

K tomuto poškození dochází zejména tehdy, pokud dojde u polovodičového PN přechodu (např. emitor – báze u bipolárních tranzistorů nebo přechod drain – source u MOS tranzistorů) k lavinovému průrazu. Dojde k okamžitému nárůstu proudu a poté dojde k druhému již destruktivnímu průrazu.

Detailněji to znamená, že napětí v závěrně polarizovaném PN přechodu překročí hodnotu napětí lavinového průrazu. Proud stále prochází, PN přechod se ohřívá, až se ohřeje natolik, že nosiče náboje jsou generovány více teplem než lavinovým průrazem, a dochází k druhému průrazu. V místech druhého průrazu dochází k velkému zahřívání materiálu, jelikož jím protéká velmi vysoký proud. To opět napomáhá k větší generaci nosičů, které jsou stále rychlejší, tím opět roste proud, jedná se tedy o kladnou zpětnou vazbu. Díky výše uvedeným událostem může teplota překročit 1415°C a dojde k roztavení křemíku. Pokud je teplota natolik dostatečná, že roztaví i kovový vodič v oblasti spojení kov – křemík, může se stát, že se roztavený kov dostane do oblasti přechodu a způsobí odporový zkrat PN přechodu.

Po skončení ESD dojde k ochlazení celého substrátu, ale profil přechodu je poškozen, protože během výboje ESD došlo k promíchání látek. Navíc vlivem tavení dojde ke změně krystalické mřížky křemíku. To má za důsledek to, že se sníží závěrné napětí přechodu. [6]

Následující obr. 2.7 demonstruje poškození IO vlivem roztavení přechodu a migraci kovu do oblasti přechodu. Stejně jako obrázky uvedené výše, jedná se o snímky pořízené elektronovým mikroskopem. Aby bylo možné snímky pořídit, bylo nutné chemicky odstranit ochranný kryt integrovaného obvodu.



Obr. 2.7 Poškození obvodu a narušení PN přechodu [6]

2.3.3 Průraz dielektrika

Pokud napětí na dielektrické izolaci (tvořené např. oxidem nebo nitridem křemíku) přesáhne vlivem ESD prahovou hodnotu, překročí dielektrickou pevnost a dochází k průrazu. K tomuto jevu dochází nejčastěji u výboje typu CDM (Charged Device Model – kterým se bude tato práce zabývat v dalších kapitolách). Vlivem ESD vzniká vysoké napětí uvnitř IO. Znamená to, že závěrné napětí dielektrika je překročeno (nejčastěji se toto projevuje na hraně dielektrické vrstvy). Bodem v hraně dielektrika protéká vysoký proud a stejně jako v předchozím případě dochází k lokálnímu ohřevu. V tomto bodě se vytváří přetavený amorfní nebo polykrystalický křemík. Jak může takový průraz vypadat, je vidět na obr. 2.8, jde o průraz na MOS tranzistoru. Poškození se nachází v oblasti, kde má dielektrikum zvětšenou tloušťku, to je v místě, kde končí tenký izolační oxid hradla. [6]



Obr. 2.8 Poškození izolační vrstvy hradla u MOS tranzistoru [6]

2.4 Základní principy ochrany

Ještě před několika lety docházelo neustále k poškozování či ničení integrovaných obvodů vlivem ESD. Až poté, co odborná veřejnost zaznamenala pokrok s řešením tohoto problému, začala se tato problematika řešit a to byl základ k tomu, aby mohly začít vznikat jednotlivé normy. Poté se výrobci začali soustředit na ESD již při výrobě. Nejen z hlediska toho, že po expedici může být součástka konečným uživatelem poškozena, ale také na to, že součástka může být vlivem ESD poškozena již při výrobě. Dokonce i zařízení, která jsou používána k výrobě IO, mohou být poškozena.

Z výše uvedených faktů je jasné, že bylo nutné zařadit do IO ochranné prvky, či možnost tyto prvky k IO připojit. Aby nedošlo k poškození při výrobě, skladování a při samotném provozu, byly stanoveny základní požadavky na vlastnosti integrovaných obvodů, které by měly být odolné vůči elektrostatickému rušení. Tyto požadavky jsou uvedeny na následující straně.

Základní požadavky na vlastnosti IO:

- Omezení napětí odvedením proudu vzniklého vlivem ESD
- Rychlé sepnutí a to až pod 1 ns
- Velká proudová zatížitelnost, 3 A a více, po dobu min. 150 ns
- Minimální plocha na základní desce IO
- Malá kapacita a sériový odpor
- Ochrana proti různým projevům ESD
- Nesmí ovlivnit funkci IO
- Nesmí zvyšovat odběr proudu v klidovém stavu
- Odolnost vůči opakujícím se pulzům

[9]

Rozlišují se dva základní typy ochran - *turn-on-clamp* a *snapback clamp*. První uvedená ochrana se chová jako Zenerova dioda. Jedinou nevýhodou je, že dioda musí být uzpůsobena na vysoký výkon v případě, jedná-li se o velké pracovní napětí. Velikost ochranného prvku musí být větší, jelikož musí odvádět velké výkonové ztráty. Tato ochrana se používá nejvíce u napájecích vývodů.

Ve druhém případě se jedná o ochranu se záporným dynamickým odporem. Funkce ochrany je taková, že jestliže dojde na zařízení ke zvětšení napětí a hodnota tohoto napětí je větší než hodnota tzv. spouštěcího napětí, sníží se napětí na zařízení, obvod pracuje s velkými proudy, ale s menší výkonovou ztrátou. Tyto prvky jsou rychlé a malé. Někdy ale může dojít k tomu, že napětí na spínané ochraně může být vyšší než spouštěcí. Potom je ochrana stále aktivní a teče přes ni velký proud po delší dobu a ochranný prvek může být zničen.[9]

3 Klasifikace odolnosti elektronických součástek

Aby bylo možné klasifikovat odolnost elektronických součástek, bylo nutné zavést tři základní normalizované modely, které podle zkušeností pokryjí co nejvíce všech reálných poruch vlivem ESD. Tyto modely byly zavedeny a vytvářejí systém ochrany před ESD již při vývoji a výrobě elektronických sestav. Výrobci a uživatelé IO vyvinuli na základě níže uvedených modelů metody pro testování: [3]

- **Human Body Model (HBM)** – představuje manipulaci člověka s IO
- **Charged Device Model (CDM)** – představuje automatickou manipulaci s IO
- **Machine Model (MM)** – model strojního zařízení

Účelem ESD testování je simulace různých poškození a kvantifikovat citlivost, kterou lze připsat různým typům elektrostatických výbojů v IO. Modely blíže specifikují průběhy vybíjecích proudů typické pro různá elektrostatická napětí. Dále potvrzují to, že proudy, generující napěťové rozdíly a zahřívající struktury IO, jsou odpovědné za většinu poruch způsobených ESD.[3]

Další důležitou vlastností těchto modelů je možnost porovnávat jednotlivé součástky mezi sebou a vyvinout a ověřit vhodnou ochranu přímo na čipu. Ale nejpodstatnější záležitostí testování a jeho standardizace je opakovatelnost výsledků testů na stejných testovacích systémech a v neposlední řadě vzájemná korelace mezi různými testovacími systémy.[3]

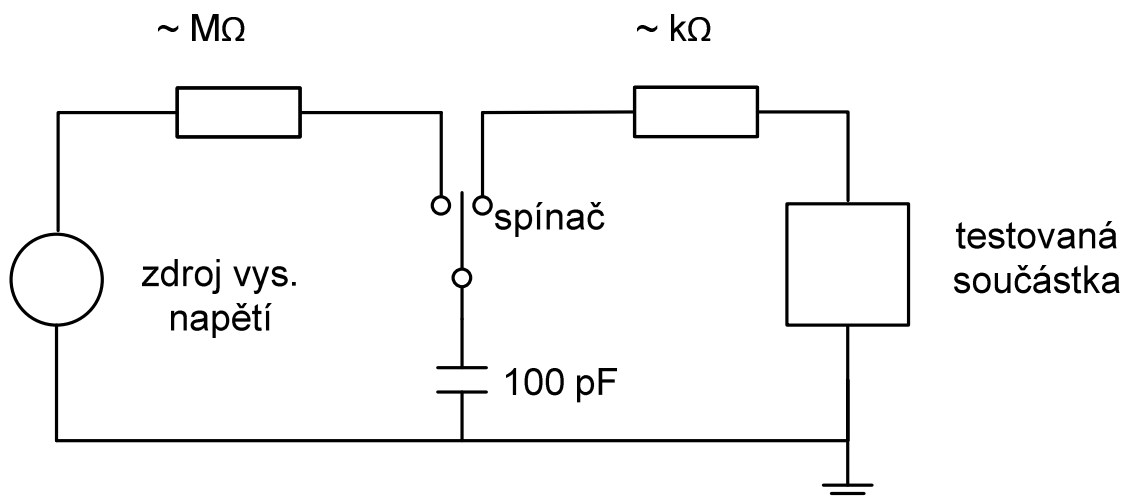
3.1 HBM – Human Body Model

Jedním z nejčastějších typů poškození je přímý přenos elektrostatického náboje přes odpor z lidského těla nebo z nabitého materiálu do zařízení citlivého na elektrostatický výboj (dále ESDS). Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, člověk pohybující se po izolované podlaze, hromadí na svém těle náboj, který se přenesou dotykem prstu na citlivé zařízení. Model použitý pro simulaci této události je právě model lidského těla (HBM).

Model lidského těla je jedním z nejstarších a nejpoužívanějších modelů vůbec. Pochází z devatenáctého století a byl vyvinut pro vyšetřování exploze směsi plynů v dolech. Samozřejmě jako u zrodu mnoha jiných předpisů a opatření byl tento model přijatý nejprve armádní normou MIL-STD-883 a teprve potom se dostal do norem mezinárodních.

Náboj, který je modelován nabitím kondenzátoru o velikosti 100 pF, je přes spínací prvky vybíjen přes odpor o velikosti 1,5 k Ω . Typické zapojení tohoto modelu je uvedeno na obrázku 3.1, kde je použit zdroj vysokého napětí k nabití kondenzátoru přes odpor o velikosti řádově jednotky M Ω . Přechodový odpor spínače se neuvažuje. Po přepnutí přepínače se náboj na kondenzátoru vybije přes odpor o velikosti řádově jednotky k Ω do testované součástky.

V České republice je tento model definován normou ČSN EN 61340-3-1 ed. 2, kde se popisují časové průběhy proudu výboje, použité pro simulaci elektrostatických výbojů, které odpovídají modelu lidského těla (HBM) a základní požadavky na přístroje, používané pro vytváření a ověřování takových průběhů. Dále norma popisuje časové průběhy HBM ESD pro použití v obecných zkušebních metodách při zkoušení materiálů nebo objektů, elektronických součástek a dalších prvků na odolnost proti ESD.[10]



Obr. 3.1 Human Body Model – obecné schéma

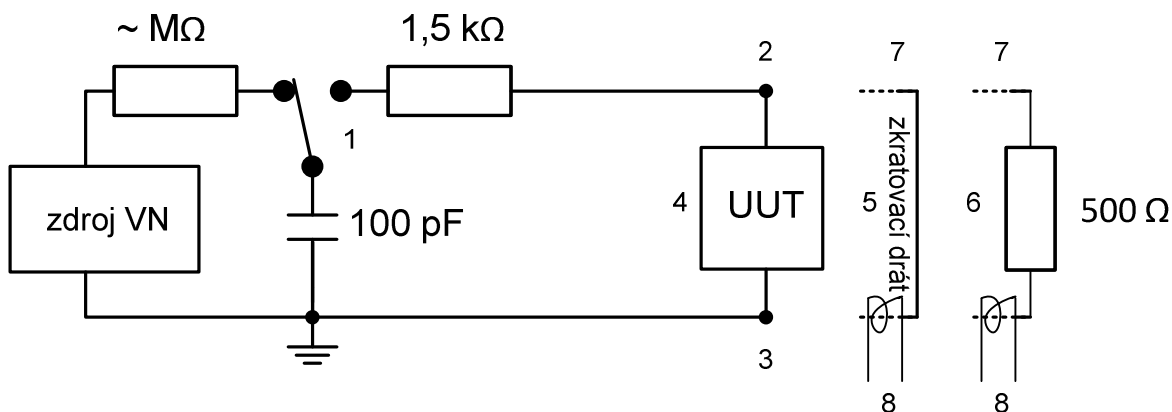
3.1.1 Termíny a definice

Pro účely této normy (ČSN EN 61340-3-1 ed. 2) se používají následující termíny a definice:

- **Zkoušená jednotka (UUT - unit under test)** – materiál, objekt, prvek nebo výrobek, který je podroben zkoušce HBM ESD.
- **Selhání zkoušené jednotky (UUT failure)** – podmínky, při kterých zkoušená jednotka nevyhověla v jednom nebo více stanovených parametrech zkoušce ESD.
- **ESD výdržné napětí (ESD withstand voltage)** – maximální úroveň napětí ESD, která nezpůsobí selhání překročením mezí parametrů; předpokládá se přitom, že všechny jednotky zkoušené při nižší úrovni při zkoušce rovněž vyhověly. [10]

3.1.2 Přístroje

Generátor průběhu ESD HBM vytváří proudový impulz elektrostatického výboje, který simuluje výboj, který procházející zkoušenou jednotkou. Na obrázku 3.2 je uveden ekvivalentní obvod generátoru průběhu a příslušné zátěže pro hodnocení. Přístroj pro hodnocení průběhu proudového impulsu HBM zahrnuje část pro záznam průběhu, vysokonapěťový rezistor, zkratovací drát, převodník proudu a případně další jiné části.



Obr. 3.2 Ekvivalentní obvod generátoru průběhů ESD HBM [10;11]

Generátor se skládá ze zdroje vysokého napětí, spínače (1), dvou terminálů (2 a 3), kam se také připojují hodnotící zátěže (5;6). Dále je to zkoušená jednotka (4) a převodník proudu (8). Spínač je sepnut 10 ms až 100 ms po dodání každého jednotlivého impulsu HBM, aby se zajistilo, že zkoušená jednotka ani zkušební přípravek nejsou ponechány v nabitěm stavu. Funkce tohoto generátoru je ovlivněná parazitní kapacitou a indukčností. Rezistory, které jsou zapojené do série se spínačem, zajišťují pomalé vybíjení zkoušené jednotky.

3.1.3 Požadavky na přístroje

Přístroje na ověřování průběhu proudového pulzu, jako je osciloskop, převodník proudu a rezistor pro vysoká napětí, musí být nakalibrovány v souladu s výrobcem. Maximální doba mezi kalibracemi je jeden rok. Kalibrace musí být úzce vázána na mezinárodní standardy, jako je Národní institut standardů a technologie ve Spojených státech nebo na jiné srovnatelné mezinárodní normy. V našem případě ČSN EN 61340-3-1 ed.2.

Na toto ověřování se doporučuje digitální osciloskop, ale analogové osciloskopy jsou stále povoleny. K přesnému zachycení křivky proudového impulsu musí osciloskop splňovat následující požadavky:

- Minimální citlivost na dílek 100 mA, pokud bude použit současně s převodníkem, který bude popsán na následující straně (indukční proudová sonda).
- Minimální šířka pásma 350 MHz.
- Minimální rychlost zápisu u analogových osciloskopů v jednotkách nanosekund.

[11]

Další doplňující požadavky na digitální osciloskopy:

- Doporučený počet kanálů: 2 a více
- Minimální vzorkovací frekvence: 1 GS/s
- Minimální vertikální rozlišení: 8 bitů
- Minimální vertikální přesnost: $\pm 2,5$ %
- Minimální přesnost časové základny: 0,01 % [11]

Požadavky na snímač proudu (indukční proudové sondy):

- Minimální šířka pásma 200 MHz.
- Schopnost zachytit proudovou špičku až 12 A.
- Doba náběhu a poklesu méně než 1 nanosekunda. [11]

Požadavky na hodnotící zátěže:

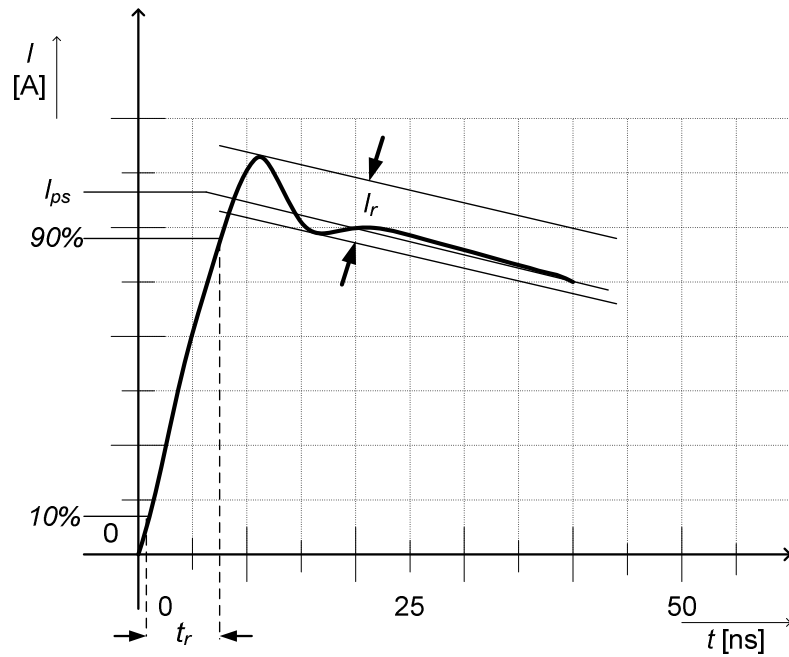
- zátěž 1: zkratovací drát (standardní pocínovaný měděný vodič 0,25 až 0,75 mm²), jehož úkolem je překlenout nevdálenější piny co nejkratší vzdáleností během průchodu proudu sondou.
- zátěž 2: rezistor o velikosti 500 Ω , ± 1 %, pro napětí minimálně 4000 V. [11]

3.1.4 Požadavky na průběh proudu HBM

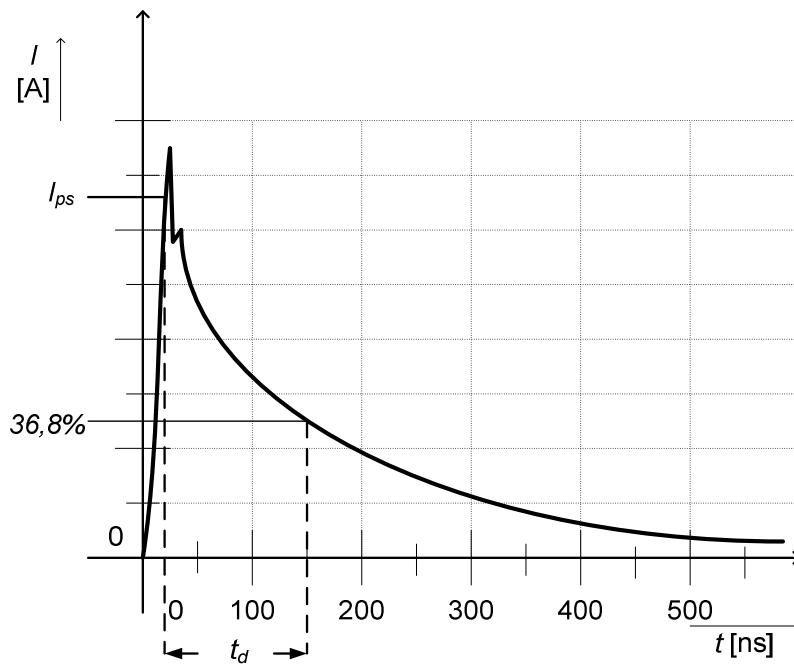
Před vlastním zkoušením jednotek se musí provést kvalifikace generátoru průběhu ESD HBM. Musí se zajistit dokonalost průběhu proudu přes zkratovací drát i přes zátěž z rezistoru. Požadavky na průběh zkratovacím drátem jsou uvedeny na obr. 3.3a) a 3.3b) pro všechna kladná a záporná napětí, uvedená v tabulce 3.1, kde jsou také uvedeny požadavky na průběh odporovou zátěží. Na obr. 3.4 je průběh odporovou zátěží pro ± 1000 V.

Tab. 3.1 Specifikace průběhů - HBM [10]

Úroveň	I_{ps} vrcholová hodnota proudu zkratovacím drátem [A] $\pm 10\%$	I_{pr} vrcholová hodnota proudu rezistorem [A]	Ekvivalentní napětí [V]
1	0,17	—	250
2	0,33	—	500
3	0,67	0,375 až 0,550	1000
4	1,33	—	2000
5	2,67	—	4000
6	5,33	—	8000

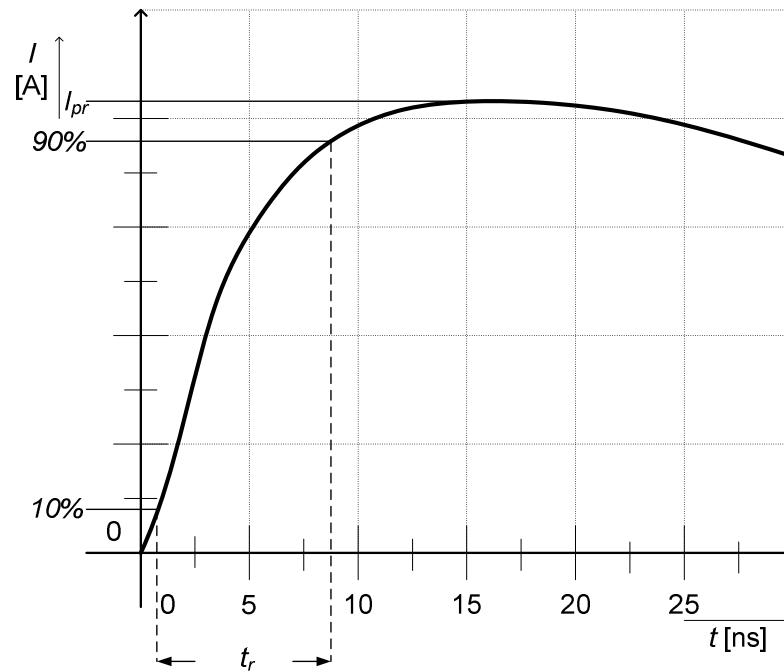


Obr. 3.3 a) Typický průběh proudu zkratovacím drátem - doba náběhu t_r [10]



Obr. 3.3 b) Typický průběh proudu zkratovacím drátem – doba poklesu t_d [10]

Doba náběhu impulsu musí být v rozmezí 2 ns až 10 ns. Doba poklesu impulsu musí být 150 ns \pm 20 ns. I_r je maximální přípustné zakmitání vrchol – vrchol musí být menší než 15 % z I_{ps} , měřeno rovnoběžně s průběhem proudu. Dále pokles nesmí mít pozorovatelné zvlnění po 100 ns od začátku impulsu. U obr. 3.4 musí proudový impuls splňovat dobu t_r 5 až 25 ns.



Obr. 3.4 Typický průběh proudu rezistorem 500 Ω [10]

3.1.5 Hodnocení odolnosti zkoušených jednotek (UUT) proti ESD

Podmínky aplikace odpovídající zkoušené jednotce musí být stanoveny pro tyto parametry:

- Rozsah výběru.
- Počet impulzů.
- Interval mezi impulzy.
- Úroveň namáhání napětím.
- Zkušební teplota a vlhkost.
- Příslušné meze specifikovaného parametru, které představují nesplnění zkoušky odolnosti proti ESD. [10]

Dále se rozděluje hodnocení jednotek, zdali mají či nemají elektrické vývody. U jednotek s vývody se vyžaduje roztrídění vývodů na různé typy. Například vstupní, výstupní, napájecí nebo uzemňovací. Zkouší se postupně každý vývod, který není určen k napájení proti vývodu, který k napájení či uzemnění určen je.

Pokud se hodnotí UUT, která má elektrické vývody, musí se zjistit nejslabší kombinace pinů a práh selhání pro HBM. Nejmenší hodnota napětí je mezní hodnota pro danou součástku v odolnosti proti ESD HBM. Pokud UUT nemá mnoho elektrických vývodů, zkouší se na HBM z pravidla všechny kombinace pinů. Má-li UUT mnoho elektrických vývodů, je možné vybírat kombinaci pinů jako skupiny pinů. Pokud UUT nemá žádné piny, může být přiváděn impulz na jednotku pomocí přiložených elektrod nebo jiným vhodným způsobem. [10]

NAPÁJECÍ PINY

Napájecí pin je každý pin, který předává proud do obvodu. Zatímco většina těchto napájecích pinů jsou snadno rozpoznatelné (VDD, VDD1, VDD2, VDD_PLL, VCC, VCC1, VCC2, VCC_ANALOG, GND, AGND, DGND, VSS, VSS1, VSS2, VSS_PLL, VSS_ANALOG atd.) ostatní piny nejsou vždy jednoznačně určené a vyžadují odborné přezkoumání při normálním provozu. Napájecí piny obvykle nepřenášejí žádné informace, jako jsou digitální nebo analogové signály, časování, hodiny, nebo referenční signály pro napětí a proud. Typickým příkladem pinu, který se zdá být napájecí, ale může být považován za nenapájecí, je pin VPP na paměti EPROM. VPP uvádí paměť do zvláštního, zřídka užívaného stavu a dodává se přes něj vysoké napětí, které je potřeba pro naprogramování paměti. [11]

NENAPÁJECÍ PINY

Všechny piny, které nejsou rozříděné jako piny napájecí, nebo jsou nepřipojené (tzv. slepé), se nepovažují za piny napájecí. Do této skupiny patří piny - vstup, výstup, offset, nastavení, hodiny, ovládací prvky, adresování, data. [11]

SKUPINY NAPÁJECÍCH PINŮ

Napájecí piny jsou rozděleny do skupiny napájecích pinů a to s každým pinem, který je stanovený jako napájecí pin. Pin, který není připojený k jiným pinům, tvoří jednotný napájecí pin. Napájecí piny, které jsou vzájemně spojené kovem na čipu nebo v pouzdře, tvoří napájecí skupinu pinů. Kovové propojení by mělo být ověřené z dokumentace od výrobce. Pokud bude přechodový odpor kovového propojení v této skupině příliš velký, může to vést k oslabení odolnosti proti ESD HMB proudovému impulzu.[11]

KLASIFIKACE CITLIVOSTI PODLE HBM

Samotné testování spočívá v tom, že do součástky jsou přiváděny proudové impulsy, které se zavádí do jednotlivých pinů. Poté se analyzuje funkčnost součástky, její voltampérová charakteristika, popř. jiné vlastnosti. Pokud je součástka patrně zničená, tak se dále v testování nepokračuje. V opačném případě se zvýší úroveň napětí a testuje se dál. Při jakém napětí je součástka nenávratně poškozená, je mezní napětí pro HBM podle tabulky č. 3.2. Podle této tabulky se určí třída HBM.

Tab. 3.2 Klasifikace citlivosti součástek podle HBM [11]

TŘÍDA	ROZSAH NAPĚTÍ [V]
0A	$U < 125$
0B	$125 \leq U < 250$
1A	$250 \leq U < 500$
1B	$500 \leq U < 1\ 000$
1C	$1\ 000 \leq U < 2\ 000$
2	$2\ 000 \leq U < 4\ 000$
3A	$4\ 000 \leq U < 8\ 000$
3B	$8\ 000 \leq U$

3.2 CDM – Charged Device Model

Dříve byl dostačující takový model, který simuloval nabitý předmět a z tohoto nabitého předmětu se náboj vybil přes testovanou součástku. Již od roku 1970 byl tento model spojován s mechanickou dopravou integrovaných obvodů a byl označován jako důvod selhávání těchto IO. Problematika tohoto modelu se řešila již v Bellových laboratořích. Už tenkrát někteří v těchto laboratořích používali vakuum k přenosu náboje ze součástky k blízké zemní ploše. Díky Bellově ochotě mluvit a psát o tomto problému, se tato jednoduchá, ale efektivní metoda dostala k mnoha odborníkům a díky tomu se zlepšovala ochrana těchto polovodičových součástek. V laboratořích pokračovala práce na CDM a v letech 1980 až 1990 se tato problematika stala komerční záležitostí takovou, jakou známe dnes. [16]

Dnešní výrobní procesy probíhají velkou rychlostí a často se používají syntetické materiály, které jsou citlivější vůči účinkům elektrostatického nabití, než tomu bylo v minulosti. Takovým typickým příkladem je etiketování, jelikož etikety jsou tištěny na

plastické hmoty při velkých rychlostech. Poté vznikají při výrobě ztráty materiálu a nakonec i zisku. [13;3]

Tento model simuluje výboj z nabitého integrovaného obvodu přes jeden ze svých pinů do nízkoimpedančního uzemnění. Nicméně přesná kvantifikace CDM výboje je velmi obtížná. Výboj většinou končí v několika nanosekundách při proudu až desítky ampér. Tyto proudové špičky se budou značně lišit v závislosti na velkém množství faktorů, včetně typu pouzdra. Typickým selháním, které je pozorované u součástek typu MOS pro CDM model je dielektrický průraz, i když jiná poškození byla také zaznamenána.[13]

CDM citlivost dané součástky je poměrně závislá na typu použitého pouzdra. Integrovaný obvod, který je umístěn v malém pouzdře pro povrchové použití (*SOP – small outline package*), bývá znatelně citlivější na CDM výboj ve srovnání s pouzdrem (*DIL – Dual in line*), kde vývody procházejí skrz díry v plošném spoji, což je v dnešní době jedna z nejběžnějších konfigurací. Ovšem nejvíce citlivé IO bývají zapouzdrěné v pouzdrech typu TSOP¹, nebo PGA². [13;3]

Na základě výsledků získaných při prvních testech CDM testerů bylo zjištěno, že součástky s uváděnou odolností do 500 V, testované při 500 V nebo méně, obtížně zvládaly testování bez poškození i tehdy, kdy nebyla překročena hodnota výše uváděného napětí. U součástek, u kterých byla uváděna odolnost do 1000 V, tento problém nenastal. V dnešní době, kdy máme k dispozici lepší ochrannou technologii a zařízení, dosahujeme při manipulaci s integrovanými obvody napětí maximálně 250 V.

3.2.1 Termíny a definice

- **CDM – model nabíjené součástky**
- **CDM ESD – charged device model electrostatic discharge** – výboj z nabitého integrovaného obvodu přes jeden z vývodů do nízkoimpedančního uzemnění.
- **CDM ESD TESTER** – zařízení (dále jen „tester“), které simuluje CDM výboj
- **RESISTIVE PROBE** – rezistor, který je použit k změření velikosti CDM proudu
- **FIELD PLATE (FP)** – nabíjecí deska použitá ke zvýšení potenciálu testovaného zařízení
- **DUT – device under test** – testované zařízení

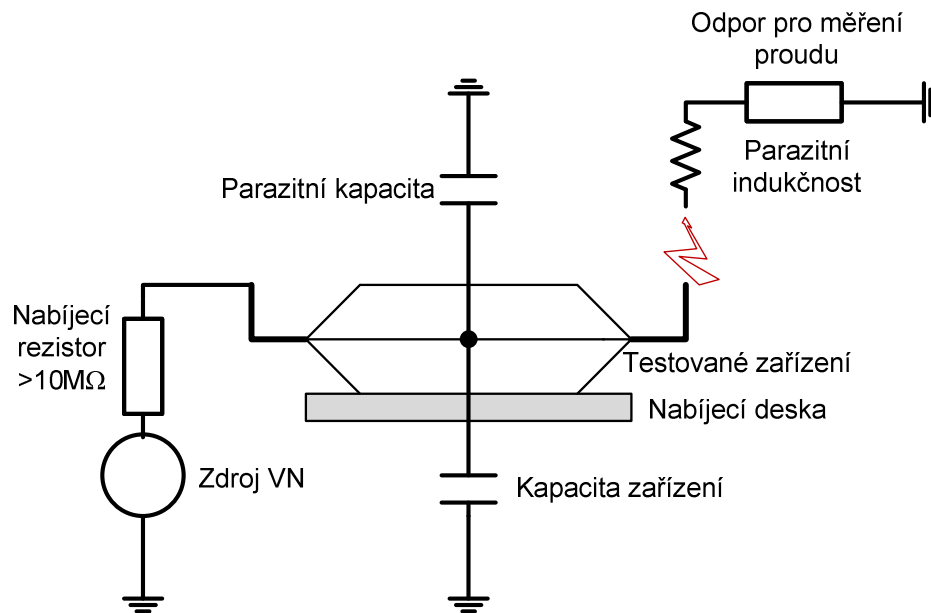
¹ TSOP (Thin small Outline Package – velmi tenké pouzdro pro povrchovou montáž)

² PGA (Pin Grid Array – pouzdro pro IO s velkým počtem vývodů, např. procesory)

Existují dvě testovací metody, které ovšem poskytují stejné známky poruchy. Jedná se o přímé nebo nepřímé nabití.

3.2.2 Přímé kontaktní nabití

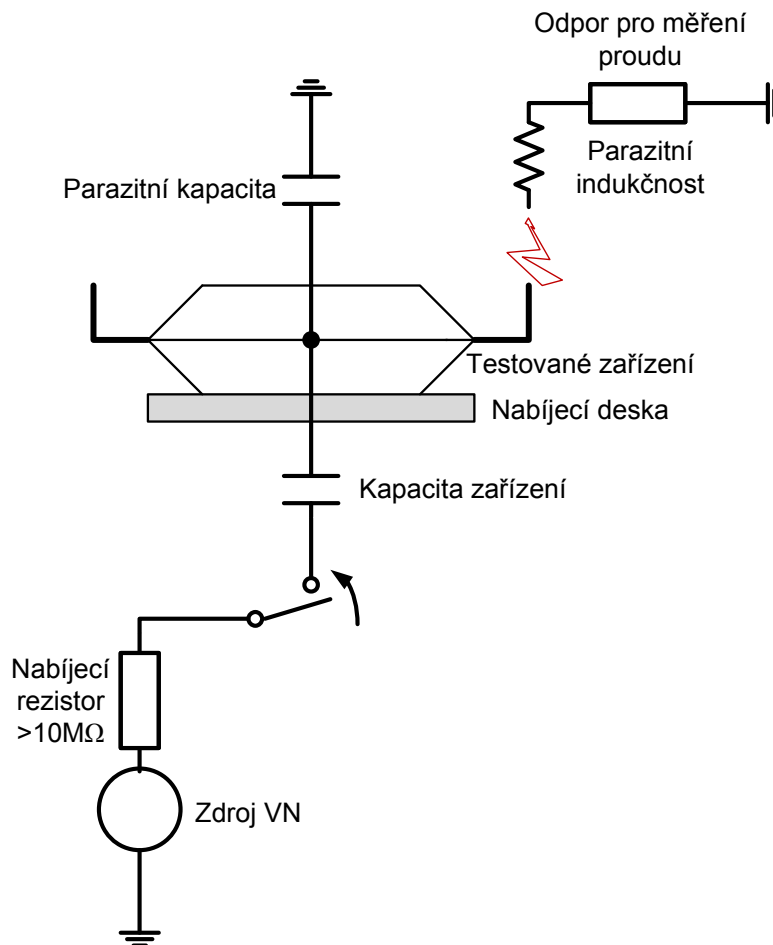
Každá testovaná součástka je umístěna na nabíjecí desce a je nabíjena pře vývod, který nejlépe poskytuje ohmické spojení se substrátem či kompaktním materiálem součástky, nebo přes všechny piny současně. Nabíjecí odpor musí být řádově stovky $M\Omega$, aby bylo zajištěné pomalé bezpečné nabíjení součástky. Aby se zabránilo poškození komponent, musí být přijata opatření k zajištění nabíjecího mechanismu. Součástky před prvním testováním musí být umístěny na zemnicí desce. Alespoň jeden nabíjecí rezistor musí být umístěn v blízkosti vývodu, přes který se bude nabíjet, aby se izoloval vliv jakéhokoliv zbytkového náboje. Principální schéma zapojení testeru CDM je na obrázku 3.5.



Obr. 3.5 Principální schéma CDM – přímé kontaktní nabíjení [8]

3.2.3 Nepřímé nabití

V tomto případě je integrovaný obvod položen na desce vývody nahoru. Zapouzdřený integrovaný obvod je při procesu nabíjení v mechanickém kontaktu s nabíjecí deskou. Aby se náboj mohl vybit, je nutné se dotknout uzemněnou sondou vývodu integrovaného obvodu. Principální schéma zapojení je vidět na obrázku 3.6.



Obr. 3.6 Principální schéma CDM – nepřímé nabíjení [8]

KLASIFIKACE CILTIVOSTI CDM

Komponenty se klasifikují podle toho, jaké napětí (tab. 3.3) vydrží při testování. Testovat součástka se může i od vyššího napětí, není povinné začínat od nejmenšího možného napětí. Pokud se tedy začne od vyššího napětí a je vidět, že u součástky dochází k poškození, začíná se s novou součástkou s napětím o třídu menším, dokud není stanoveno napětí, u kterého teprve dochází k poškození.

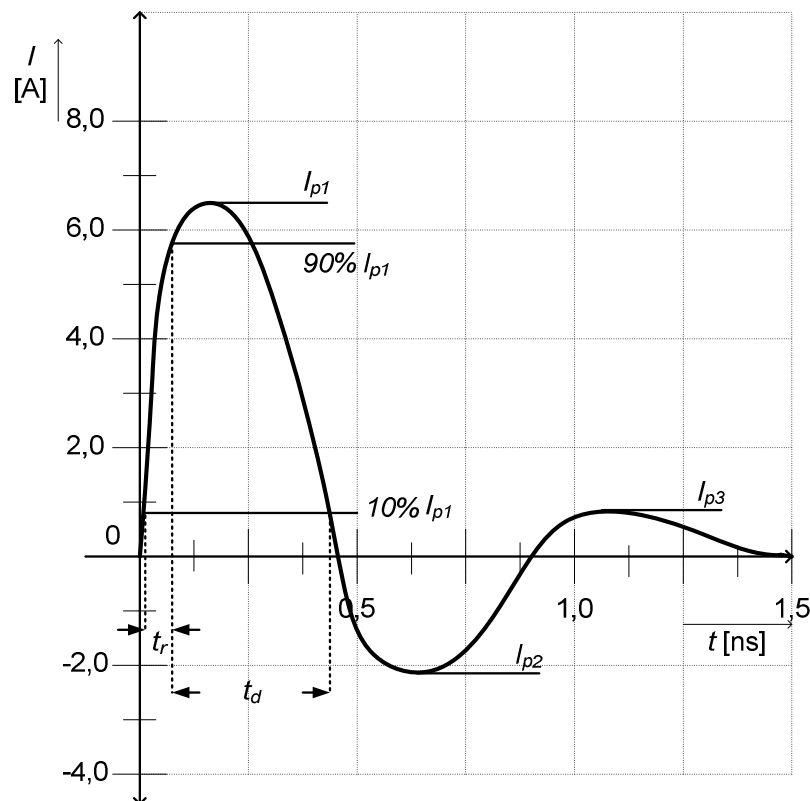
Pokud se součástka po testování např. na 500 V nachází ve výchozím stavu (je nepoškozená), pokračuje se v testování na další napěťový stupeň, dokud nedojde ke znatelnému poškození. CDM ESD testování je považováno za destruktivní, i když nedojde k selhání během testování. K selhání může dojít, až bude součástka připojena do obvodu a bude plnit svojí funkci. Pokud je to nutné, může se použít i menší přírůstek napětí, než je uvedeno v tabulce 3.3. [13]

Tab. 3.3 Úrovně zatížení pro CDM model [13]

ÚROVEŇ ZATÍŽENÍ	NAPĚTÍ [V]
1	125
2	250
3	500
4	1000
5	1500
6	2000

Jakákoliv změna integrovaného obvodu, jako je změna pouzdra, výrobního procesu, designu nebo materiálu, vyžaduje reklasifikaci podle tohoto modelu. I když je použit úplně stejný čip, ale v jiném pouzdra, tak by měl být znovu klasifikovaný. Obecná způsobilost čipů je krajně nepřijatelná. Klasifikace je pro specifickou kombinaci čipu, materiálu a zapojení. V žádném případě není pro samotný čip. [13] AŽ SEM ZKONTROLOVÁNO ČJ

Typický průběh proudu CDM modelu je na obr. 3.7. V tomto modelu se testuje pro obě polarity napětí. Kladná polarita znamená, že druhý vrchol I_{p2} je překmit pod osou a třetí vrchol I_{p3} je překmit nad osou. Pro zápornou polaritu je to opačným způsobem.



Obr. 3.7 Typický průběh proudu kladné polarity pro CDM

Podle toho, při kterém napětí součástka selže, určujeme třídu odolnosti proti ESD. Tyto třídy jsou uvedeny v následující tabulce 3.4.

Tab. 3.4 Klasifikace citlivosti součástek podle CDM [13]

TŘÍDA	ROZSAH NAPĚTÍ [V]
C1	$U < 125$
C2	$125 \leq U < 250$
C3	$250 \leq U < 500$
C4	$500 \leq U < 1\ 000$
C5	$1\ 000 \leq U < 1\ 500$
C6	$1\ 500 \leq U < 2\ 000$
C7	$2\ 000 \leq U$

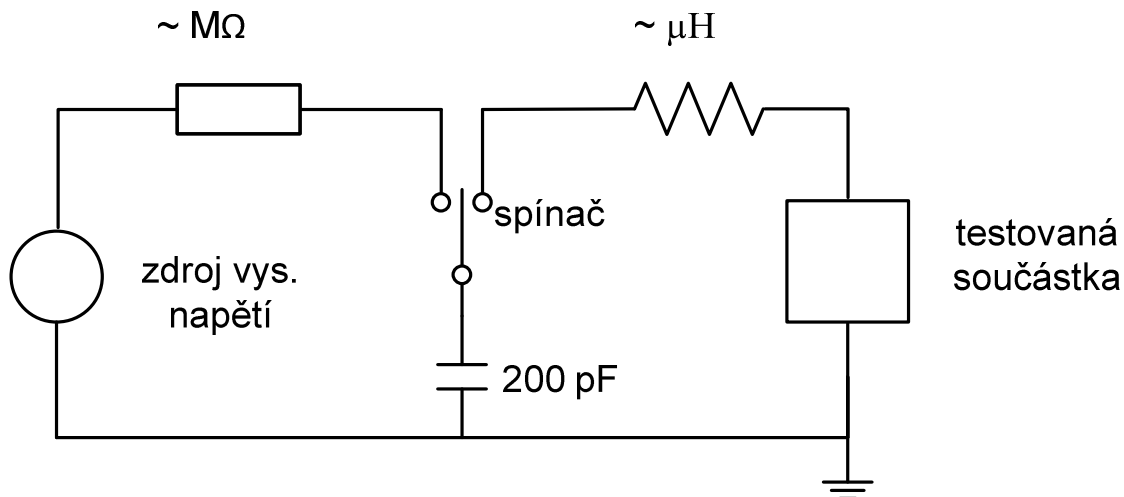
3.3 MM – MACHINE MODEL

Veškeré důležité parametry tohoto testování jsou uvedeny v normě ČSN EN 61340-3-2 ed.2, kde se popisují časové průběhy proudu výboje, použité pro simulaci elektrostatických výbojů, které odpovídají modelu strojního zařízení a základní požadavky na přístroje, používané pro vytváření a ověřování takových průběhů. Dále norma popisuje časové průběhy MM ESD pro použití v obecných zkušebních metodách při zkoušení materiálů nebo objektů, elektronických součástek a dalších prvků na odolnost proti ESD. [15]

Z anglického názvu je jasné, že se jedná o model strojního zařízení, který byl vyvinut v devadesátých letech minulého století v Japonsku, jako nejhorší případ modelu HBM. Odborná společnost o tomto modelu mluví jako o modelu HBM pro nízká napětí. Jak již bylo řečeno, tento model vychází z modelu lidského těla, jelikož představuje výboj sedícího člověka přes kovový dobře vodivý nástroj. Proto jsou jeho některé prvky velice podobné modelu HBM. [3]

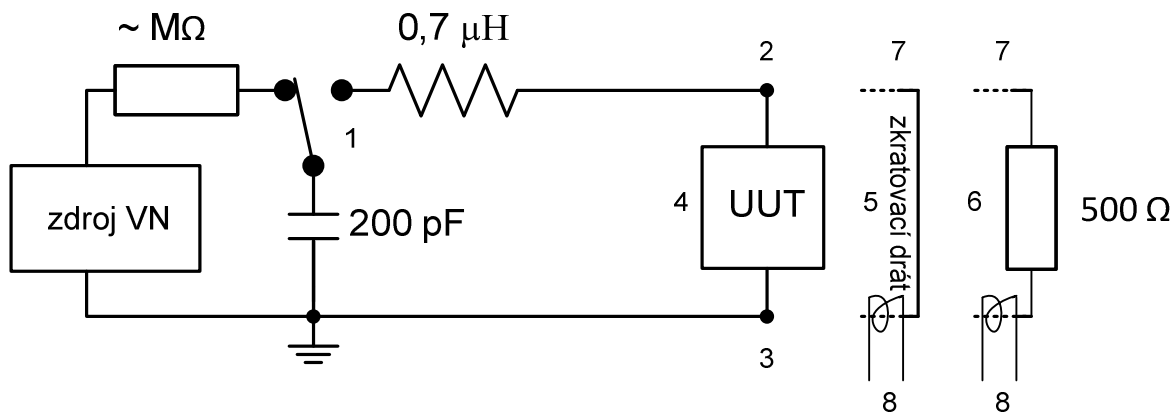
Jediné v čem se tento nízkoimpedanční proudový impuls liší od HBM, je tvar a velikost. Vlivem parazitní sériové indukčnosti dochází kvůli malé impedanci zátěže k oscilacím. Proto jsou tyto testovací proudové pulsy oscilující tlumené kmity. Poruchy způsobené tímto výbojem jsou většinou velice podobné jako poruchy způsobené HBM, ale při daleko nižších úrovních napětí. [3]

Obecné schéma tohoto modelu je na obr. 3.8, jak již bylo řečeno, je velice podobný schématu modelu HBM s tím rozdílem, že místo kondenzátoru o velikosti 100 pF je použit kondenzátor o velikosti 200 pF. Místo rezistoru 1,5 k Ω , který představoval odpor lidského těla je použita indukčnost o velikosti 0,7 μ H.



Obr. 3.8 Machine Model – obecné schéma [15]

Ekvivalentní obvod generátoru pulzů pro MM je na následujícím obrázku 3.9. Generátor se skládá ze zdroje vysokého napětí, spínače (1), dvou terminálů (2 a 3), kam se také připojují hodnotící zátěže (5;6). Dále je to zkoušená jednotka (4) a převodník proudu (8). Spínač je sepnut 10 ms až 100 ms po dodání každého jednotlivého impulsu HBM, aby se zajistilo, že zkoušená jednotka ani zkušební přípravek nejsou ponechány v nabitěm stavu. Funkce tohoto generátoru je ovlivněná parazitní kapacitou a indukčností. Rezistory, které jsou zapojené do série se spínačem, zajišťují pomalé vybíjení zkoušené jednotky. [15]



Obr. 3.9 Ekvivalentní obvod generátoru průběhů ESD HBM [14;15]

3.3.1 Termíny a definice

Pro účely této normy (ČSN EN 61340-3-2 ed. 2) se používají následující termíny a definice:

- **Zkoušená jednotka (UUT - unit under test)** – materiál, objekt, prvek nebo výrobek, který je podroben zkoušce HBM ESD.
- **Selhání zkoušené jednotky (UUT failure)** – podmínky, při kterých zkoušená jednotka nevyhověla v jednom nebo více stanovených parametrech zkoušce ESD.
- **ESD výdržné napětí (ESD withstand voltage)** – maximální úroveň napětí ESD, která nezpůsobí selhání překročením mezí parametrů; předpokládá se přitom, že všechny jednotky zkoušené při nižší úrovni při zkoušce rovněž vyhověly. [15]

3.3.2 Požadavky na průběh proudu MM

Před vlastním zkoušením součástek se musí ověřit schopnost generátoru. Zajistí se tím integrita průběhu proudu přes zkratovací drát i rezistivní zátěž. Požadavky na průběh proudu zkratovacím drátem a rezistorem jsou na obrázku 3.10 a) a 3.10 b). V tabulce 3.5 je detailnější specifikace průběhů.

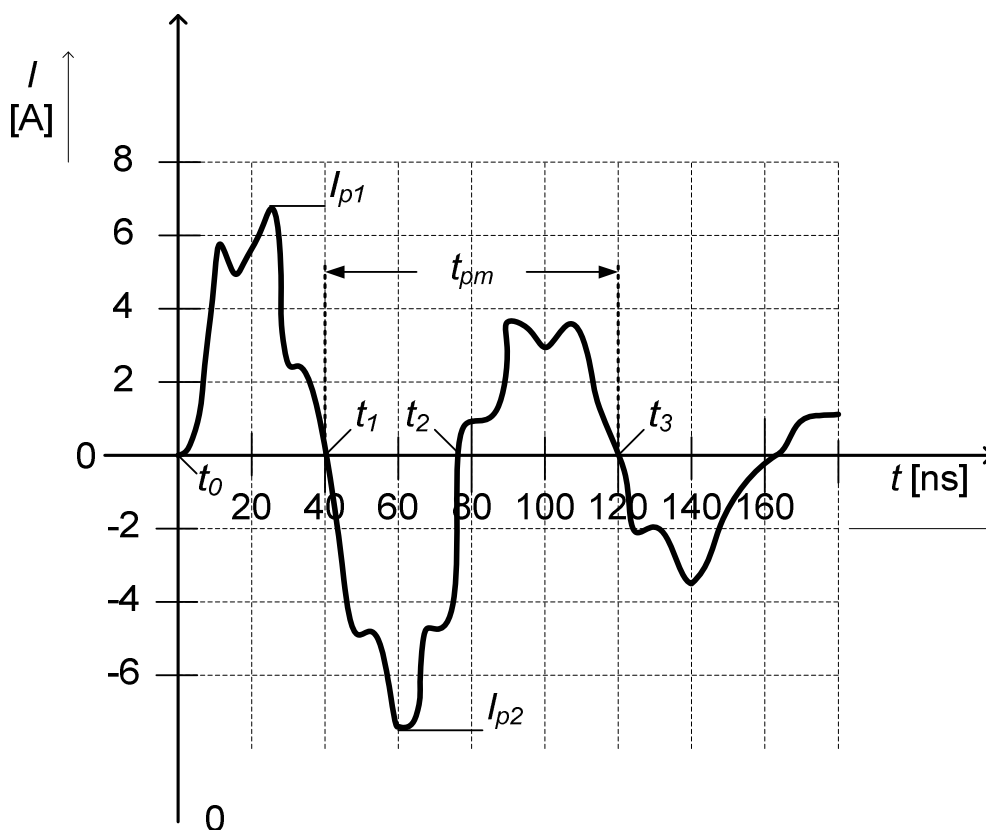
Kvalifikace přístroje musí být provedena v průběhu počátečního přijímacího zkoušení. Pokud dojde k nějakým opravám generátoru, musí se provést kvalifikace nová. Dále musí být tyto průběhy ověřovány pravidelně. Pokud je pro zkoušení součástek použita deska s plošnými spoji, musí se tato deska použít rovněž při kvalifikaci průběhů.

Tab. 3.5 Specifikace průběhů – MM model [15]

Úroveň	I_{p1} vrcholová hodnota proudu zkratovacím drátem [A] ($\pm 15\%$)	I_{PR} vrcholová hodnota proudu rezistorem [A]	I_{100} vrcholová hodnota proudu rezistorem v čase 100ns [A]	Ekvivalentní napětí [V]
1	1,7	—	—	100
2	3,5	—	—	200
3	7,0	$< I_{100} \times 4,5$	0,29	400
4	14,0	—	—	800

Následující proudový impuls musí splňovat:

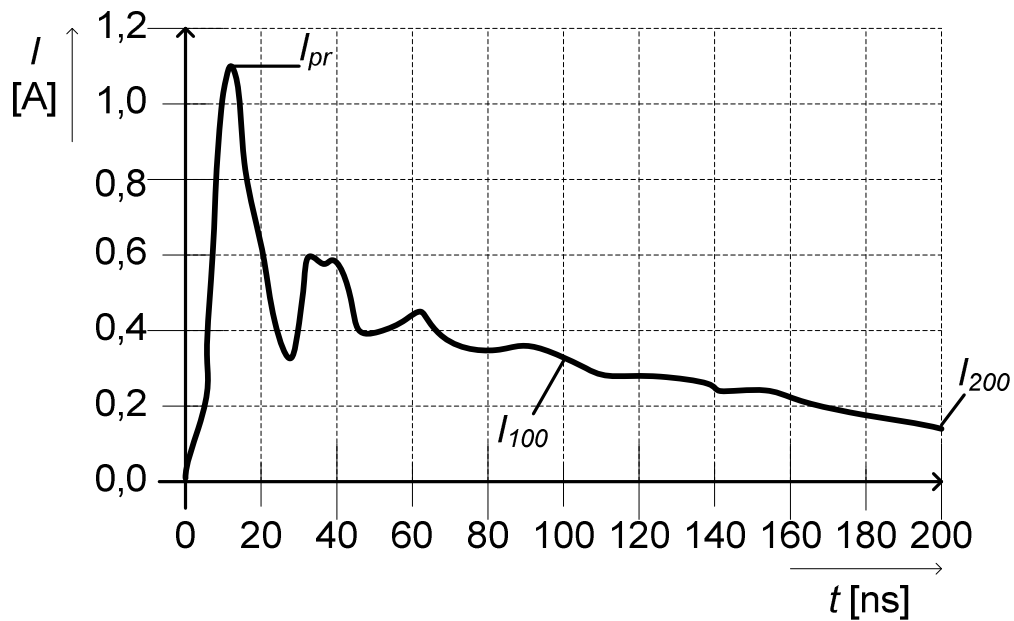
- I_{p1} maximální vrcholová hodnota proudu je uvedena v tabulce 3.5
- I_{p2} druhý vrcholový proud musí být mezi 67 % a 90 % absolutní velikosti získané I_{p1} pro každou úroveň
- t_{pm} je doba trvání hlavního impulsu, musí být mezi 63 ns a 91 ns. Měření se musí provádět mezi prvním průchodem nulou (t_1) a třetím průchodem nulou (t_3)



Obr. 3.10 a) Typický průběh proudu zkratovacím drátem pro výboj při 400 V [14;15]

Proudový impuls, který je uvedený na následující stránce je impuls procházející rezistorem 500 Ω a musí splňovat tyto charakteristiky:

- I_{pr} maximální hodnota vrcholového proudu musí být v rozsahu, který je stanoven v tabulce 3.5
- I_{100} hodnota proudu v čase 100 ns je také stanovena v tabulce 3.5



Obr. 3.10 b) Typický průběh proudu rezistorem 500Ω pro výboj při 400 V [14;15]

3.3.3 Hodnocení odolnosti zkoušených jednotek (UUT) proti ESD

Podmínky aplikace odpovídající zkoušené jednotce musí být stanoveny pro tyto parametry:

- Rozsah výběru.
- Počet impulzů.
- Interval mezi impulzy.
- Úroveň namáhání napětím.
- Zkušební teplota a vlhkost.
- Příslušné meze specifikovaného parametru, které představují nesplnění zkoušky odolnosti proti ESD. [15]

HODNOCENÍ JEDNOTEK, KTERÉ MAJÍ ELEKTRICKÉ VÝVODY

Hodnocení odolnosti vůči ESD zkoušených jednotek (UUT) s elektrickými vývody často vyžaduje rozřídění vývodů na různé typy, například vstup, výstup, data, hodiny, napájení, uzemnění. Zkouší se postupně každý vývod, který není určen k napájení proti vývodu, který k napájení určen je. [15]

V případě hodnocení zkušebních jednotek, které mají elektrické vývody, by se měla zjistit nejslabší kombinace pinů a tím určit práh selhání pro MM. Pokud zkušební jednotky nemají příliš mnoho elektrických vývodů, zkouší se všechny kombinace těchto pinů. V opačném případě, kdy jednotka má příliš mnoho pinů, zkouší se ze zpravidla kombinace pinů jako skupiny pinů. [15]

HODNOCENÍ JEDNOTEK, KTERÉ NEMAJÍ ELEKTRICKÉ VÝVODY

Pokud se zkouší materiál nebo předmět, který nemá elektrické vývody (například materiály, které se používají z pouzdření integrovaných obvodů), je nezbytné přivádět impuls na zkoušenou jednotku pomocí přiložených elektrod nebo jiným vhodným způsobem. [15]

3.3.4 Zkušební postup

Podle specifické aplikace, se stanoví zkušební postup. Například specifická aplikace průběhu MM pro stanovení odolnosti polovodičových součástek proti MM je uvedena v normě IEC 60749-27.

Je dovoleno používat libovolnou napěťovou úroveň jako počáteční úroveň namáhání. Pro každou polaritu se musí použít jeden impuls a to pro všechny elektrické vývody zkoušené jednotky. Může se stát, že některé zkoušené jednotky mohou mít pro jisté rozsahy testovacího napětí takzvané „okna výskytu poruch“, ve kterých se nevyskytuje žádná porucha³ (například žádné poruchy do úrovně 100 V, poruchy pro 200 V, žádné poruchy pro 300V, další porucha pro 400 V). Neměla by se vynechat žádná úroveň namáhání, aby se detekovala okna ve výskytu poruch.

O zkoušené jednotce se předpokládá, že se vyskytla ESD porucha, jestliže po zkoušce ESD nesplňuje parametry, které před zkouškou splňovala.

Po dokončeném testování přichází třídění, kdy se testované součástky rozdělují do tříd podle tabulky 3.6. Je možné i jiné třídění a to podle druhu poškození, zda došlo k totální destrukci nebo částečnému poškození nebo jiné vhodné rozřídění.

³ Tyto okna platí i pro model HBM. Při měření pro tuto práci se tato okna vyskytla právě při testování HBM. Tyto okna jsou uvedena ve výsledcích měření pro tuto práci.

Tab. 3.6 Klasifikace citlivosti součástek podle CDM [17]

TŘÍDA	ROZSAH NAPĚTÍ [V]
M1	$U < 100$
M2	$100 \leq U < 200$
M3	$200 \leq U < 400$
M4	$400 \leq U$

4 Fakta a srovnání testovacích modelů – MM, HBM a CDM

4.1 Aktuálně

Model strojního zařízení, jako potřeba pro ESD kvalifikace zkoušených jednotek se napříč celým průmyslem přestává používat. Následující řádky ilustrují, proč světový výrobci od tohoto modelu upouštějí.

- MM je obdobou HBM, dochází ke srovnatelnému poškození zkoušených jednotek a používat dva modely na stejné poškození není nutné.
- MM model má větší proměnlivost než HBM a to z důvodu větší citlivosti na parazitní efekty v obvodu testovacího zařízení.
- U zrodu tohoto modelu neproběhly významné inženýrské studie (s ověřenými daty), které by mohly být použity pro ustanovení MM
- Zkušební metoda se nesprávně nazývá „Machine Model“, jelikož nebyla prokázána žádná ojedinělá souvislost mezi modelem a skutečným selháním součástky vlivem nabití strojní části. Ve skutečnosti byl model vyvinut jako nízkonapěťový HBM - „Low Voltage HBM“.
- Například CDM lépe simuluje rychlé kontaktní výboje kov – kov, než MM
- Velká většina selhání ve výrobě, více než 99 %, koreluje s CDM, ne s MM
- MM testování spotřebovává více prostředků a čas na to, co už HBM a CDM jsou schopni pokrýt.

Výše uvedené fakty ovšem neznamenají, že by tyto skutečnosti nikterak shazovali základy, do kterých Machine Model patří. Jak je uvedeno níže, MM je velice nesprávně použitá ESD zkušební metoda. To stále vyvolá zmatek pro výrobce, zákazníky a dodavatele IO, během ESD kvalifikace. Mnoho společností a organizací nadále používají MM, a to většinou jako mnoholetý zvyk v praxi, navzdory skutečnosti, že tento model byl oslaben třemi

normalizačními orgány a již není doporučený pro kvalifikační zkoušky v souladu s JEDEC a JESD47. Automobilový průmysl jako dlouhodobý uživatel této metody, již tuto metodu vyřadil se seznamu kvalifikačních zkoušek AECQ100. Normy JEDEC (JESD22-A115) a ESDA (ANS/ESD STM5.2) dnes také vnímají tyto fakta a tuto metodu vyloučili.

Pokračující MM model, který je výhradně založený na starých inženýrských výzkumech, nemá žádnou technickou úroveň danou informacemi, které by byly shromážděny v posledních letech. Neboli MM model umírá. Ty společnosti, které dále využívají tento model, určitě pociťují, že je to zbytečná ekonomická zátěž podniku.

Historie mluví o takzvaném „200 pF, 0 Ω “ modelu, který se stal později známým jako model strojního zařízení, který vznikl v několika japonských společnostech na výrobu polovodičů. Tento model měl představovat nejhorší možný model lidského těla. Model byl později používán na simulaci okamžitých výbojů, způsobených kontaktem strojového vybavení s nezapouzdřenými polovodiči.

Toto se dělo v době, kdy nebyla ještě dostatečně pochopena problematika rychlých výbojů mezi kovovými částmi výrobních nástrojů a částmi integrovaných obvodů. Později, kdy byl tento problém pochopen, řešil již tyto události CDM.

V září 2011 na sjezdu JEITA představil M. Tanaka – san (Renesas Electronics), odůvodnění a fakta, které měly podpořit vyloučení MM testovací metody. Podle historických faktů, které pan Tanaka uvedl, byl takzvaný strojový model představen ve společnosti Hitachi (dnes Renesas Electronics) asi o 45 let dříve.

Japonští výrobci polovodičů představily HBM test jako zkušební metodu, která byla uvedena v jejich produktových zkušebních protokolech pro integrované obvody.

Tato zkušební metoda se později rozšířila po celém Japonsku a později byla stanovena jako zkušební norma v EIAJ v roce 1981. Kolem roku 1985 se někteří výrobci začali dále mylně odvolávat na tento test jako na Machine Model. Poté v roce 1991, ESDA, JEDEC a IEC přijaly tento model jako novou zkušební normu pod novým jménem Machine Model. Jak se používání tohoto modelu šířilo stále více, bylo zjištěno, že docházelo k řadě nedorozumění, která je potřeba dnes odstranit.

Brzy v oblasti ESD testování vznikla nutnost vyhnout se vysokým napětím při HBM testování (2kV a vyšší). Kapacita 200 pF a nízká impedance machine modelu byly považovány za ekvivalentní a bezpečnější při zachování stejného typu poškození jako u HBM. Nicméně je velice obtížné dosáhnout převodu HBM na MM. Ochranné prvky, které jsou dnes standardně součástí integrovaných obvodů, jsou zaměřeny na výboj typu HBM, ale

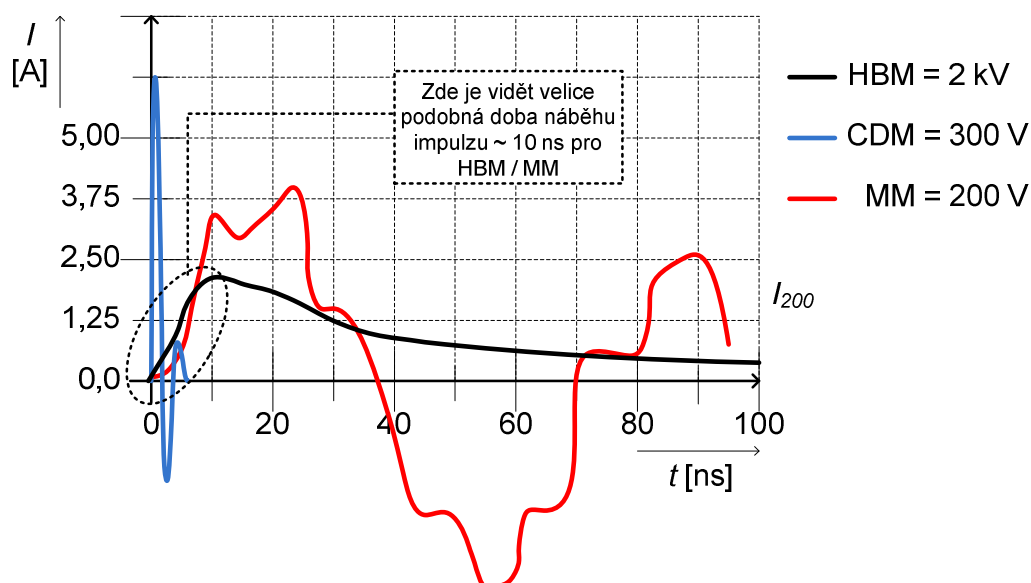
MM testery jsou náchylné na parazitní obvodové prvky, tudíž tyto parazitní prvky způsobují větší změny tvarů a vlastností pulzů u machine modelu než u HBM. To znamená velký problém ve sjednocení těchto norem.

Přesto a bez jakéhokoliv technického podložení se testování při napětí 200 V MM stalo ekvivalentním k testování na 2 kV HBM. Ve skutečnosti zařízení, které odolává výboji 2 kV HBM, odolává na výboj MM – 100 V až 300 V. Ale i přes to vznikají problémy a zmatek ve sjednocení HMB a MM. [16]

4.2 MM vs. HBM a CDM

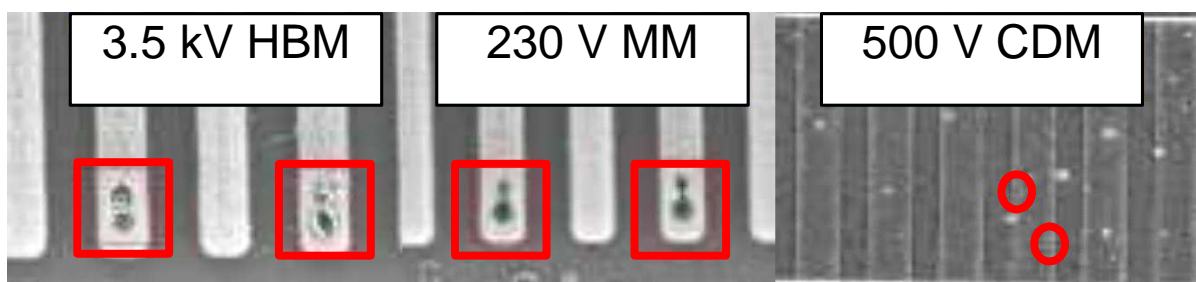
Pulzy pro HBM, MM a CDM jsou uvedeny na obrázku 4.1. HBM a MM mají velice podobnou dobu náběhu (2 - 10ns). To je důvod toho, co vede k obdobným typům poškození struktury zkoušené jednotky pro oba typy modelů. To je platné pro všechny technologie, včetně těch nejvyspělejších. Tato část pulzu určuje, kde musí být na čipu rozmístěné ochrany. Obdobná časová charakteristika pulzů znamená, že typy a provedení ochran si jsou velice podobné.

Na druhou stranu je doba náběhu pro CDM je o mnoho rychlejší (0,1 – 0,5 ns) a to často vede k poškození, které je nesrovnatelné s poškozením od HBM nebo MM. Ochranná strategie proti CDM je velice odlišná, z čehož plyne, že je nutné větší zaměření na CDM testování namísto stálého opakování HBM nebo MM testování. Na obrázku 4.2 jsou vidět různé druhy poškození pro stejný elektrický vývod po testování s HBM, MM a CDM. [16]



Obr. 4.1 Porovnání HBM, MM a CDM proudových průběhů [16]

Je jasné, že poškození při HBM a MM testování je na ochranné diodě stejné, ale při CDM testování dochází většinou k totálnímu průrazu PN přechodu. Komerční MM testery mají induktory vestavěné přímo v obvodu. Tyto induktory musí být v obvodu, aby zajistily oscilaci pulzu, která je požadovaná v normě MM. Induktory ve skutečnosti zpomalí MM průběh (obrázek 4.1), a proto MM nemůže představovat rychlé kontaktní výboje jako CDM. Na druhou stranu CDM test reprezentuje prudké zvýšení potenciálu v pouzdře a přímým výbojem přes elektrický vývod do země zajišťuje velmi rychlé vybíjení. [16]



Obr. 4.2 Druhy poškození způsobené HBM, MM a CDM [16]

4.3 Shrnutí

Veškeré informace a fakta, uvedené v této kapitole, by měly poukázat na to, že „Machine Model“ by již neměl patřit do společnosti ESD testování. Důležité je podotknout, že na pokrytí veškeré problematiky ESD testování stačí jen HBM a CDM. Zmatek, který vznikl díky přijetí strojního modelu, vytrval v průmyslové společnosti více než dvě desetiletí.

Předpokládaná potřeba pro tento test zapříčinila další zpoždění v testování kvůli mimořádné spotřebě zkušebních prostředků. Ačkoliv to tak nevypadá, přijetí tohoto modelu může mít v některých případech za následek zpomalení vývoje integrovaných obvodů.

HBM a CDM jsou dostačující k tomu, aby pokryly veškeré hrozby, se kterými se při výrobě integrovaných obvodů setkáváme. To je také jeden z několika důvodů, proč byl zvolen HBM pro tuto práci.

5 Měřicí přípravek

5.1 Teoretický rozbor

Pro demonstraci testovacích metod se zvolil HBM test z následujících důvodů. Ve všedním životě člověka k němu dochází nejvíce, aniž by si to člověk uvědomoval. Dalším důvodem je to, že ve většině univerzitních měření se na tento problém neklade takový důraz, a proto je třeba si uvědomit, že při manipulaci se součástkami k tomuto výboji dochází. Poté mohou studenti například u unipolárního tranzistoru změřit charakteristiky, které již neodpovídají původním charakteristikám z výroby. Proto celá měřicí úloha bude zaměřena na tuto skupinu součástek. Proto by měl mít student při práci se součástkami, které jsou na tento výboj náchylné, nasazen alespoň zemnicí náramek.

Při navrhování měřicího přípravku se vycházelo z normy ČSN EN 61340-3-1 ed.2., v níž jsou uvedeny základní požadavky pro tento typ testování (viz. kapitola 3.1). Původně bylo zamýšleno, že veškeré součástky se budou testovat až do výboje při napětí 2 kV. Laboratorní úloha slouží hlavně jako demonstrace měřicí metody a nebude použita pro komerční účely, a tak jsme usoudili, že napětí 1,5 kV bude pro toto měření dostačující. Jelikož v přípravku dochází k velkým úbytkům napětí, zjistili jsme, že abychom dosáhli napětí 2 kV na UUT, musíme přivádět ze zdroje napětí 2,68 kV. Toto napětí není v laboratorní úloze pro studenty příliš bezpečné. Bezpečnost je na prvním místě, ale dalším důvodem bylo také to, že součástky, které bychom museli použít pro tak vysoké napětí, jsou pro naše potřeby příliš drahé, jelikož by náklady byly v desítkách tisíců korun. Může se také stát, že se některá součástka v přípravku může vlivem testování zničit. Z toho plyne, že by se tato laboratorní úloha stala pro katedru ekonomicky nevýhodnou.

Vypočetli jsme konstantu $k = 1,34$, kterou se musí vynásobit požadované napětí na UUT. Požadujeme-li na UUT napětí například 500V, musíme na zdroji nastavit 670 V. Takže největší napětí, kterého budeme dosahovat na zkoušené jednotce, bude 1,5 kV, což znamená, že do měřicího přípravku budeme přivádět 2010 V na místo 2,68 k V.

Museli jsme tedy zvolit tu nejefektivnější cestu. Jak již bylo řečeno, tak pro napětí 1,5 kV na UUT je nutné přivádět do přípravku 2010 V, z čehož plyne, že součástky pro hladinu 2,68 kV již nejsou potřeba. Pro napětí do 2kV jsou součástky o mnoho levnější a dostupnější, tudíž byl vyřešen problém bezpečnostní i ekonomický.

5.2 Princip funkce

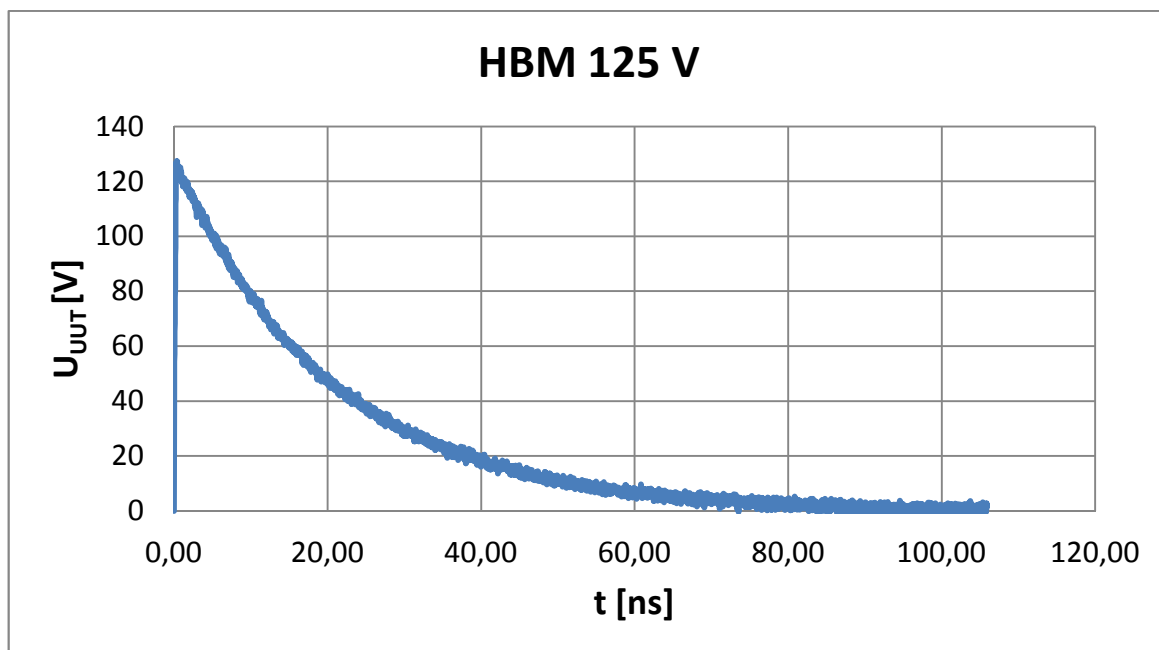
Model lidského těla se skládá ze zdroje vysokého napětí, dvou rezistorů, kondenzátoru a spínače. V našem případě relé představuje spínač.

Princip funkce tohoto přípravku je velice jednoduchý. Kondenzátor o velikosti 100 pF se nabije přes první rezistor o velikosti 1,135 M Ω . Až se kondenzátor nabije na požadovanou hodnotu, spínačem se propojí s druhým rezistorem (1,5 k Ω – odpor představující lidské tělo) a přes tento rezistor se kondenzátor velice rychle vybije do zkoušené jednotky.

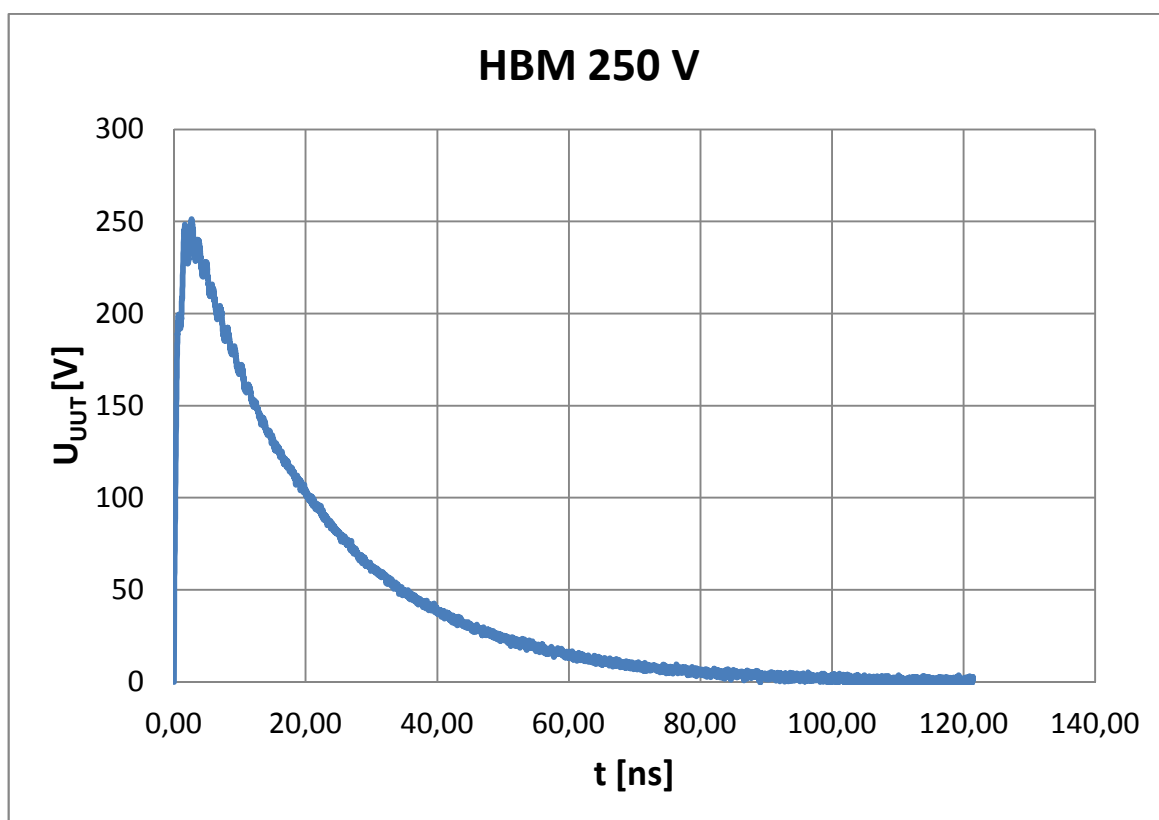
Vybíjení kondenzátoru je opravdu velice rychlé a byl problém ho zachytit standardním osciloskopem, ale ve spolupráci s vysokonapěťovou laboratoří v budově FAV se nám tyto pulzy podařilo zachytit. Pulzy jsou uvedeny v následující části.

5.3 Pulzy přiváděné na UUT

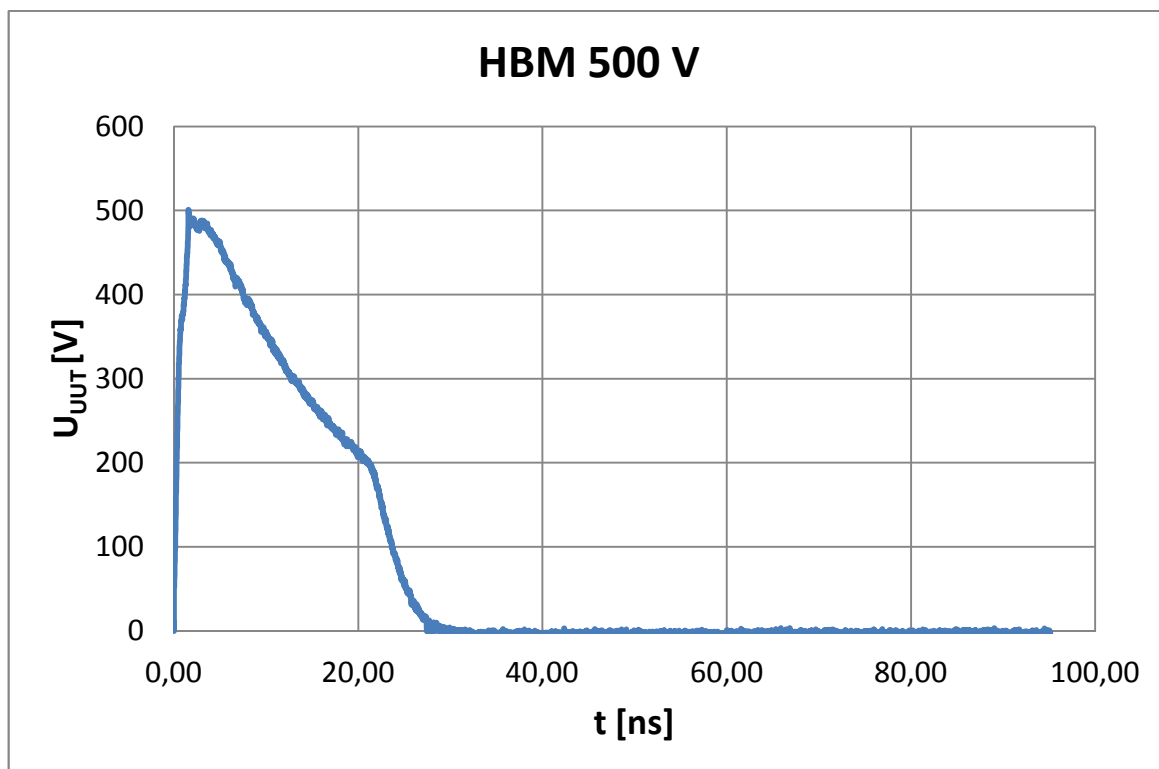
V této části jsou uvedeny pulzy, jimiž se budou testovat všechny součástky, které se testují od 125 V do 1,5 kV. Na obrázku 5.1 je vidět časový průběh pulzu HBM 125 V, doba náběhu t_d je splněna. Zde se nám potvrdilo, že pulsy jsou opravdu velice rychlé. Jak bylo požadováno, pulz dosáhl špičky 125 V, což je první testovací hladina. Pulz HBM 250 V je na obrázku 5.2 a také splňuje veškeré požadované parametry včetně špičky 250 V. Na obrázku 5.3 je zobrazen pulz HBM 500 V. Doba náběhu opět méně než 10 ns. U této hladiny napětí, došlo k rychlejšímu vybití součástky. Testování HBM 1000 V je na obrázku 5.4. Požadavek na dobu náběhu impulzu byl také splněn a samozřejmě i špička 1000 V. Poslední impulz HBM 1000 V je uveden na obrázku 5.5, a jak je vidět, požadavek na dobu náběhu byl opět splněn. Tímto jsme provedli ověření impulzů, abychom si ověřili funkčnost přípravku.



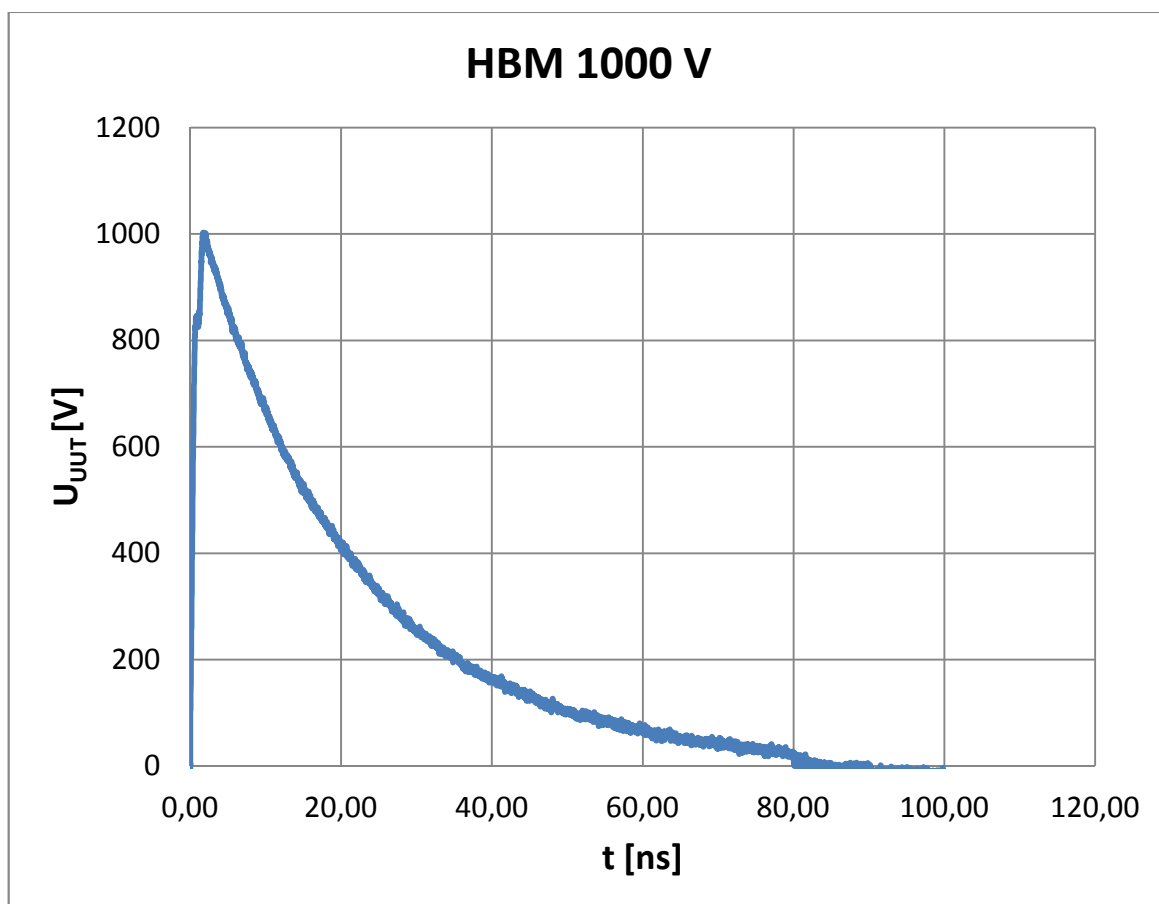
Obr. 5.1 Časový průběh pulzu HBM 125 V



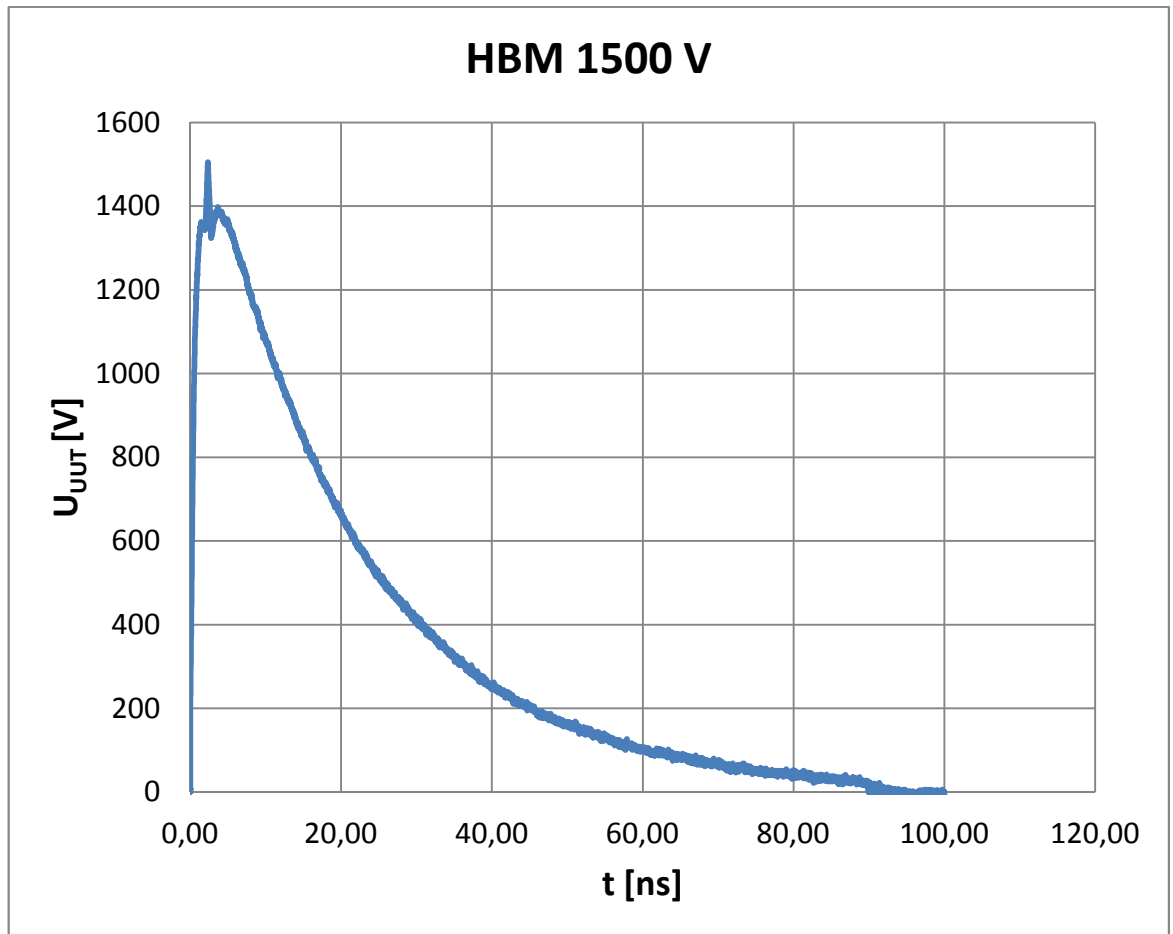
Obr. 5.2 Časový průběh pulzu HBM 250 V



Obr. 5.3 Časový průběh pulzu HBM 500 V



Obr. 5.4 Časový průběh pulzu HBM 1000 V



Obr. 5.5 Časový průběh pulzu HBM 1500 V

5.4 Použité součástky



Relé:

$U = 12 \text{ V}$; $R = 220 \Omega$; $P = 0,65 \text{ W}$

I_{MAX} kontakt = 16 A; $T_{P/O} = 7/3 \text{ ms}$

Relé je použito jako spínač.



Kondenzátor:

Kapacita: 100 pF; $U_{MAX} = 2000 \text{ V}$

Tolerance kapacity: $\pm 10 \%$

Operační teplota: $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ až $125 \text{ }^\circ\text{C}$

Dielektrikum: Y5R – keramika

Kondenzátor představuje kapacitu člověka.



Rezistor:

Velikost odporu: $1,5 \text{ k}\Omega$; $U_{MAX} = 1,25 \text{ kV}$

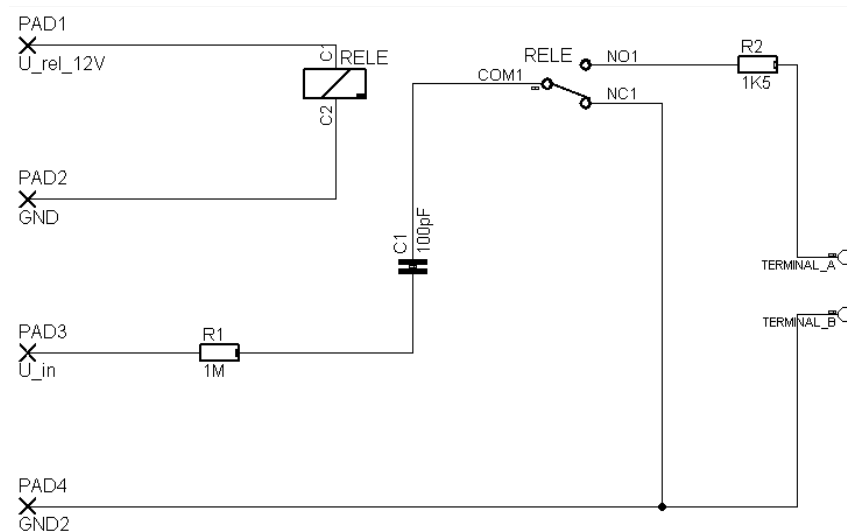
Tolerance odporu: $\pm 5 \%$

$P_{MAX} = 50 \text{ W}$

Dle výrobce - zvládá rychlé pulzy až $2,5 \text{ kV}$

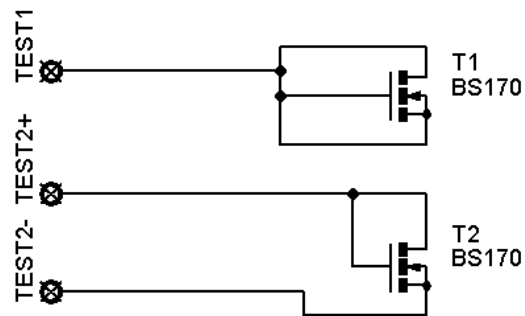
5.5 NÁVRH

5.5.1 Schéma zapojení



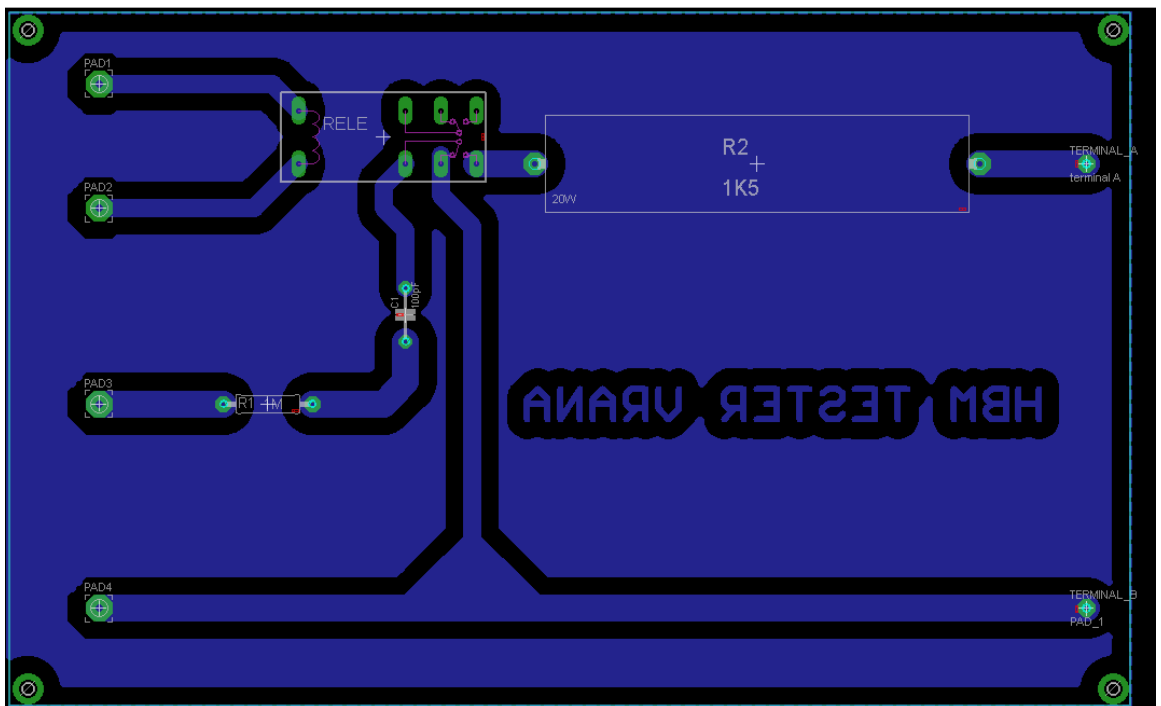
Obr. 5.6 Schéma zapojení HMB testeru

Na obrázku 5.6 je schéma zapojení přípravku, který po připojení napětí generuje testovací pulzy pokaždé, když sepne relé. Relé je možno budít generátorem, kde musíme vzít v úvahu zpoždění relátka, nebo mechanickým spínačem. Ke generátoru se poté připojí univerzální deska. Schéma zapojení tzv. „uni - desk“ je na obrázku 5.7, kde jsou demonstračně uvedené tranzistory BS 170. Místo tranzistorů jsou na desce kovové trubičky, do kterých lze jednoduše zasunout vývody testované součástky, v našem případě tranzistoru. Jakým způsobem probíhá měření, je uvedeno v kapitole 6.



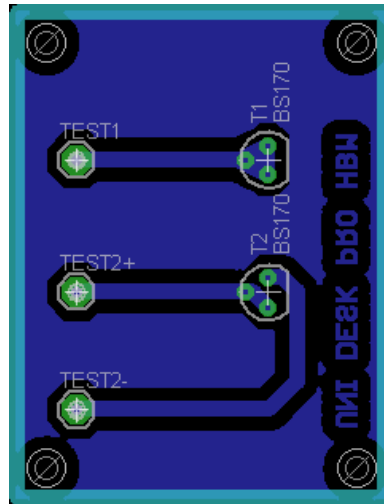
Obr. 5.7 Schéma zapojení univerzální desky pro tranzistory

5.5.2 Desky plošných spojů



Obr. 5.8 Deska plošného spoje generátoru HBM

Na předchozím obrázku 5.8 je vidět deska plošného spoje HBM generátoru pulzů. Na konci této desky jsou dva terminály, ke kterým se připojuje univerzální testovací deska, kde je osazená součástka. Terminál A představuje kladný pól a terminál B záporný. Na následujícím obrázku 5.9 je deska plošného spoje uni – desk.



Obr. 5.9 Deska plošného spoje uni - desk

5.5.3 Shrnutí

Při testování maximálního napětí ze zdroje docházelo k poškození součástek při 2,6 kV, nicméně takových napětí dosahovat nebudeme. Pro případ, že by došlo k poškození některých součástek, jsou zakoupeny náhrady kromě relé. Pro kvalifikaci pulzů jsme použili rezistor o velikosti 500 Ω , který není nutné uvádět.

6 Laboratorní úloha

6.1 Teoretický rozbor

Cílem této laboratorní úlohy je to, aby si studenti osvojili měřicí techniky HBM testování. Nicméně tato měřicí technika skrývá mnohem více poznatků. Pro toto měření je nutné porozumět bipolárním a unipolárním tranzistorům, dále tomu. Co je to elektrostatický výboj a zvládat měření VA charakteristik tranzistorů. Co by mělo být nejdůležitějším výstupem této úlohy je uvědomění si, že ESD HBM je vážná hrozba, se kterou se denně setkáváme a před níž je nutné se chránit. Tato úloha je vhodná demonstrace toho, že k poškození součástek opravdu dochází a to jak k částečnému tak k totálnímu.

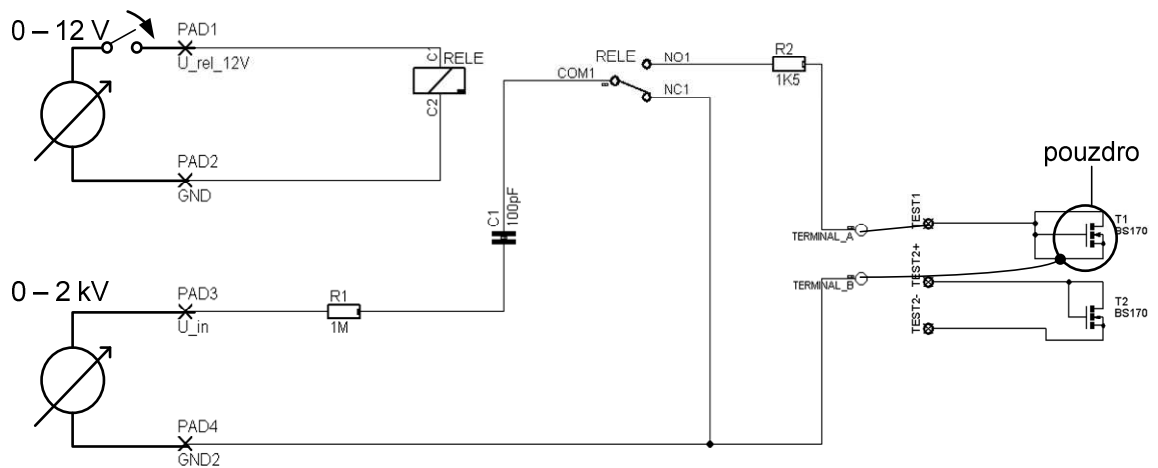
Dalším problémem pro tuto úlohu bylo najít takové součástky, které jsou citlivé na HBM ESD v nízkých hladinách napětí a budou běžně dostupné a levné. Určitě je potřeba zajistit více součástek, jelikož při tomto testování dochází i k totální destrukci. Jak již bylo uvedeno výše, úloha se zaměřuje na tranzistory, jak bipolární tak unipolární. Testovalo se několik tranzistorů. A to postupně na 125, 250, 500, 1000, 1500 voltů.

Nejprve se testuje tak, že se spojí všechny vývody tranzistoru a spojí se s terminálem A. Terminál B se spojí s pouzdrem součástky. Do součástky se přivede výboj a poté se přeměří její VA charakteristika. Pak se vezme nový tranzistor, spojí se báze s kolektorem (nebo gate s drain) a připojí se k terminálu A. Terminál B je spojen s emitorem (nebo source). Zpravidla bipolární tranzistory dobře odolávaly těmto výbojům, ale jak je uvedeno níže, k jistým poruchám docházelo, což šlo vyčíst z VA charakteristik. Naopak u unipolárních tranzistorů MOS FET pravidelně docházelo k značným poškozením, i totálnímu průrazu.

Podařilo se najít ideální tranzistor pro testování. Je jím tranzistor BS 170, který je opravdu citlivý na tento druh výbojů. V dnešní době zajistit takovou součástku je problém, jelikož nové tranzistory se již vyrábějí tak, aby těmto výbojům odolávaly. Toto měření se provede pro všechna napětí. Student by v závěru měření měl uvést vývoj VA charakteristik v závislosti na testovacím napětí. Zadání a znění celé laboratorní úlohy je uvedeno v příloze.

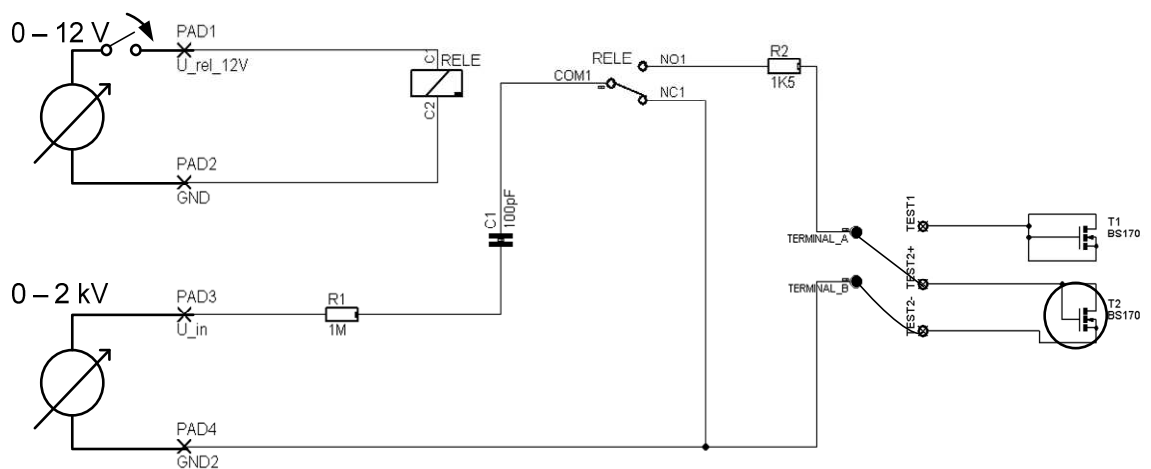
6.2 Schéma zapojení

Na obrázku 6.1 je uvedeno schéma zapojení pro první část testu. Jak již bylo uvedeno, tak terminál A se připojí na uni – desk do zdíčky TEST1 a terminál B pomocí krokosvorky k pouzdro tranzistoru.



Obr. 6.1 Schéma zapojení první části testování – TEST1

Po splnění všech testovacích úrovní se přechází k zapojení druhé části testování. Schéma je na obrázku 6.2. Je velice podobná té první, ale s tím rozdílem, že terminál A se připojí do zdíčky TEST2+ a terminál B do TEST2-. Do univerzálních trubiček se vloží nový tranzistor, ale je velice důležité dbát na to, aby nedošlo k záměně vývodů. Poté může test začít.



Obr. 6.2 Schéma zapojení druhé části testování – TEST2

K úloze samozřejmě patří měření VA charakteristik tranzistorů, ale toto schéma zde není uvedeno, jelikož student musí toto zapojení provést sám. Se zapojením tranzistoru byl student obeznámen již v dřívějších ročnících. K dispozici je propojovací pole, do kterého se tranzistor umístí a zapojí se do obvodu s odporovými dekádami, které jsou rovněž k dispozici v laboratoři.

6.3 Testované součástky

Pro účely této úlohy byly vybrány tyto tranzistory:

BS 170 N Kanál MOSFET



$U_{DSMAX} = 60 \text{ V}$; $U_{GS MAX} = 20 \text{ V}$
 $I_{D MAX} = 500 \text{ mA}$; $P_{D MAX} = 830 \text{ mW}$
ESD HBM = 2 kV
Pouzdro: TO – 92

Obr. 6.3 BS 170

BF 199 NPN BIPOLÁR



$U_{CE MAX} = 25 \text{ V}$; $U_{BC MAX} = 40 \text{ V}$
 $I_{C MAX} = 0,025 \text{ A}$; $P_{D MAX} = 0,5 \text{ W}$
ESD HBM = 2 kV
Pouzdro: TO – 92

Obr. 6.4 BF 199

6.4 Použité přístroje k měření

Nejdůležitějším přístrojem je vysokonapěťový zdroj KEITHLEY Model 248 (obrázek 6.5), který byl nastaven na rozsah od 125 V do 2010 V. Zdroj pro cívku relé byl použit laboratorní s rozsahem napětí od 0 V do 30 V / 0 – 3 A, který je vidět na obrázku 6.6. Jako zdroj, který sloužil k otvírání tranzistorů, byl použit M10 – SP – 305E (obrázek 6.7) s proměnným napětím od 0 V do 30 V / 0 – 3 A. Ten byl rovněž použit pro napětí U_{CE} a U_{DS} . Metex M – 3800 byly použity jako voltmetry a ampérmetry (obrázek 6.8). Jako zátěže pro tranzistory byly použity odporové dekády od COSINUS Mini Ω Dekade R1 – 1000 s tolerancí menší než 1 %. Tyto dekády (obrázek 6.8) byly použity i jako odporový dělič napětí, aby se dosáhlo jemnějšího nastavení proudu do báze bipolárního tranzistoru a rovněž i pro jemné nastavení napětí U_{GS} u tranzistoru unipolárního.



Obr. 6.5 Vysokonapěťový zdroj KEITHLEY 248



Obr. 6.6 Laboratorní zdroj 0 – 30 V



Obr. 6.7 Zdroj napětí M10 – SP – 305E



Obr. 6.8 Digitální multimetr METEX M - 3800



Obr. 6.9 Odporová mini dekáda

6.5 Postup měření

Nejprve se změří výstupní VA charakteristiky zdravého tranzistoru, nejméně pro tři vstupní hodnoty I_B nebo U_{GS} . Při jakékoliv manipulaci se součástkou je nutné mít nasazen zemnicí náramek, aby se předešlo nechtěnému poškození. Po změření VA charakteristik se tranzistor vloží do univerzální testovací desky do části TEST1. Provede se zapojení obvodu podle příslušného schématu zapojení. Důležité je neopomenout připojení terminálu B pomocí krokosvorky k pouzdru tranzistoru.

Nejprve se testuje pro napětí 125 V na UUT. Je tedy potřeba vynásobit požadované napětí konstantou 1,34 a nastavit na vysokonapěťovém zdroji 168 V. Mezitím se nabije kondenzátor a může se přistoupit k sepnutí relé. Pomocí tlačítka se sepne a rozepne relé. Přeměří se znovu VA charakteristiky pro stejné vstupní hodnoty. Zachování stejných vstupních hodnot je velice důležité, aby nedošlo ke zkreslení výsledků. Poté se opět vloží tranzistor do testeru a provede se testování pro 250 V (na zdroji 335 V). Tento postup se opakuje pro všechna napětí tudíž 125, 250, 500, 1000, 1500 V.

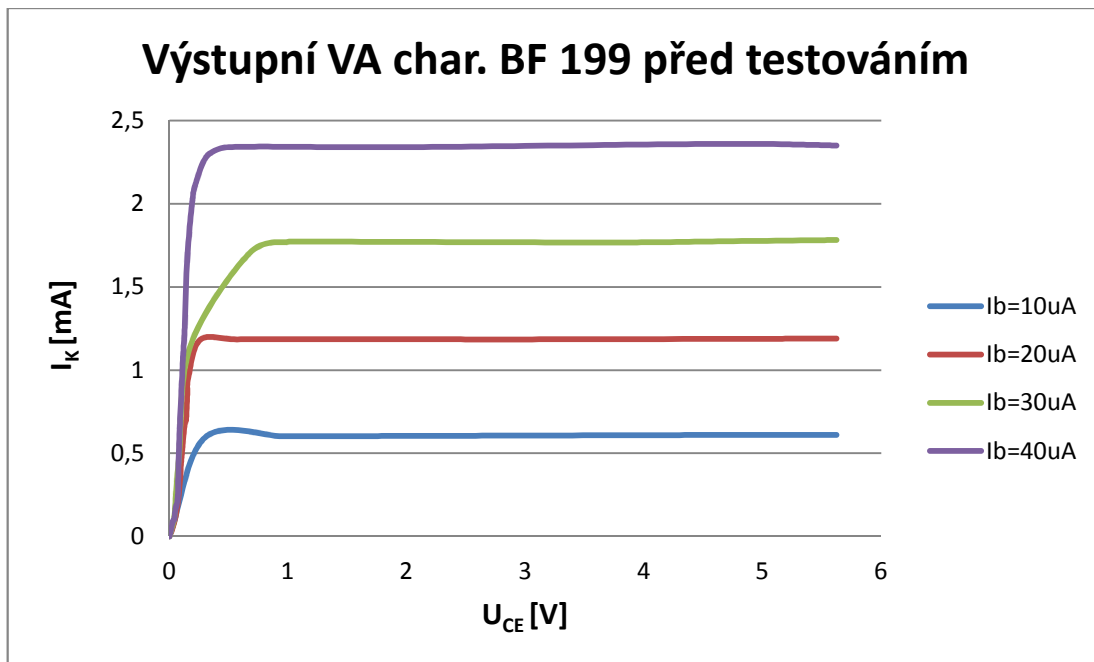
Druhá část testování je velice podobná. Je nutné použít nový tranzistor a opět přeměřit jeho výstupní VA charakteristiky před samotným testováním. Jediný rozdíl je umístění testovaného tranzistoru do testeru. Vloží se do části TEST2 a zapojí podle příslušného schématu zapojení. Postup měření je stejný jako v předchozím případě.

Při testování pro napětí vyšší než 500 V je nutné dbát zvýšené opatrnosti. Před započítím testováním by měl vyučující provést kontrolu správnosti zapojení!

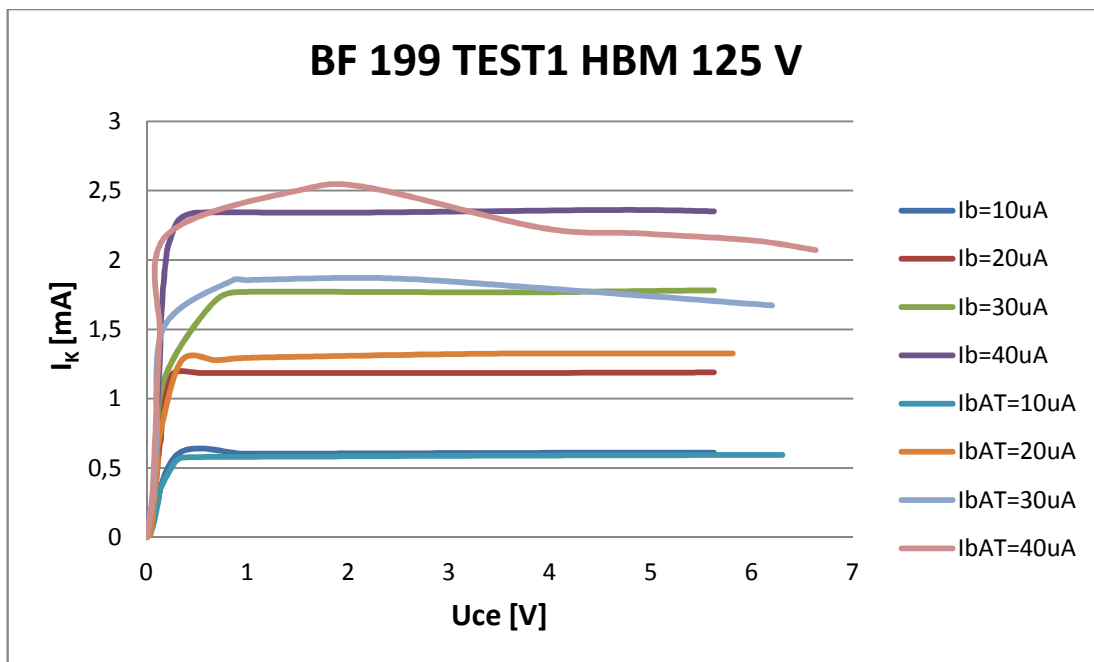
6.6 Výsledky měření

6.6.1 Měření citlivosti bipolárního tranzistoru BF 199 na ESD HBM

Voltampérové charakteristiky zdravého tranzistoru jsou uvedeny na obrázku 6.10. Je vidět, že tranzistor pracuje správně.



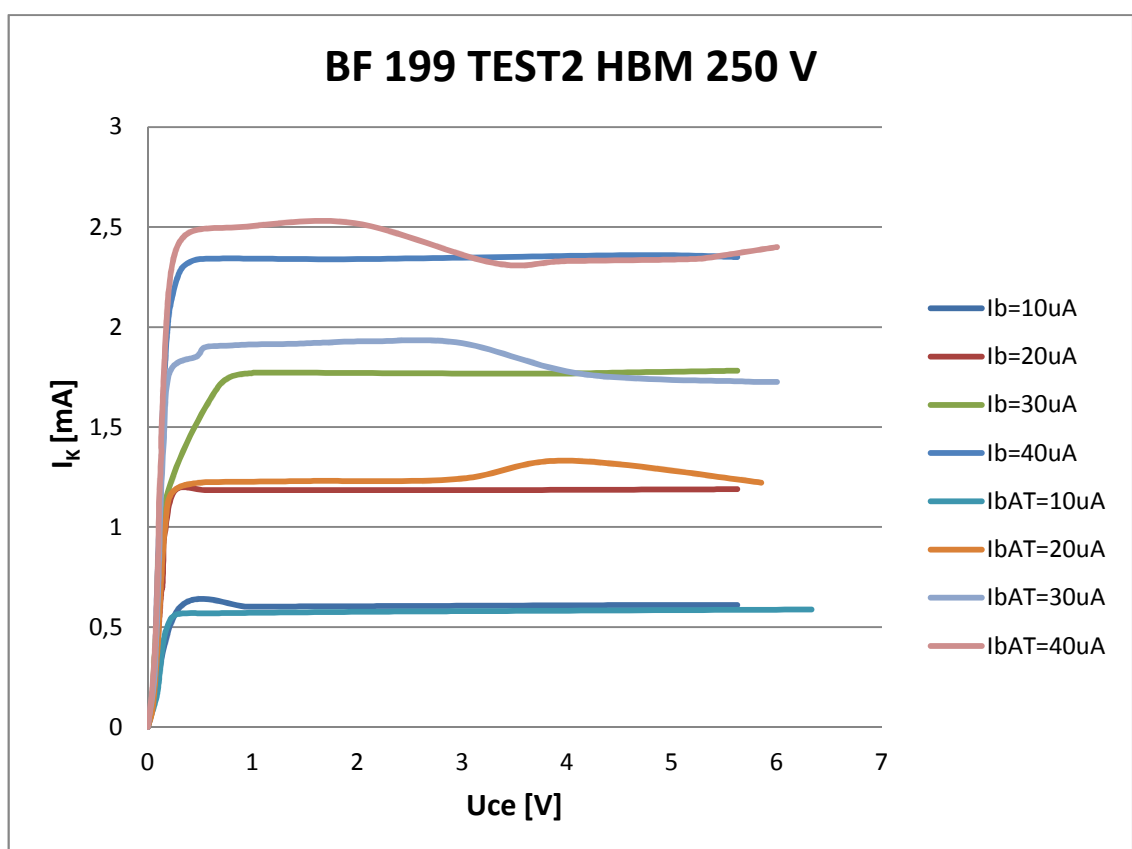
Obr. 6.10 Výstupní VA charakteristiky tranzistoru BF 199 před testováním



Obr. 6.11 Výstupní VA charakteristiky BF 199 po TEST1 HBM 125 V

Na obrázku 6.11 je vidět, že už při výboji TEST1 HBM 125V došlo ke změně VA char. při vyšších hodnotách proudu do báze. Při zachování stejných vstupních hodnot teče kolektorem vyšší proud. Po dalším testování bylo zjištěno, že tvar charakteristik se do 1500 V již neměnil a nedošlo tudíž ke zničení tranzistoru. Bipolární tranzistory jsou obecně méně citlivé, než unipolární tranzistory.

V druhé části testování (TEST2) byly naměřeny velice podobné výsledky. Při výboji 125 V došlo opět mírné změně tvaru charakteristik. A tento tvar již zůstal zachován i při napětí 250 V (obrázek 6.12). Z grafu je vidět, že došlo ve vnitřní struktuře k mírnému poškození.

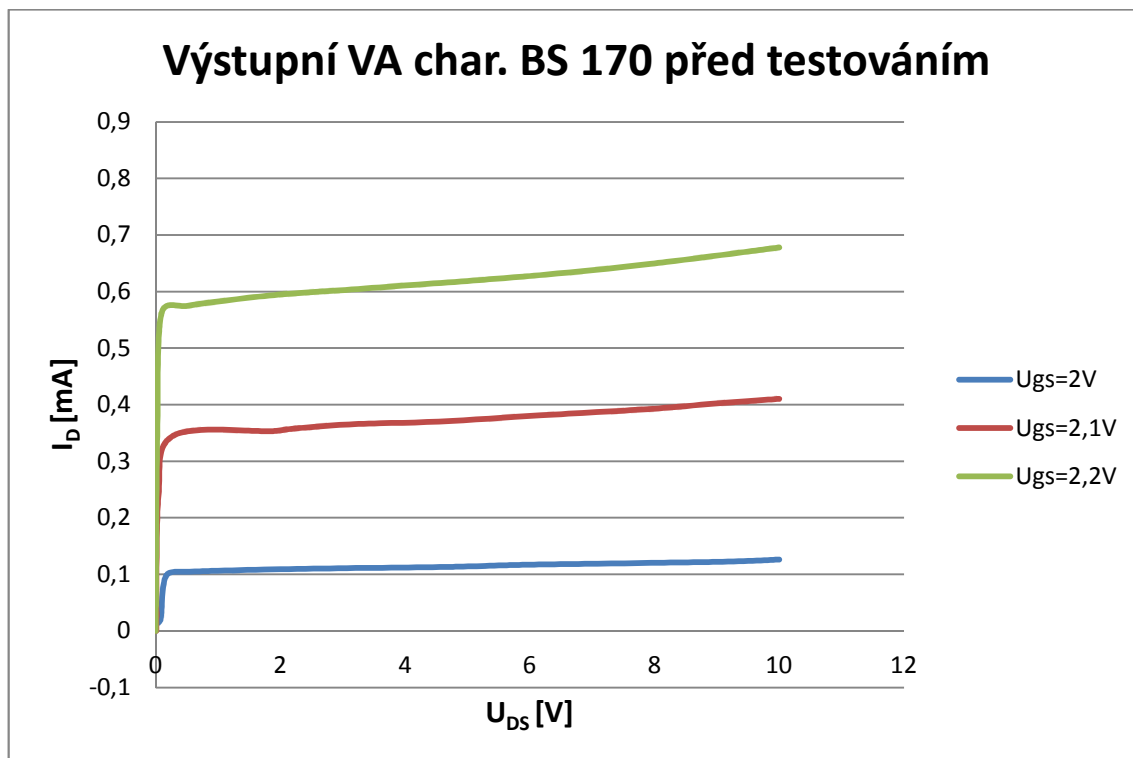


Obr. 6.12 Výstupní VA charakteristiky BF 199 po TEST2 HBM 250 V

Měření bylo několikrát zopakováno a se stejným výsledkem. Ačkoliv došlo k nepatrným změnám, tranzistor si zachoval svou schopnost. Ale důležité je, že ke změnám opravdu došlo a výboj HBM zanechal na tranzistoru mírné poškození.

6.6.2 Měření citlivosti unipolárního tranzistoru BS 170 na ESD HBM

Začíná se stejně jako u předchozího tranzistoru. Nejprve se změří výstupní charakteristiky tohoto tranzistoru a to nejméně pro tři vstupní hodnoty napětí. (obrázek 6.13).

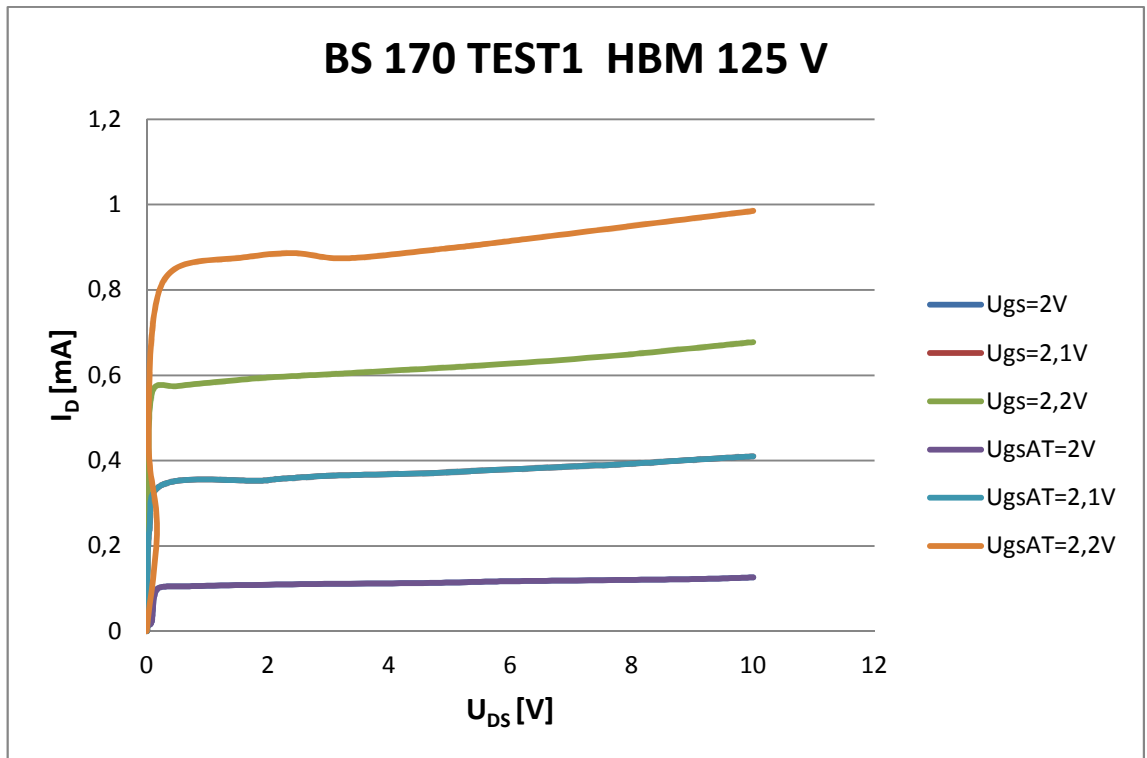


Obr. 6.13 Výstupní VA charakteristiky tranzistoru BS 170 před HBM testováním

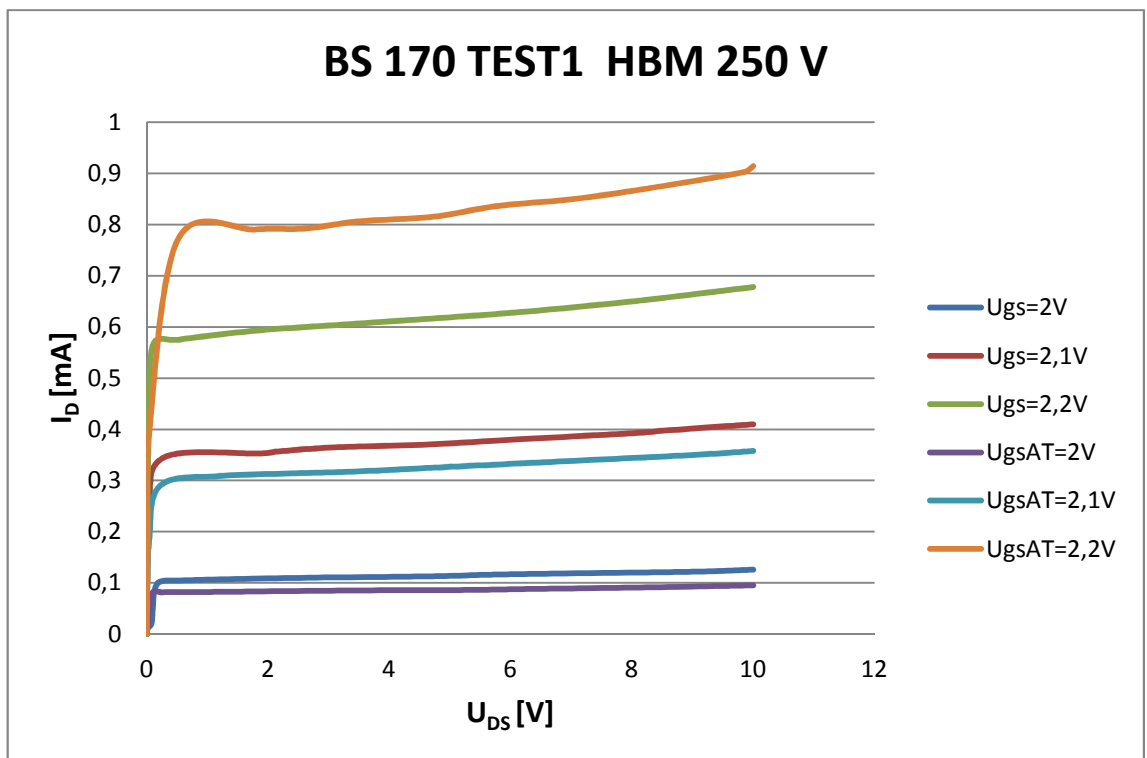
Nejprve se provede TEST1. To znamená, že všechny tři vývody tranzistoru jsou spojené s terminálem A a terminál B je spojen pomocí krokosvorky s pouzdem tranzistoru. Postupuje se stejným způsobem jako v testování bipolárního tranzistoru.

Již po první úrovni testu (obrázek 6.14), je vidět razantní změna, ale opět jen při vyšších vstupních hodnotách na gate tranzistoru. Pro 2 V a 2,1 V jsou hodnoty stejné, ale při vyšším napětí na vstupu tranzistoru je vidět razantní nárůst proudu I_D o 0,307 mA za stejných podmínek jako před testem. To je jasný důkaz, že již při tak malé hodnotě napětí došlo k poškození.

Další úroveň testu je 250V (obrázek 6.15). Po tomto výboji jsou patrné změny již při napětí na gate 2 V. Proud se pro tyto hodnoty již také změnil. To stejné platí i pro následující hodnotu 2,1 V.

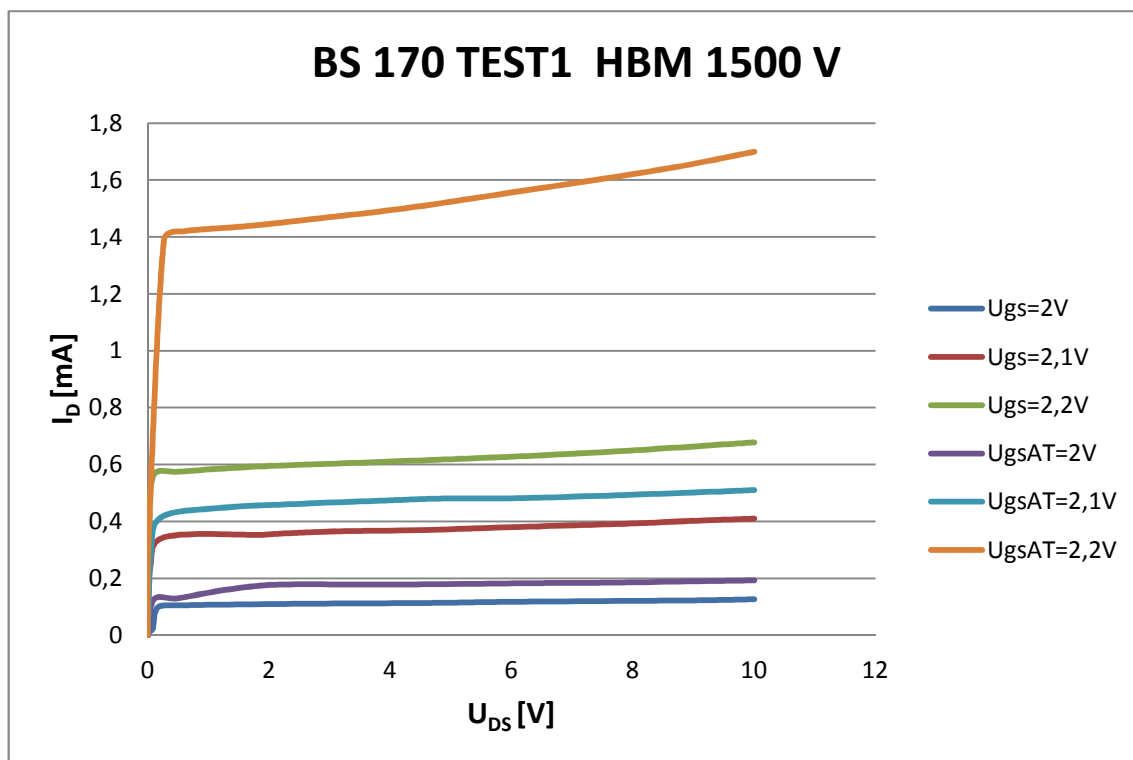


Obr. 6.14 Výstupní VA charakteristiky BS 170 po TEST1 HBM 125 V



Obr. 6.15 Výstupní VA charakteristiky BS 170 po TEST1 HBM 250 V

Pro velikosti napětí 500 V a 1000 V se měnili charakteristiky stejným způsobem. Opět nejvíce narůstal proud při napětí 2,2V, proto není nutné je zde uvádět. K největší změně došlo při úrovni napětí 1500 V (obrázek 6.16), proud stoupl až na 1,7 mA při napětí $U_{GS} = 2,2$ V. Je zřejmé, že výboje HBM tento tranzistor ztelně poškozuji.



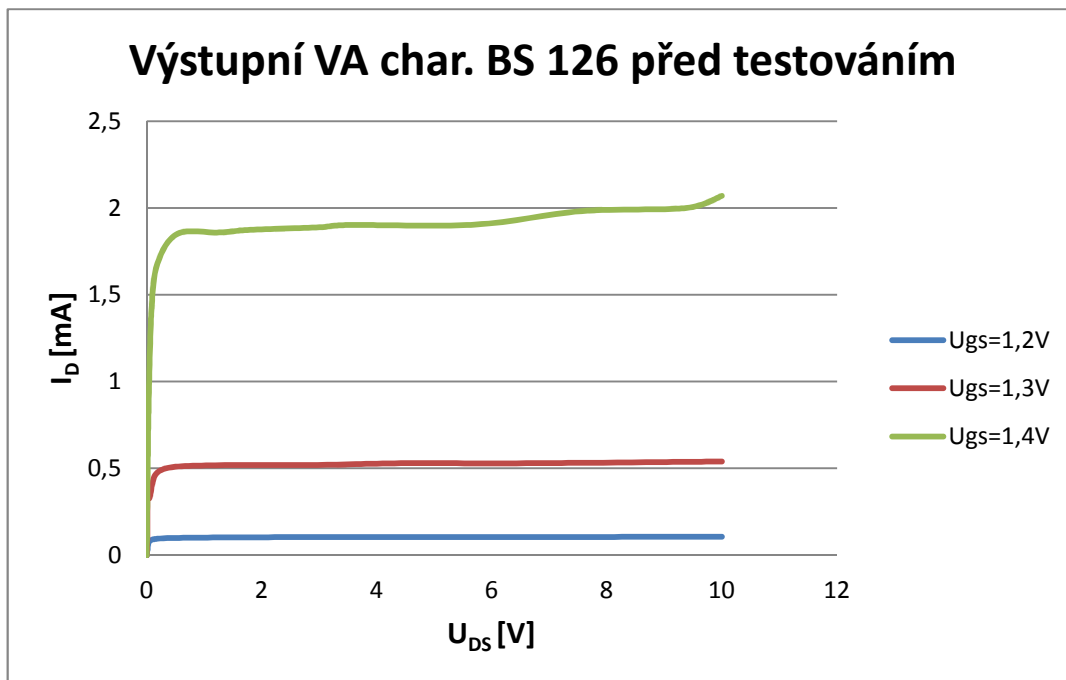
Obr. 6.16 Výstupní VA charakteristiky BS 170 po TEST1 HBM 1500 V

Druhá část měření (TEST2) byla velice krátká. Jelikož už při napětí 125 V došlo k totálnímu zničení součástky. Došlo k průrazu, jelikož i po odpojení napětí na gate stále protékal proud. Toto i předchozí měření na tomto tranzistoru byla několikrát zopakována se stejným výsledkem. Ale byla potřeba zjistit, při jakém napětí se tedy tranzistor prorazí.

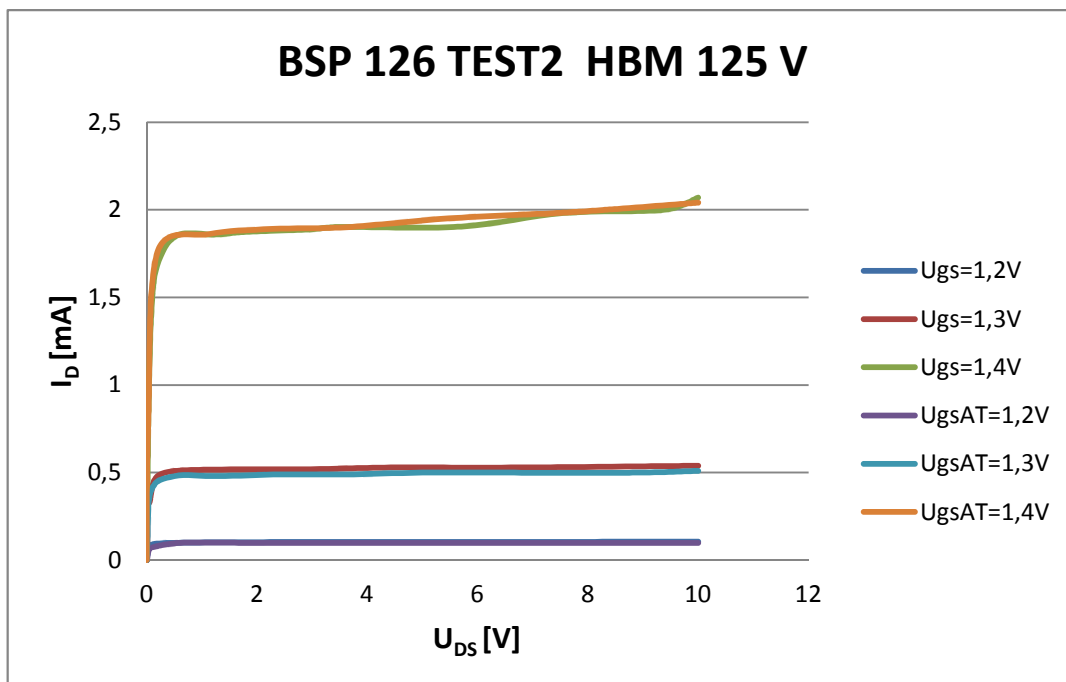
Byl použit nový tranzistor první hodnota napětí TEST2 byla 20 V. Po tomto výboji nedošlo k žádné změně. Další napětí bylo 40 V, při této hodnotě již došlo k poškození, které bylo zaznamenáno v předchozích měřeních. Došlo k prudkému nárůstu proudu. Z těchto důvodů další hodnotou bylo 50 V, při které nedošlo k radikální změně. Takto se postupovalo až do napětí 90V, kde byl tranzistor proražen. Stejnou metodou bylo otestováno ještě několik tranzistorů a bylo dosaženo stejného výsledku.

Aby se dostatečně ověřilo to, že MOSFET tranzistory jsou opravdu citlivé na ESD HBM byl do měření přijat ještě jeden tranzistor BSP 126, který ovšem nebude obsažen v laboratorní úloze. V tomto případě slouží pouze k ověření.

Na obrázku 6.17 je uvedena výstupní charakteristika tohoto tranzistoru před testováním. Po testu na TEST2 125V nedochází k žádným změnám (6.18).



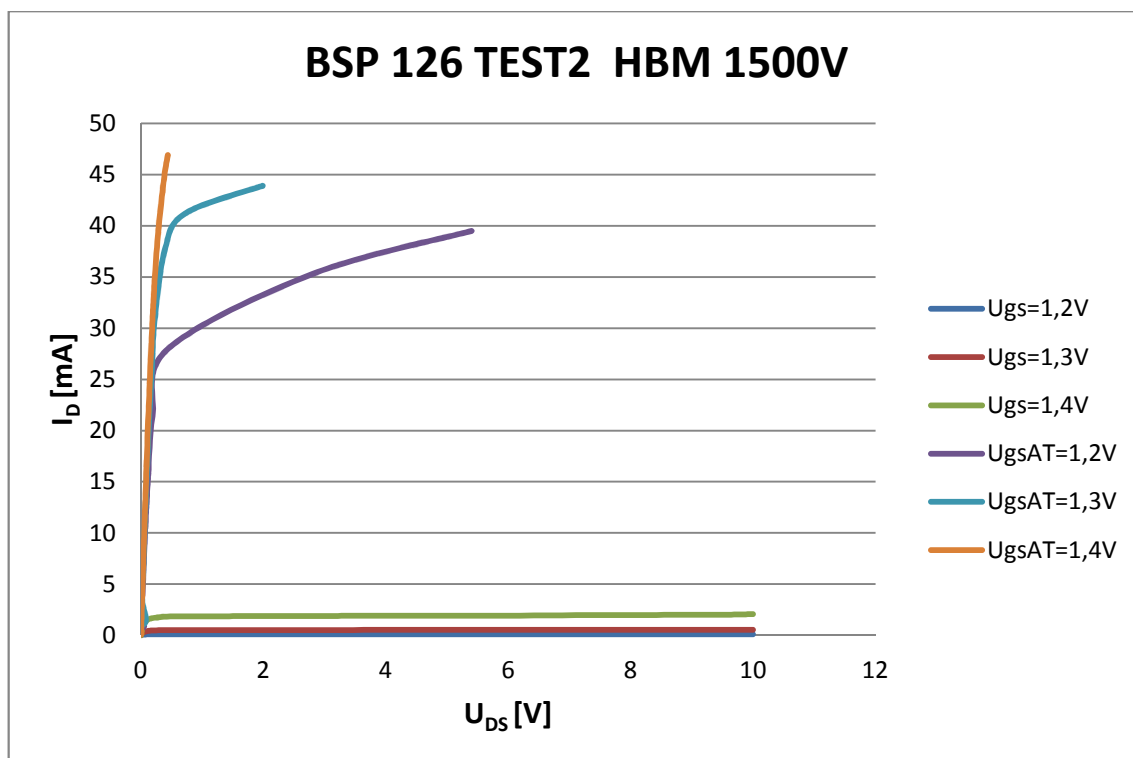
Obr. 6.17 Výstupní VA charakteristiky tranzistoru BSP 126 před HBM testováním



Obr. 6.18 Výstupní VA charakteristiky BSP 126 po TEST2 HBM 125 V

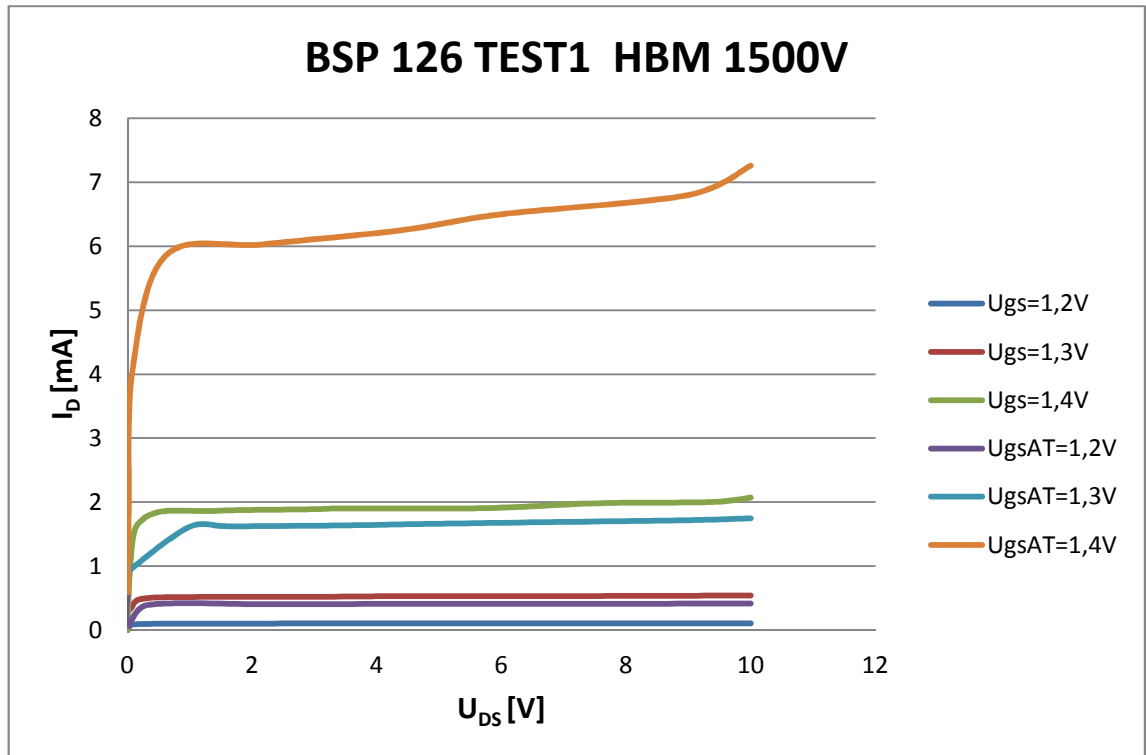
Až do 500 V nedocházelo k žádnému poškození. Ale při napětí 1000V opět dochází k prudkému nárůstu proudu a to pro všechna vstupní napětí. Dále začal protékat klidový proud 0,17 mA, který před tímto výbojem v žádném případě neprotékal, ale stále nedošlo k průrazu. Při stejných podmínkách $U_{GS} = 1,2 \text{ V} / U_{DS} = 10 \text{ V}$ dosahujeme šestnáctinásobného proudu. Předpokládalo se, že při napětí 1500 V dojde k totálnímu zničení součástky.

Při maximálním testovacím napětí (obrázek 6.19) došlo k ještě výraznějšímu poškození než u 1 kV, ale stále nebyl tranzistor proražen, jelikož po odebrání vstupního napětí tekla jen klidový proud a po zvětšení napětí na zátěži byl proud stále stejný. Nicméně je obtížné nastavit napětí na vstupu, protože se neustále mění se změnou napětí na source, což se u zdravého tranzistoru v žádném případě neděje - tranzistor je značně poškozen. Pokud by byl k dispozici větší zdroj napětí, proud by stále prudce stoupal a při hodnotě 375 mA by tranzistor shořel. Závěrem z toho plyne, že sice stále funguje ovládání kanálu napětím na gate, ale totálně se změnila jeho vlastnosti. Navíc je zajímavé, že výrobce uváděl ESD HBM 2 kV a přitom už při napětí ESD HBM 1 kV docházelo k poškození. Tato zjištění je znepokojující.



Obr. 6.19 Výstupní VA charakteristiky BSP 126 po TEST2 HBM 1500 V

Na tomto tranzistoru bylo nejdříve provedeno testování TEST2. TEST1 dopadl velice podobně. Opět při napětí 1 kV došlo k razantním změnám, ale nikoliv takových rozměrů jako u TEST1. Nicméně tranzistor je po tomto testu také nepoužitelný. Maximální poškození je prezentováno na obrázku 6.20.



Obr. 6.20 Výstupní VA charakteristiky BSP 126 po TEST1 HBM 1500 V

Pro účely této úlohy byla ještě testována Zenerova dioda, na které se žádný pulz neprojevil a proto není zařazena do tohoto měření.

6.7 Zhodnocení

Úkolem tohoto měření bylo určit, jak citlivé jsou součástky (v našem případě tranzistory) na elektrostatický výboj a určit nejdůležitější parametry testování jejich odolnosti. Z měření vyplývá, že nejvíce citlivé jsou MOSFET tranzistory, kde dochází při každém větším pulzu k většímu poškození až k destrukci. Bipolární tranzistory jsou odolnější.

U bipolárního tranzistoru BF 199 uváděl výrobce, že vydrží ESD HBM 2kV. V tomto případě výrobce uváděl pravdivou hodnotu, jelikož nedošlo k výraznému poškození. Tudíž součástku řadíme do třídy **1C**.

Na druhou stranu unipolární tranzistor BS 170 při TEST2 nevydržel 125V a po podrobnějším zkoumání se zjistilo, že neodolal napětí 90V. Výrobce tento tranzistor řadí do třídy 1C, ale tomto případě je nutné tranzistor zařadit do třídy **0** – velmi citlivá součástka na ESD. Rovněž je tomu tak u tranzistoru BSP 126, kde výrobce uvádí třídu 1C. Při testování bylo zjištěno, že dochází k výraznému poškození při napětí menším, než je 1000 V a proto je v tomto měření zařazen do třídy **1B**.

Výstupem tohoto měření jsou také nejdůležitější parametry testování. Jedním z nejdůležitějších parametrů celého testování je doba náběhu testovacího pulzu a jeho špička. Pokud jsou tyto parametry splněny, je možné tyto součástky testovat. I přesto, že se jedná pouze o demonstrativní laboratorní úlohu, bylo dosaženo skvělých výsledků a tyto nejdůležitější parametry byly s velkou rezervou splněny.

Konkrétním parametrem testování tranzistorů je změna jejich proudů I_K a I_D . To je veličina, která se v závislosti na velikosti ESD HBM mění nejvíce.

7 Závěr

Tato diplomová práce se zabývala problematikou „Testování citlivosti elektronických součástek na elektrostatické jevy v laboratorních podmínkách.“ Cílem bylo seznámit se s klasifikací odolnosti elektronických součástek proti ESD a metodami jejího ověřování. Dále stanovit nejdůležitější parametry testování v laboratorních podmínkách a následně navrhnout soubor měřících úloh k měření vybraných parametrů. S tím úzce souvisí návrh a výroba měřícího přípravku pro názornou demonstraci vybraných testovacích metod, v našem případě HBM.

Všechny výše uvedené body jsem zpracoval tak, aby i čtenář netechnického charakteru našel na všechny otázky odpověď a naučil se tak novým poznatkům.

V úvodu jsem se zabýval historií a také tím, proč jsou v dnešní době tyto elektrostatické výboje pro integrované výboje tak nebezpečné. Dále jsem popsal, co je to elektrostatický výboj, kde vzniká a proč. Také jsem uvedl, že povrchová rezistivita úzce souvisí s elektrostatikou. Následoval popis poruch, které mohou nastat při elektrostatickém výboji, a uvedl jsem zde několik fotografií, kde bylo jasně vidět poškození vnitřní struktury integrovaných obvodů. Poté následovala jedna z hlavních kapitol této práce – popis testovacích metod.

V této kapitole jsem se zaměřil hlavně na HBM a čerpal jsem jak z norem IEC tak hlavně z norem JEDEC. Zjistil jsem, že například norma pro CDM není prozatím v České republice k dispozici. Což mě přivádí do rozpaků, jelikož v tomto modelu dochází k poškození při mnohem menších úrovních napětí, než u HBM. V této části práce je také zmíněná historie těchto modelů, ale na druhou stranu i budoucnost některých modelů.

Jak bylo řečeno v úvodu, v dnešní době dochází k neustálému technickému vývoji, a proto by se měla vyvíjet i tato problematika. Z tohoto důvodu jsem zařadil do této práce část, která se zabývá stavem těchto modelů v roce 2012. Po přečtení této části, si určitě většina čtenářů uvědomí, že i v zavádění norem a nových modelů, může dojít k pochybení. Týká se to hlavně Machine Modelu. S převratným sdělením M. Tanaky na celosvětovém sjezdu JEDEC naprosto souhlasím a myslím si, že MM je jen zbytečný luxus v celém testování.

Další a stěžejní kapitolou byla praktická část. Kde popisují návrh a realizaci měřícího přípravku. Nejprve v části teoretický rozbor detailně popisují, jak probíhal návrh tohoto přípravku od počátečních odhadů až po samé testování. Potýkal jsem se s řadou problémů a to jak technického rázu tak i ekonomického. Dokonce jsem do této práce vložil i vlastní

prostředky k dosažení cíle. Jelikož při měření dosahujeme vysokého napětí, musel jsem úlohu upravit tak, aby byla pro studenty bezpečná. Nicméně i po úpravě je nutná zvýšená opatrnost. Konečný výsledek byl velice uspokojivý, přípravek fungoval tak jak měl, až dokonce překonal očekávání mého oponenta.

Jedním z bodů zadání diplomové práce bylo, určitě nejdůležitější parametry testování. Tento bod byl splněn a bylo zjištěno, že nejdůležitějším a rozhodujícím parametrem testování je doba náběhu HBM impulsu a jeho napěťová špička. Pokud impuls nedosáhne špičky za dobu 10 ns, považujeme tuto zkoušku za neplatnou, protože výboj z lidského těla dosahuje jedině takto rychlých výbojů.

V tomto případě se testují tranzistory, tudíž mohu určitě i nejdůležitější parametry testování pro tyto součástky. Bylo zjištěno, že nejčastější změny jsou změny proudu v kolektoru nebo source. U některého testování došlo i ke změně tvaru křivek, ale změna proudu byla nejčastější. Jak bylo popsáno v části o typech poškození, docházelo k postupné degradaci přechodů v tranzistoru vlivem výboje HBM.

Jednou z nejdůležitějších částí této práce jsou výsledky měření, kde jsou uvedeny VA charakteristiky tranzistorů a jejich postupné změny během testování. Všechny výrazné změny charakteristik jsou v textu. Pro tuto část práce jsou stěžejní obrázky, kde jsou vidět razantní rozdíly mezi zdravými a poškozenými tranzistory.

Do praktické části práce mimo jiné patří i návrh souboru měřících úloh, kde je možné demonstrovat testovací metody. Tento bod zadání se také podařilo splnit. Výstupem je měřící úloha, kde si studenti zopakují měření VA charakteristik tranzistorů, provedou jejich teoretický rozbor, základní rozbor HBM a přesvědčí se, že ESD je reálná hrozba, které se musí v dnešní době čelit. Jak jsem se již zmínil, bude se používat HBM test.

K závěru bych chtěl ještě jednou zdůraznit to, že se podařilo splnit všechny body zadání a to zejména najít součástky, které budou pro tuto laboratorní úlohu ideální. Jelikož úloha bude zařazena do výuky, dojde ke zničení většího počtu součástek a pokud by byly drahé, bylo by to ekonomicky nevýhodné. Proto jsem velice rád, že jsem našel kompromis. Běžně dostupná a levná součástka, tranzistor BS 170.

Když zhodnotím poznatky, které mi tato práce přinesla, tak mohu říct, že ESD je velice vážný problém, ne jen při výrobě IO, ale v některých případech zmařil i lidské životy. Nicméně cítím, že odborná společnost se tomuto problému věnuje stále důrazněji, než tomu bylo v nedávných letech.

8 Použitá literatura

- [1] SVAČINA, Jiří. *Elektromagnetická kompatibilita: přednášky*. Brno, 2002. Přednášky. VUT v Brně.
- [2] ŠÍMA, Milan. *Elektrostatický výboj: přednášky*. Plzeň, 2008. Přednášky. ZČU FEL v Plzni.
- [3] HORSKÝ, Pavel. Elektrostatický výboj (ESD) a testování jeho vlivu u integrovaných obvodů. *Automa: časopis pro automatizační techniku* [online]. 2009, roč. 2009, č. 11, s. 43-47 [cit. 2012-02-12]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/pdfclick.php?id=39904>
- [4] Rozdělení materiálů z hlediska elektrostatiky. In: *Antistatika.cz: Služby a servis pro antistatické prostory* [online]. 27.05.2010 [cit. 2012-02-12]. Dostupné z: <http://www.antistatika.cz/obecne/rozdeleni-materialu-z-hlediska-elektrostatiky/>
- [5] *Encyklopedie EMC* [online]. 2004 [cit. 2012-02-16]. Dostupné z: <http://www.radio.feec.vutbr.cz/emc/index.php?src=home>
- [6] HORSKÝ, Pavel. Poškození integrovaných obvodů vlivem elektrostatického výboje. *Electronic Engineering Magazine*[online]. 2008, roč. 2008, č. 2, s. 29-31 [cit. 2012-02-16]. Dostupné z: http://www.infocube.cz/images/eem/clanky/Poskozeni%20integrovanych%20obvodu_29-31.pdf
- [7] ČSN EN 61340-5-1. *Ochrana elektronických součástí před elektrostatickými jevy: Všeobecné požadavky*. 2. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [8] Fundamentals of Electrostatic Discharge: Part five - Device Sensitivity and Testing. In: *Fundamentals of Electrostatic Discharge* [online]. Rome, NY, 2010 [cit. 2012-03-20]. Dostupné z: www.esda.org/documents/FundamentalsPart5.pdf
- [9] HORSKÝ, Pavel. Elektrostatický výboj a jeho vliv na spolehlivost integrovaných obvodů. *Automa: časopis pro automatizační techniku* [online]. 2009, roč. 2009, č. 12 [cit. 2012-04-15]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39904.pdf>
- [10] ČSN EN 61340-3-1 ed. 2. *Metody simulace elektrostatických jevů: Časové průběhy elektrostatického výboje pro model lidského těla (HBM)*. 2. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2007.

- [11] ANSI/ESDA/JEDEC JS-001-2011. *For Electrostatic Discharge Sensitivity Testing: Human Body Model (HBM) - Component Level*. 2. vyd. Rome, NY 13440: Electrostatic Discharge Association, 2011.
- [12] MACH, Pavel; SKOČIL, Vlastimil; URBÁNEK, Jan. *Montáž v elektronice*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. 440 s.
- [13] ANSI/ESD S5.3.1-2009. *For Electrostatic Discharge Sensitivity Testing: Charged Device Model (CDM) - Component Level*. Rome, NY 13440: American National Standard, 2009.
- [14] ANSI/ESD S5.2-2009. *For Electrostatic Discharge Sensitivity Testing: Machine Model (MM) - Component Level*. Rome, NY 13440: American National Standard, Approved January 6, 2010.
- [15] ČSN EN 61340-3-2 ed. 2. *Metody simulace elektrostatických jevů: Časové průběhy elektrostatického výboje pro strojový model (MM)*. 2. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [16] *White Paper 2: A Case for Lowering Component Level CDM ESD Specifications and Requirements* [online]. 2. vyd. 2010[cit. 2012-05-08]. Dostupné z: <http://www.esda.org/documents/IndustryCouncilWhitePaper2.pdf>
- [17] DESCO INDUSTRIES, INC. *Classifications: 3 classifications based on 3 different ESD models*. East Coast: One Colgate Way, Canton, MA 02021, 2010. Dostupné z: <http://www.desco.com/PDF/Classifications.pdf>

9 Seznam příloh

1. Zadání laboratorní úlohy – Měření citlivosti unipolárních a bipolárních tranzistorů na elektrostatický výboj ESD HBM

MĚŘENÍ CITLIVOSTI UNIPOLÁRNÍCH A BIPOLÁRNÍCH TRANZISTORŮ NA ELEKTROSTATICKÝ VÝBOJ ESD HBM

ZADÁNÍ

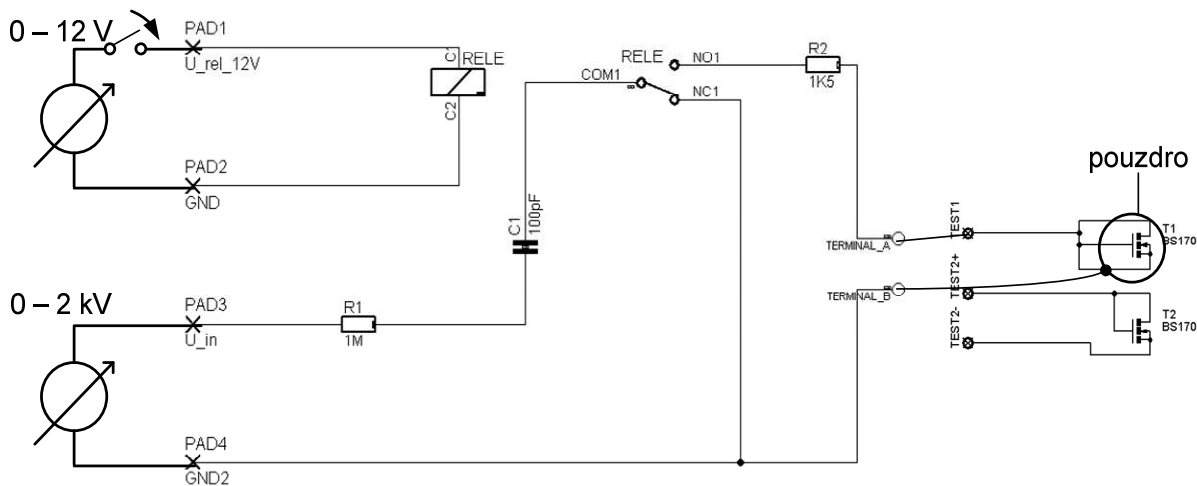
1. **Při veškeré manipulaci se součástkami se přesvědčte, že máte nasazený zemnicí náramek.** Seznamte se s bipolárním tranzistorem BF 199, určete jeho mezní hodnoty, a změřte jeho výstupní charakteristiky pro $I_B = 10, 20, 30, 40 \mu\text{A}$. K měření použijte propojovací pole. Před měřením zjistěte uspořádání vývodů tohoto tranzistoru.
2. Proved'te HBM TEST1 a to pro napětí: 125, 250, 500, 1000, 1500 V⁴ Po každém napětí přeměřte výstupní charakteristiky a změny vyhodno'tte. Na novém tranzistoru proved'te HBM TEST2 pro stejná napětí a opět po každém napětí přeměřte výstupní charakteristiky a vyhodno'tte změny, pokud nějaké nastaly. Pozor, nepřekračujte mezní hodnoty tranzistoru.
3. Seznamte se s unipolárním tranzistorem BS 170, určete jeho mezní hodnoty a změřte jeho výstupní charakteristiky pro $U_{GS} = 2; 2,1 \text{ a } 2,2 \text{ V}$. K měření použijte propojovací pole. Před měřením zjistěte uspořádání vývodů tohoto tranzistoru, aby nedošlo k záměně.
4. Proved'te HBM TEST1 stejným způsobem jako je uvedeno v bodě 1. Opět vyhodno'tte změny, pokud nastaly. Proved'te HBM TEST2 s novým tranzistorem a vyhodno'tte změny.
5. Určete, do jaké třídy HBM součástky patří a která je nejvíce citlivá na ESD

TEORETICKÝ ÚVOD

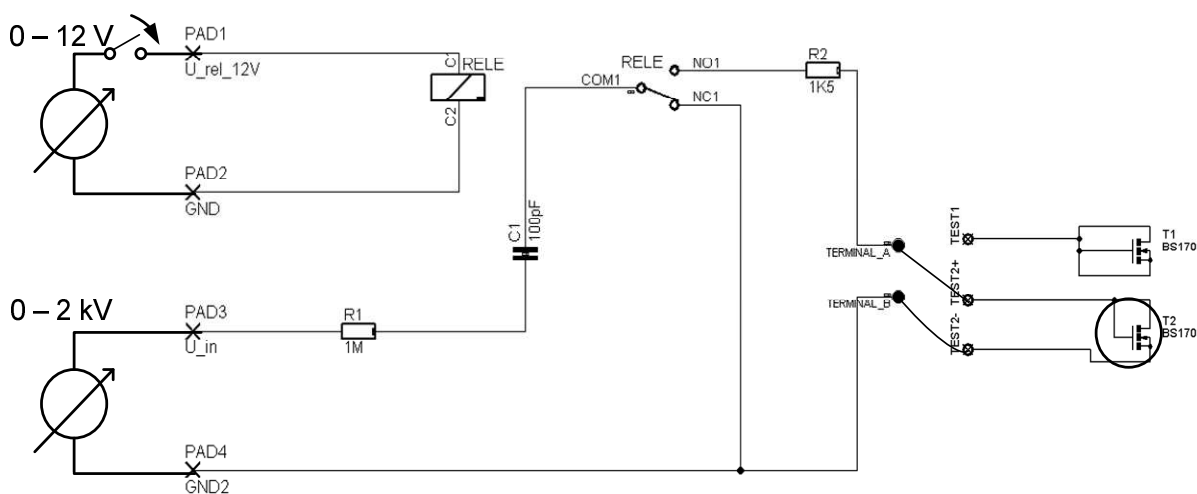
- Human Body Model, klasifikace dle tříd, základní vlastnosti
- Unipolární a bipolární tranzistor, vlastnosti, rozdíly, použití

⁴ Aby na zkoušené jednotce bylo požadované napětí, musí se vynásobit konstantou 1,34. Např. pro požadované napětí 125V nastavíme na zdroji 167V.

SCHÉMA ZAPOJENÍ



Obr. 1.0 Schéma zapojení pro HBM TEST1



Obr. 1.1 Schéma zapojení pro HBM TEST2

POSTUP MĚŘENÍ

Nejprve změřte výstupní VA charakteristiky zdravého tranzistoru, nejméně pro tři vstupní hodnoty I_B nebo U_{GS} . Při jakékoliv manipulaci se součástkou je nutné mít nasazen zemní náramek, aby se předešlo nechtěnému poškození. Po změření VA charakteristik vložte tranzistor do univerzální testovací desky do části TEST1. Provedte zapojení obvodu podle příslušného schématu zapojení. Důležité je neopomenout připojení terminálu B pomocí krokosvorky k pouzdru tranzistoru.

Nejprve testujte pro napětí 125 V na UUT. Je tedy potřeba vynásobit požadované napětí konstantou 1,34 a nastavit na vysokonapětovém zdroji 168 V. Mezitím se nabije kondenzátor a může se přistoupit k sepnutí relé. Pomocí tlačítka sepněte a rozepněte relé. Přeměřte znovu VA charakteristiky pro stejné vstupní hodnoty. Zachování stejných vstupních hodnot je velice důležité, aby nedošlo ke zkreslení výsledků. Poté opět vložte tranzistor do testeru a provede se testování pro 250 V (na zdroji 335 V). Tento postup se opakuje pro všechna napětí tudíž 125, 250, 500, 1000, 1500 V.

Druhá část testování je velice podobná. Je nutné použít nový tranzistor a opět přeměřit jeho výstupní VA charakteristiky před samotným testováním. Jediný rozdíl je umístění testovaného tranzistoru do testeru. Vloží se do části TEST2 a zapojí podle příslušného schématu zapojení. Postup měření je stejný jako v předchozím případě.

Při testování pro napětí vyšší než 500 V je nutné dbát zvýšené opatrnosti. Před započítím testováním by měl vyučující provést kontrolu správnosti zapojení!