



Fakulta elektrotechnická
Katedra technologií a měření

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Přípravek pro měření dynamických charakteristik diod

Autor práce: Bc. Ladislav Rubáš
Vedoucí práce: Ing. Tomáš Blecha, Ph.D.

Plzeň 2016

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ladislav RUBÁŠ**
Osobní číslo: **E14N0031P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Přípravek pro měření dynamických charakteristik diod**
Zadávací katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Seznamte se se základními typy polovodičových diod a jejich vlastnostmi.
2. Vytipujte vhodné typy diod pro měření dynamických parametrů.
3. Navrhněte schéma zapojení pro měření dynamických parametrů diod.
4. Navržené schéma prakticky realizujte jako měřicí přípravek.
5. Ověřte funkci přípravku na vytipovaných diodách.

Doporučená spolupráce studenta v průběhu celého akademického roku.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah kvalifikační práce: **40 - 60 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


1. **PINKER, Jiří a KOUCKÝ, Václav. Analogové elektronické systémy. 1. a 2. část. 4. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2010. 2 sv. ISBN 978-80-7043-917-3**
2. **MAŤÁTKO, Jan. Elektronika. 5. vyd., v Idea servis 3. Praha: Idea servis, 2002. 325 s. ISBN 80-85970-42-2**
3. **Datové listy použitých součástek**

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Blecha, Ph.D.**
Katedra technologií a měření

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2015**
Termín odevzdání diplomové práce: **16. května 2016**


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem, realizací a ověřením přípravku pro měření dynamických charakteristik diod. Jedná se o přípravek, na kterém se bude měřit doba zotavení vytipovaných diod. Teoretická část práce se napřed zabývá popisem PN přechodu a jeho vlastnostmi. Následně je v práci popis základních typů diod včetně jejich vlastností. V praktické části se práce zabývá detailním návrhem všech funkčních bloků, ze kterých je přípravek zkonstruován. V závěru práce jsou pak zhodnoceny naměřené hodnoty funkčního prototypu přípravku a je navrženo nové zadání měřicí úlohy pro studenty.

Klíčová slova

Dioda, doba zotavení, kapacita PN přechodu, relaxační generátor, měřicí přípravek.

Abstract

Rubáš, Ladislav. *Equipment for diode dynamic parameters measurement [Přípravek pro měření dynamických charakteristik diod]*. Pilsen, 2016. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Technologies and Measurement. Supervisor: Tomáš Blecha

This diploma thesis deals with the equipment for diode dynamic parameters measurement. Diploma thesis is focused on design of the device for diodes recovery time measurement. The theoretical part describes the PN junction and its properties. Then the work follows a description of the basic types of diodes, after that describes their properties. The practical part deals with the detailed design of all functional blocks. The final part contains an evaluation of the measured results a new measurement task for students is designed.

Keywords

Diode, reverse recovery time, capacity of PN junction, relaxation generator, measuring device.

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

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

V Plzni dne 10. května 2016

Bc. Ladislav Rubáš

.....

Podpis

Poděkování

Tímto bych rád poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Tomáši Blechovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

Seznam obrázků	viii
Seznam tabulek	ix
Seznam symbolů a zkratek	x
1 Úvod	1
2 Polovodičové diody	2
2.1 Základní vlastnosti diod	2
2.1.1 PN přechod	2
2.1.2 Voltampérová charakteristika diod	4
2.1.3 Kapacita PN přechodu	5
2.1.4 Náhradní schéma diody	7
2.1.5 Průraz PN přechodu	7
2.1.6 Dynamické vlastnosti diody	8
2.2 Základní typy polovodičových diod	10
2.2.1 Usměrňovací dioda	11
2.2.2 Zenerova dioda	11
2.2.3 LED diody	13
2.2.4 Fotodiody	13
2.2.5 Kapacitní dioda	14
2.2.6 PIN dioda	15
2.2.7 Schottkyho dioda	15
2.2.8 Tunelová dioda	16
3 Návrh měřicího přípravku	17
3.1 Současné měření dynamických vlastností	17
3.2 Základní myšlenka návrhu měřicího přípravku	18
3.3 Návrh napájení pro měřící přípravek	19
3.4 Návrh generátoru obdélíkového průběhu	21
3.4.1 Teoretický rozbor relaxačního generátoru	21
3.4.2 Návrh reálného generátoru	23

3.5	Výběr měřených diod a návrh výběrového obvodu	25
3.6	Návrh ovládací části měřícího přípravku	27
3.7	Návrh signalizační části měřícího přípravku	29
3.8	Návrh DPS	30
4	Ověření měřícího přípravku	33
5	Návrh nové měřící úlohy	41
6	Závěr	46
	Reference, použitá literatura	47
	Přílohy	49
A	Schéma zapojení	49
B	Deska plošného spoje	51
C	Seznam součástek	54

Seznam obrázků

2.1	Schématická značka polovodičové diody.	2
2.2	PN přechod bez přiloženého napětí. [3]	3
2.3	a) PN přechod v propustném směru, b) PN přechod v závěrném směru. [3]	4
2.4	V-A charakteristika diody. [4]	4
2.5	Kapacita PN přechodu. [6]	6
2.6	Závislost kapacity na napětí. [2]	6
2.7	Náhradní schéma diody. [5]	7
2.8	Časové průběhy napětí a proudu na diodě. [7]	9
2.9	Průběh proudu reálným PN přechodem. [2]	9
2.10	a)Zotavení PN přechodu při sinusovém napětí b)usměrňovací schopnost při různých kmitočtech. [2]	10
2.11	V-A charakteristika usměrňovací diody. [2]	11
2.12	Schématická značka Zenerovy diody.	11
2.13	V-A charakteristika Zenerovy diody. [8]	12
2.14	Příklad využití Zenerovy diody jako stabilizátoru napětí. [8]	12
2.15	Schématická značka LED diody.	13
2.16	V-A charakteristika LED diody. [8]	13
2.17	Schématická značka fotodiody.	14
2.18	V-A charakteristika fotodiody. [8]	14
2.19	Schématická značka kapacitní diody.	15
2.20	Schématická značka Schottkyho diody.	16
2.21	Schématická značka tunelové diody.	16
2.22	V-A charakteristika tunelové diody. [9]	16
3.1	Schéma zapojení pro měření dynamických vlastností.	17
3.2	Doba zotavení na diodě 1N40076.	18
3.3	Blokové schéma měřícího přípravku.	19
3.4	Schéma zapojení napájecího obvodu.	20
3.5	Obecné schéma relaxačního generátoru.	21
3.6	Průběhy napětí relaxačního generátoru.	22
3.7	Schéma zapojení generátoru.	23
3.8	Nasimulované průběhy generátoru.	24

3.9	Schéma zapojení výběrového obvodu s diodami.	26
3.10	Schéma zapojení ovládacího obvodu.	28
3.11	Schéma zapojení signalizační části měřicího přípravku.	29
3.12	Kompletní schéma zapojení měřicího přípravku.	30
3.13	Navržená DPS.	31
3.14	Fotografie přípravku.	32
4.1	Průběh napětí relaxačního generátoru.	33
4.2	Průběh napětí relaxačního generátoru s komplementární dvojicí tranzistorů.	34
4.3	Průběh napětí a proudu na diodě <i>BY228</i>	34
4.4	Průběh napětí a proudu na diodě <i>FR307</i>	35
4.5	Průběh napětí a proudu na diodě <i>1N4148</i>	35
4.6	Průběh napětí a proudu na diodě <i>BA159</i>	36
4.7	Průběh napětí a proudu na diodě <i>BYW56</i>	36
4.8	Průběh napětí a proudu na diodě <i>1N4007</i>	37
4.9	Průběh napětí a proudu na diodě <i>1N4937</i>	37
4.10	Průběh napětí a proudu na diodě <i>SB260</i>	38
4.11	Průběh napětí a proudu na diodě <i>1N4148</i> umístěné na přípravku.	39
4.12	Průběh napětí a proudu na diodě <i>1N4148</i> měřené původní metodou.	39
5.1	Časové průběhy napětí a proudu na diodě.	42
5.2	Principiální schéma měření doby zotavení.	42
5.3	Popis ovládání měřicího přípravku.	43
A.1	Schéma zapojení měřicího přípravku 1. část.	49
A.2	Schéma zapojení měřicího přípravku 2. část.	50
B.1	Deska plošného spoje - Vrchní (TOP) strana (<i>měřítko 1:1</i>).	51
B.2	Deska plošného spoje - Spodní (BOTTOM) strana (<i>měřítko 1:1</i>).	52
B.3	Osazovací výkres - Vrchní (TOP) strana (<i>měřítko 1:1</i>).	52
B.4	Osazovací výkres - Spodní (BOTTOM) strana (<i>měřítko 1:1</i>).	53

Seznam tabulek

3.1	Tabulka vybraných diod s jejich katalogovou dobou zotavení.	25
3.2	Pravdivostní tabulka demultiplexoru.	27
4.1	Přehled změřených hodnot na diodách.	38
4.2	Přehled dob zotavení diod.	40
5.1	Naměřené hodnoty.	44
5.2	Vypočítané hodnoty.	44
5.3	Naměřené hodnoty - vzorová tabulka.	45
5.4	Vypočítané hodnoty - vzorová tabulka.	45
C.1	Seznam součástek 1. část.	54
C.2	Seznam součástek 2. část.	55

Seznam symbolů a zkratek

d	Tloušťka dielektrika.
DPS	Deska plošných spojů.
Eagle	Easily Applicable Graphical Layout Editor. Snadno použitelném grafický projektový editor.
GaAs	Arsenid gallitý - sloučenina gallia a arsenu.
LED	Light Emitting Diode. Dioda vyzařující světlo.
PSPICE	Personal Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis. Program pro simulaci analogových obvodů pro osobní počítače.
S	Plocha dielektrika.
SiC	Karbid křemíku - sloučenina uhlíku a křemíku.
SMD	Surface Mount Device - Součástky pro povrchovou montáž.
V-A charakteristika	Voltampérová charakteristika.
ϵ	Permitivita.
π	Konstanta (3,14) - Ludolfovo číslo.
τ	Časová konstanta
$C_J[F]$	Bariérová kapacita.
$C_P[F]$	Kapacita diody.
$C_R[F]$	Kapacita diody v závěrném směru.
$h_{21e}[-]$	Proudový zesilovací činitel tranzistoru.
$I[A]$	Elektrický proud.
$I_{bmax}[A]$	Maximální proud bázi tranzistoru.
$I_{cmax}[A]$	Maximální proud kolektoru tranzistoru.
$I_D[A]$	Proud diodou.
$I_F[A]$	Proud v propustném směru.
$I_0[A]$	Saturační proud.
$I_R[A]$	Proud v závěrném směru.
$I_{Zmax}[A]$	Maximální proud zenerovy diody.
$L_S[H]$	Indukčnost přívodů diody.
$Q_S[C]$	Zotavovací náboj.
$R[\Omega]$	Elektrický odpor.

$R_S[\Omega]$	Odpor přívodů diody.
$R_P[\Omega]$	Odpor diody.
$t_s[s]$	Doba zpoždění diody.
$t_r[s]$	Doba ustálení diody.
$t_{rr}[s]$	Doba zotavení diody.
$U[V]$	Elektrické napětí.
$U_{AK}[V]$	Napětí mezi anodou a katodou.
$U_{BR}[V]$	Průrazné napětí diody.
$U_D[V]$	Napětí na diodě.
$U_F[V]$	Napětí v propustném směru.
$U_p[V]$	Prahové napětí.
$U_R[V]$	Napětí v závěrném směru.
$U_T[V]$	Teplotní napětí diody.
$U_Z[V]$	Zenerovo napětí.
$X_{CP}[\Omega]$	Reaktance diody.

1

Úvod

Předložená diplomová práce se zabývá návrhem, realizací a ověření funkčnosti přípravku pro měření dynamických charakteristik diod. Konkrétně se jedná o měření doby zotavení diod. Tato práce vznikla z důvodu potřeby nového měřícího přípravku pro laboratorní cvičení předmětu KET/FE (Fyzikální Elektronika). Tento předmět je vyučován na katedře technologií a měření na Fakultě elektrotechnické v Plzni.

Doba zotavení diod se projevuje, když dojde k rychlé změně napětí na diodě z kladné polaroty na zápornou. To nastává je-li dioda využívána ve spínacím režimu nebo je na diodu přivedena vysokofrekvenční sinusové napětí. Po této změně neklesne proud diodou na nulovou hodnotu ale po dobu zotavení (t_{rr}) teče diodou proud (I_r) v závěrném směru. To je způsobeno kapacitou diody.

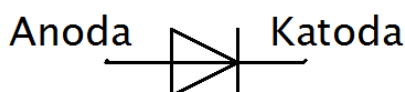
Pro měření doby zotavení se v současné době využívá generátor symetrického průběhu. Ke generátoru jsou připojeny měřené diody přes pracovní odpor. Tento způsob měření není ideální, protože naměřené průběhy nejsou čitelné a je využíván osciloskop, jehož napájení musí být galvanicky odděleno od sítě elektrického napětí.

V teoretické části se práce zabývá popisem PN přechodu včetně jeho vlastností. Dále v práci následuje popis základních typů diod. V následující kapitole je poté popsán současný postup měření doby zotavení diod a jeho nevýhody. V praktické části práce je navržen nový měřící přípravek a jsou vytipovány vhodné diody pro měření doby zotavení. Nový měřící přípravek se skládá z pěti funkčních bloků, které jsou v práci detailně popsány v samostatných kapitolách. Mezi tyto bloky patří i návrh a odvození relaxačního generátoru, který nahrazuje generátor symetrického obdélíkového signálu. Dále se práce věnuje návrhu DPS (desky plošných spojů). V předposlední kapitole diplomové práce jsou zobrazeny naměřené grafy doby zotavení u vytipovaných diod. V poslední kapitole je navrženo nové zadání měřící úlohy. V závěru práce jsou zhodnoceny naměřené výsledky a následně jsou prodiskutovány možnosti vylepšení měřícího přípravku.

2

Polovodičové diody

Polovodičové diody jsou součástky, které využívají polovodičový efekt v dotovaných materiálech. Polovodičové diody využívají vlastnosti PN přechodu nebo přechodu polovodičkov. Obvykle dioda obsahuje jeden tento přechod, ale může jich mít i více. Základní materiály diody jsou germanium, křemík, nebo různé chemické sloučeniny (např. SiC, GaAs). Dioda je dvouvývodová součástka a tyto vývody se označují anoda (A) a katoda (K). Schématická značka je uvedena na obrázku 2.1. [1]



Obr. 2.1: Schématická značka polovodičové diody.

2.1 Základní vlastnosti diod

2.1.1 PN přechod

Polovodičový přechod je rozhraní mezi jednotlivými materiály, z kterých je polovodičová součástka vyrobena. Mezi polovodičové přechody patří rozhraní mezi různě dotovanými polovodiči, nebo mezi různými typy polovodiče, nebo rozhraní mezi polovodičem a jiným materiálem.

Jsou-li na obou stranách stejnorodé materiály a různě dotovanými příměsemi, nazýváme tento přechod PN přechodem. Dotování je prováděno tak, že se do čistého křemíku, nebo germania přidá trojmocný prvek (Galium, Indium) u polovodiče typu *P*. U polovodiče typu *N* je dotování prováděno pětimocnými prvky (Arsen, Fosfor).

U polovodiče typu *P* jsou majoritními nosiči náboje volné díry a minoritními nosiči náboje jsou elektrony. U polovodiče typu *N* je tomu obráceně. To znamená, že majoritními

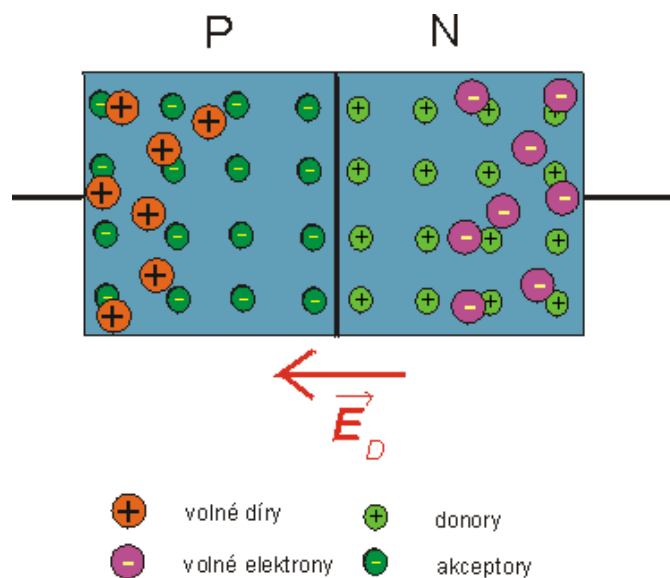
nosiči náboje jsou elektrony. Koncentrace donorů na straně N a akceptorů na straně P je přibližně stejná ($N_D \approx N_A$).

V místě spojení polovodiče P a N dochází ke změně koncentrace volných děr a elektronů. V nejbližším okolí přechodu pronikají volné elektrony z polovodiče N do polovodiče P , volné díry z polovodiče P do polovodiče N , a v místě přechodu se vzájemně rekombinují. Zároveň vzniká na straně N nepohyblivý kladný prostorový náboj Q_n a na straně P nepohyblivý záporný prostorový náboj Q_p . V místě přechodu poté nastává rovnováha mezi přitažlivou silou opačných nábojů a elektrostatickou silou prostorového náboje E_D , a již žádné většinové nosiče náboje k přechodu nepronikají. To má za důsledek, že v oblasti, kde se nenacházejí žádné volné nosiče náboje, vznikne vyprázdněná oblast (potenciálová bariéra). Ke zrušení potenciálové bariéry je potřeba na PN přechod přivést difúzní napětí U_D . PN přechod bez přiloženého napětí je vidět na obrázku 2.2 [2, 3]

$$U_D = U_T \cdot \ln\left(\frac{N_D \cdot N_A}{n_i^2}\right) \quad [V] \quad (2.1)$$

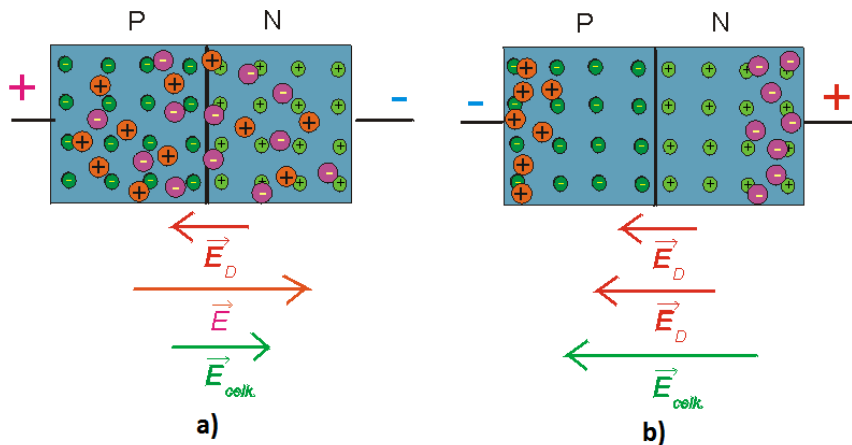
Kde:

- U_T - teplotní napětí, při 25°C je $U_T = 25\text{mV}$
- N_D - koncentrace donorů
- N_A - koncentrace akceptorů
- n_i - intrinsická koncentrace nosičů



Obr. 2.2: PN přechod bez přiloženého napětí. [3]

Situace se změní, je-li na PN přechod přivedeno vnější napětí. Tato situace je znázorněna na obrázku 2.3.



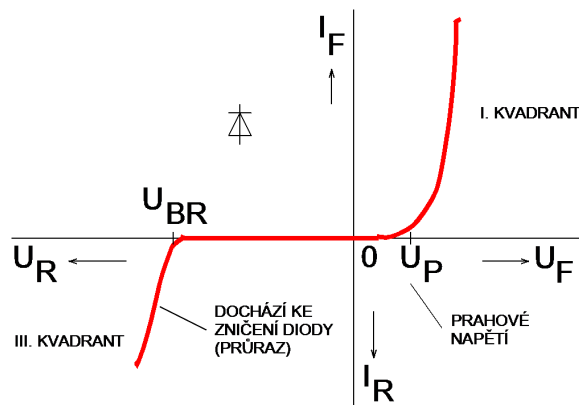
Obr. 2.3: a) PN přechod v propustném směru, b) PN přechod v závěrném směru. [3]

Na obrázku 2.3a) je znázorněna situace, když je na PN přechod přivedeno napětí v propustném směru. S velikostí napětí se zmenšuje vyprázdňená oblast. V okamžiku, kdy je intenzita vnějšího elektrického pole větší, než je intenzita E_D , vyprázdňená oblast zaniká, zvyšuje se koncentrace majoritních nosičů náboje a PN přechodem začíná protékat elektrický proud.

V případě, kdy je na PN přechod přivedeno napětí v závěrném směru, obrázek 2.3b), se velikost zakázané oblasti zvětšuje. To je způsobeno tím, že intenzita vnějšího pole se přičítá k intenzitě E_D . To má za důsledek, že majoritní nosiče nemohou procházet. PN přechodem teče pouze malý proud v řádech μA . To je způsobeno průchodem minoritních nosičů.

2.1.2 Voltampérová charakteristika diod

Voltampérová charakteristika nám dává základní informace o vlastnostech diody. Je to závislost procházejícího proudu I na napětí U_{AK} . Toto napětí je mezi anodou a katodou. V-A charakteristiku můžete vidět na obrázku 2.4.



Obr. 2.4: V-A charakteristika diody. [4]

Z charakteristiky můžeme vidět, že dioda pracuje v I. a III. kvadrantu. Pokud dioda pracuje v I. kvadrantu, říkáme, že dioda pracuje v propustném směru. Když se dioda nachází ve III. kvadrantu, říkáme, že pracuje v závěrném směru.

Pokud je dioda zapojená v propustném směru, obvodem protéká proud při napětí $U_F > U_P$. Napětí U_P se nazývá prahové napětí. Prahové napětí se u diod liší a odpovídá difúznímu napětí na PN přechodu. Toto napětí je závislé na teplotě a také na druhu materiálu PN přechodu. Diferenciální odpor diody se po překročení napětí U_P rychle zmenšuje a blíží se téměř k 0. Reálná dioda má odpor setiny ohmů až jednotky ohmů.

Jestliže zaměníme polaritu napětí na diodě, bude diodou protékat jen velmi malý závěrný proud I_R . Tento proud je téměř stejný a nezávisí na přiloženém napětí na diodě. Vnější přiložené napětí totiž PN přechod zcela uzavře a proud je tvořen pouze minoritními nosiči náboje. Dosáhne-li však závěrné napětí U_R hodnoty U_{BR} , je označováno jako průrazné napětí, dojde ke strmému nárůstu závěrného proudu a nastává průraz PN přechodu. Tento průraz může být buď destruktivní nebo nedestruktivní. Diferenciální odpor diody v závěrném směru je v jednotkách až desítkách megaohmů pokud je napětí U_R menší, než je průrazné napětí. Po přesáhnutí průrazného napětí se odpor snižuje až k jednotkám ohmů.

Uvedenou V-A charakteristiku lze také popsat pomocí Shockleyho rovnice. Tato rovnice nám vyjadřuje celkový proud PN přechodem. [2, 4, 5]

$$I = I_0(e^{\frac{U}{U_T}} - 1) \quad [A] \quad (2.2)$$

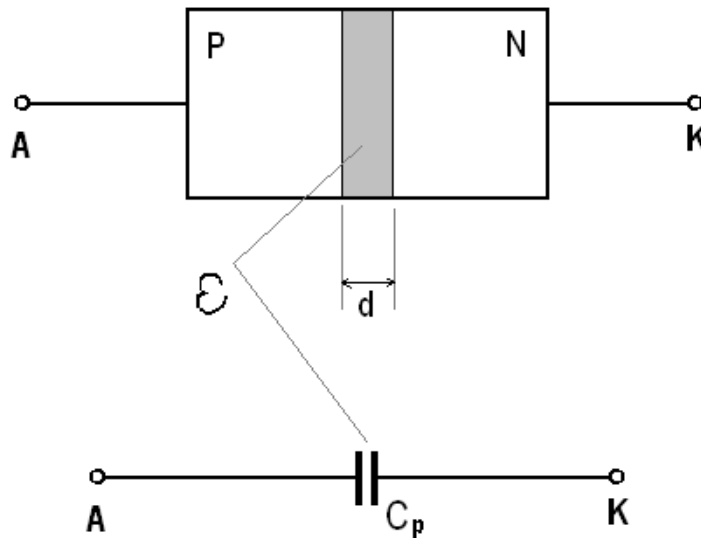
Kde:

- I_0 - vyjadřuje saturační proud
- U - napětí přiložené na PN přechodu
- U_T - teplotní napětí, při 25°C je $U_T = 25\text{mV}$

2.1.3 Kapacita PN přechodu

Kapacita PN přechodu ovlivňuje dynamické a frekvenční vlastnosti diod. Tato kapacita se skládá ze dvou složek: bariérové kapacity a z difúzní kapacity.

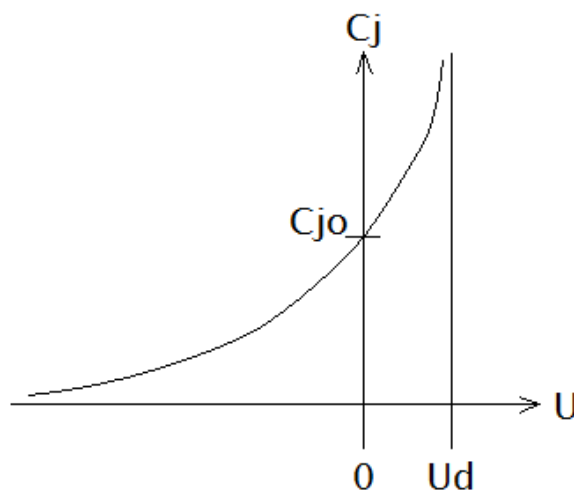
Bariérová kapacita je vytvořena prostorovým nábojem ve vyčerpané oblasti. Projevuje se jak v propustném směru, tak i v závěrném, ale více se projevuje v závěrném směru. Kapacitu PN přechodu v závěrném směru si můžeme představit jako deskový kondenzátor, obrázek 2.5. Oblast prostorového náboje se zde chová jako dielektrikum o tloušťce d , relativní permitivitě ε a ploše S . Relativní permitivita křemíku je 12 a germania 16. Když nepůsobí vnější napětí na PN přechodu, je vzdálenost $d \approx 1\mu\text{m}$. Kapacita dosahuje velikosti jednotek až desítek piko faradů.



Obr. 2.5: Kapacita PN přechodu. [6]

Bariérovou kapacitu poté můžeme spočítat ze vztahu:

$$C_J = \varepsilon \cdot \frac{S}{d} \quad [F] \quad (2.3)$$



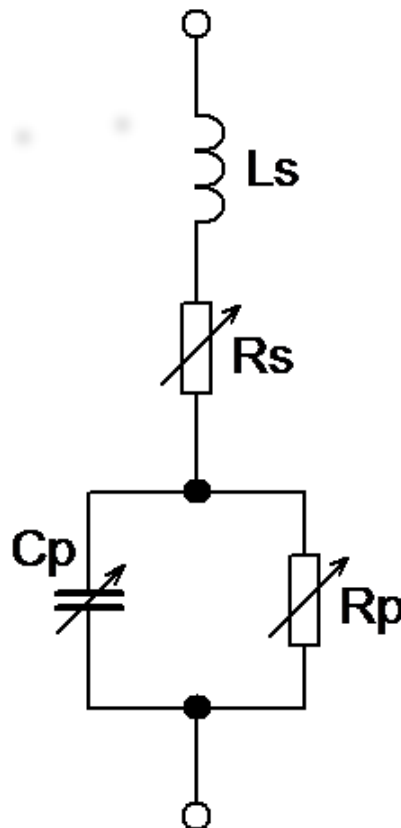
Obr. 2.6: Závislost kapacity na napětí. [2]

Tloušťku vyprázdňené oblasti lze měnit velikostí anodového napětí. To má za důsledek, že se změnou anodového napětí se mění i kapacita přechodu, a zároveň se mění i jeho odpor R_P . Při zvětšování napětí v závěrném směru roste i velikost vyprázdňené oblasti. To má za důsledek, že kapacita přechodu se zmenšuje a odpor roste. V případě, že je PN přechod v propustném směru, vyčerpaná oblast se zmenšuje. Tím kapacita roste a odpor přechodu klesá. Když anodové napětí přesáhne prahové napětí, tak vyčerpaná oblast

zaniká a uplatňuje se jen difúzní kapacita. Difúzní kapacita je vytvořena akumulací náboje vlivem průchodu proudu v propustném směru. [2, 5, 7]

2.1.4 Náhradní schéma diody

V náhradním schématu bereme v úvahu všechny fyzikální vlastnosti. Náhradní schéma je vidět na obrázku 2.7.



Obr. 2.7: Náhradní schéma diody. [5]

Paralelní obvod C_P a R_P , který vidíme na obrázku 2.7, nahrazuje PN přechod diody. Sériový odpor R_S respektuje odpor přívodů a sériová cívka L_S respektuje indukčnost přívodů při vysoké frekvenci. Z náhradního obvodu můžeme vidět, že usměrňovací účinek diody zhoršuje kapacita C_P . Tato kapacita při vysoké frekvenci dovoluje průchod vysokofrekvenčnímu proudu přes zavřený PN přechod. Frekvence, při které $R_P = X_{C_P}$, se jmenuje mezní frekvence. Tato frekvence se pohybuje od stovek kilohertzů až do několika desítek gigahertzů. [2, 5]

2.1.5 Průraz PN přechodu

Zvětší-li se závěrné napětí U_R nad napětí U_{BR} , dojde k růstu závěrného proudu. Při tomto stavu dojde k průrazu PN přechodu. Velikost průrazného napětí je určována oblastí s menší koncentrací příměsí. Mechanismus průrazu závisí na typu přechodu, mate-

riálu polovodiče, tvaru přiloženého napětí a na teplotě. Podle fyzikálního mechanismu rozeznáváme několik typů průrazu:

- Tepelný průraz
- Průraz elektrickým polem (tunelový průraz)
- Lavinový průraz
- Povrchový průraz

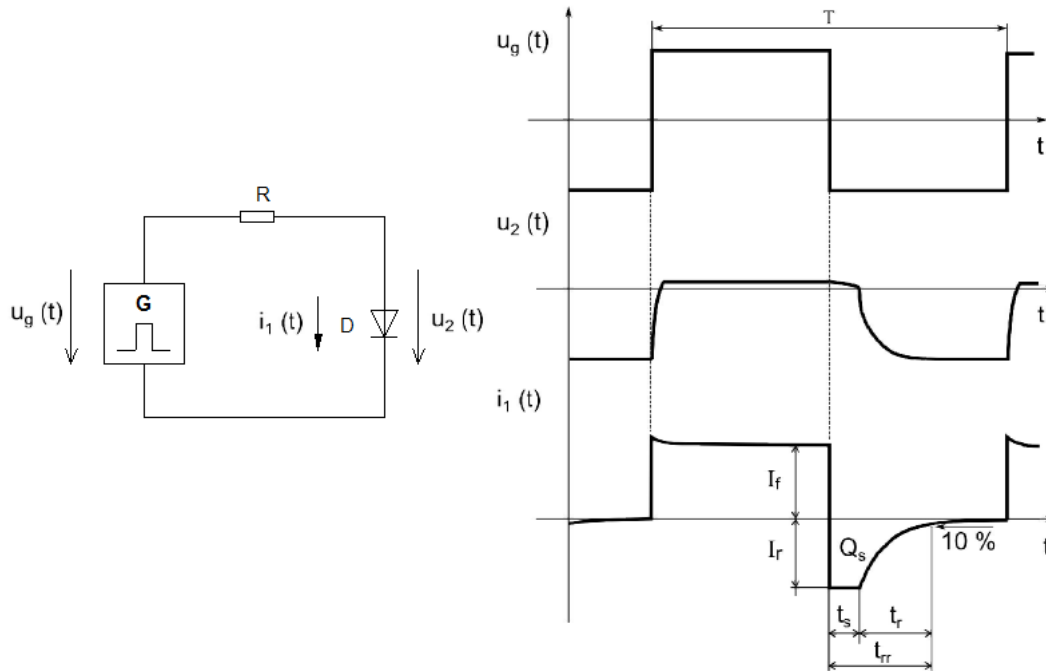
Tepelný průraz - je způsoben průchodem proudu přes PN přechod. Tímto proudem vzniká teplo. Špatným odvodem tohoto tepla roste koncentrace menšinových nosičů, a tím pádem i k nárůstu saturačního proudu. Takto může dojít při velké teplotě k roztavení přechodu a součástka ztratí své polovodičové vlastnosti. Tento způsob průrazu je destruktivní. [2, 7]

Tunelový průraz - je způsoben většinovými nosiči náboje. Podmínkou, aby mohl nastat tunelový průraz, je velmi úzká vyčerpaná oblast. Také musí být dostatečné množství elektronů pro tunelování na jedné straně bariéry, a na stejné energetické úrovni dostatečné množství volných stavů na druhé straně bariéry. Díky tunelovému jevu překoná nositel náboje potenciálovou bariéru, kterou představuje PN přechod a zvětší se vodivost. Tento průraz je nedestruktivní. [2, 7]

Lavinový průraz vzniká při velké intenzitě vnějšího elektrického pole. Elektrony jsou urychlovány na dlouhé dráze. Získávají tak energii, a tato energie slouží k uvolňování dalších elektronů z atomů. Uvolněný elektron s velkou energií se může uvolnit, a dochází tak k lavinovému uvolňování elektronů. Na místě elektronu vznikne díra, čili proces lavinového uvolňování elektronů je také procesem lavinového uvolňování děr. Tímto se zvětšuje vodivost PN přechodu. Tento průraz je nedestruktivní. [2, 7]

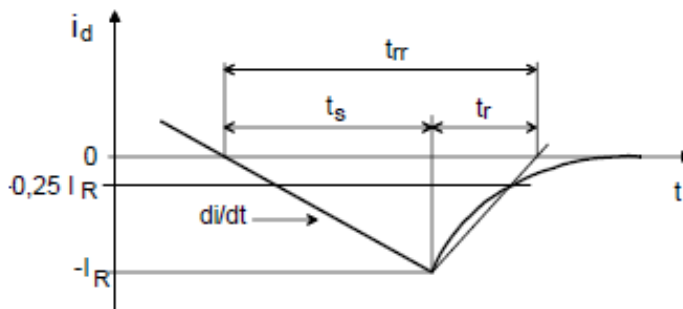
2.1.6 Dynamické vlastnosti diody

Pro různé aplikace, kde se dioda používá ve spínacím režimu, je dobré také znát její dynamické vlastnosti. Mezi nejdůležitější dynamické vlastnosti patří doba zotavení diody. Tato doba nastává, pokud dojde k rychlé změně napětí na diodě. Může jít o skokovou změnu napětí nebo o střídavé napětí o vysoké frekvenci. Při rychlé změně napětí neplatí Schottkyho rovnice, která platí jen pro malé změny napětí. Po této změně napětí diodou teče proud I_R v závěrném směru. Tento proud teče diodou po dobu zotavení, a je způsoben kapacitou přechodu. Velikost proudu je omezena pouze pracovním odporem diody. Doba zotavení můžeme rozdělit na dobu zpoždění a dobu ustálení. Doba zpoždění je doba, po kterou teče proud závěrným směrem, než začne exponenciálně klesat. Doba ustálení je definována jako pokles proudu I_R na 10 % závěrného proudu. Součtem těchto dob dostaneme dobu zotavení diody. [7]



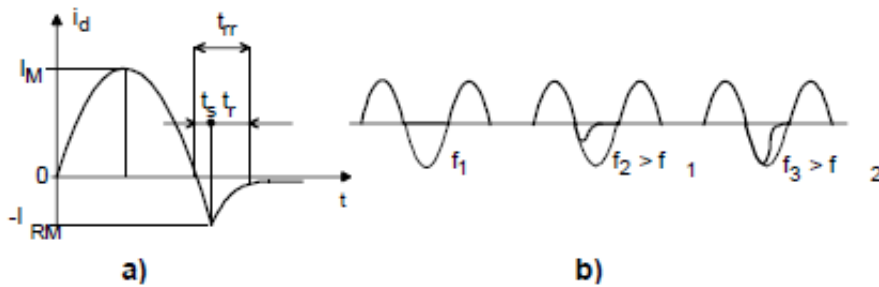
Obr. 2.8: Časové průběhy napětí a proudu na diodě. [7]

V reálných obvodech ale nedochází ke skokovým změnám proudu. Rychlost změny proudu je limitována indukčností obvodu. V takovém případě je možno předpokládat lineární pokles proudu s konstantní rychlostí $-di/dt$. Situace je znázorněna na obrázku 2.9. Je tedy patrné, že doba zpoždění závisí také na rychlosti poklesu proudu. [2, 5]



Obr. 2.9: Průběh proudu reálným PN přechodem. [2]

Při sinusovém napětí mohou nastat dvě situace podle toho, při jakém kmitočtu se diody používají. Při nízkém kmitočtu je ustálená koncentrace nosičů náboje. Proud protékající diodou se shoduje s napětím. V záporné půl vlně prochází jen saturační proud. Změny nastávají při vysokých kmitočtech. V tomto stavu není ustálená hodnota nosičů náboje. Začíná se uplatňovat zotavovací proces, a to vede k překmitům proudu v závěrném směru. To má za důsledek, že PN přechod se stává vodivým i v závěrném směru a dioda přestává usměrňovat. [2, 5, 7]



Obr. 2.10: a) Zotavení PN přechodu při sinusovém napětí b) usměrňovací schopnost při různých kmitočtech. [2]

Dobu zotavení lze zjistit dvěma způsoby. Prvním způsobem je odečíst tuto dobu pomocí osciloskopu. Druhý způsob, jak zjistit dobu zotavení, je výpočet pomocí rovnic. Pro dobu zpoždění platí rovnice 2.4.

$$t_s = \tau \cdot \ln\left(1 + \frac{I_f}{I_r}\right) \quad [s] \quad (2.4)$$

Pro dobu ustálení platí rovnice 2.5.

$$t_r \approx 3 \cdot \tau \approx 3 \cdot R \cdot C_r \quad [s] \quad (2.5)$$

Tato doba je přímo úměrná velikosti proudu v propustném směru I_f , a nepřímo úměrná proudu v závěrném směru I_r . Jak je vidět z rovnice 2.5, doba ustálení závisí na kapacitě diody C_r v závěrném směru. Dobu ustálení můžeme ještě měnit velikostí pracovního odporu R , ale tento odpor nám určuje dovolený proud diodou.

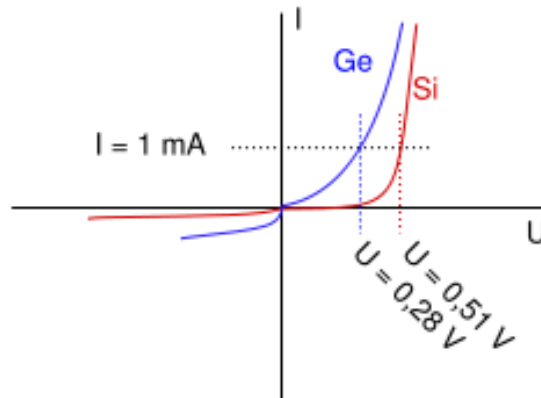
2.2 Základní typy polovodičových diod

Dioda je součástka obvykle s jedním PN přechodem a dvěma vývody - anodou a katodou. Diody můžeme rozdělit podle chování PN přechodu v propustném a závěrném směru. Dále je můžeme dělit podle frekvence spínání proudu. Základními typy polovodičových diod jsou:

- Usměrňovací dioda
- Zenerova dioda
- LED dioda
- Fotodioda
- Kapacitní dioda
- PIN dioda
- Schottkyho dioda

2.2.1 Usměrňovací dioda

Tato dioda slouží k usměrnění střídavého proudu na proud stejnosměrný. Má jeden PN přechod. Nejčastěji jsou využívány křemíkové usměrňovací diody. Využívají se především pro malé frekvence, většinou pro síťové frekvence.



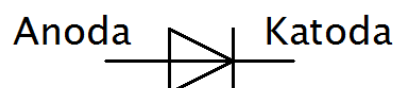
Obr. 2.11: V-A charakteristika usměrňovací diody. [2]

Křemíková dioda má v propustném směru úbytek napětí okolo 0,5 V. Dále je z V-A charakteristiky (obrázek 2.11) vidět, že má větší závěrné napětí než germaniová dioda. Diody se využívají v jednocestných nebo dvoucestných usměrňovačích, například v Graetzovo můstku.

Usměrňovací diody můžeme dále rozdělit na plošné a hrotové diody. Hrotové diody mají malý PN přechod a malou kapacitu přechodu. Proto tyto diody mohou usměrňovat jen malé proudy, ale o vyšší frekvenci než plošné diody. Plošné diody mají větší plochu PN přechodu, ale také větší kapacitu. Na rozdíl od hrotových diod jimi můžeme usměrňovat větší proudy. U usměrňovací diod se často uplatňuje zotavovací proces. Proto je důležité vybírat diody s velmi malou kapacitou PN přechodu. Velká kapacita PN přechodu zhoršuje usměrňovací schopnosti diod. [2]

2.2.2 Zenerova dioda

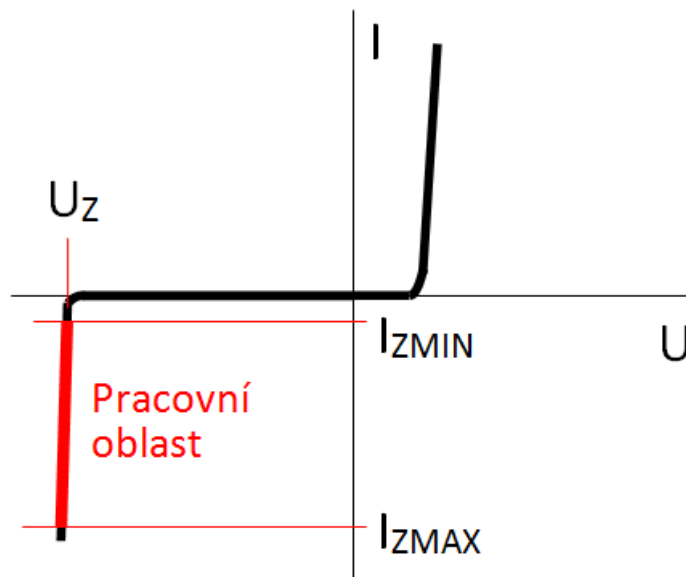
Zenerova dioda je polovodičová součástka s jedním PN přechodem. Využívá se pro stabilizaci stejnosměrného napětí. Schématická značka je na obrázku 2.12.



Obr. 2.12: Schématická značka Zenerovy diody.

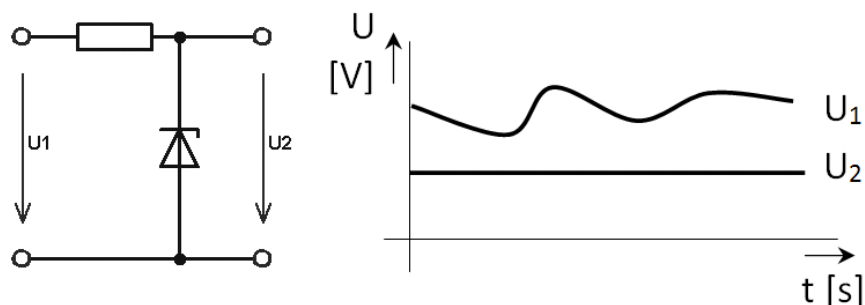
Používá se výhradně v závěrném směru. Z fyzikálního hlediska můžeme Zenerovy diody dělit na skupiny, kde se uplatňuje Zenerův jev nebo tunelový jev. Napětí u Zenerova jevu

se pohybuje od 3 V do 6 V. Od vyššího napětí se u Zenerových diod využívá lavinového efektu. Tyto diody mají velmi úzký PN přechod.



Obr. 2.13: V-A charakteristika Zenerovy diody. [8]

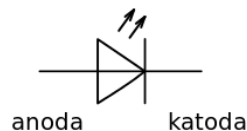
Na obrázku 2.13 je V-A charakteristika Zenerovy diody. V propustném směru se Zenerova dioda chová jako běžná usměrňovací dioda. V závěrném směru ale po překročení U_Z nastane nedestruktivní proražení PN přechodu. Následně se začne zvyšovat proud diodou a napětí zůstane téměř konstantní. Dynamický odpor diody se při dosažení U_Z změní z hodnoty několik desítek megaohmů na jednotky ohmů. Vlivem nárůstu teploty, která se zvětšuje průchodem proudem, nesmí dojít k překročení I_{ZMAX} , kde by se dioda zničila vlivem tepelného průrazu. Jelikož je Zenerova dioda využívána jen v závěrném směru, neuplatňuje se u ní zotavovací proces. [2, 5]



Obr. 2.14: Příklad využití Zenerovy diody jako stabilizátoru napětí. [8]

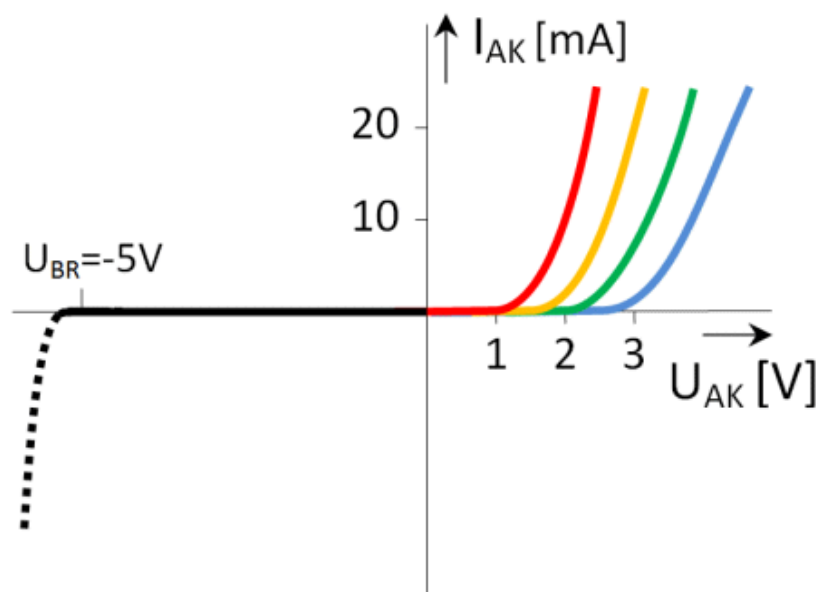
2.2.3 LED diody

LED dioda je polovodičová součástka s jedním PN přechodem. Je-li dioda připojena k elektrickému obvodu v propustném směru, prochází diodou proud a přechod vyzařuje nekoherentní světlo s úzkým spektrem. Tento jev je způsobován elektroluminiscencí. Pásmo spektra záření je závislé na materiálovém složení materiálu použitého u LED diody. Diody jsou vyráběny s pásmem vyzařování od ultrafialového pásma, přes různé barvy viditelného spektra, až po infračervené pásmo.



Obr. 2.15: Schématická značka LED diody.

Barevné diody se využívají pro různé signalizační účely. Mohou se používat například jako části alfanumerických zobrazovacích jednotek. V dálkových ovladačích a optočlenech se nejvíce využívají speciální diody, které vyzařují infračervené světlo.



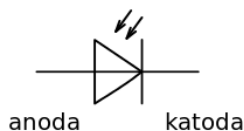
Obr. 2.16: V-A charakteristika LED diody. [8]

LED diody se používají jen v propustném směru. LED diody mají velmi malé průrazné napětí cca 5 V. Dále je z V-A charakteristiky vidět, že různě barevné LED diody mají různé prahové napětí. Toto napětí se pohybuje od cca 1,6 V do 3,5 V. [2]

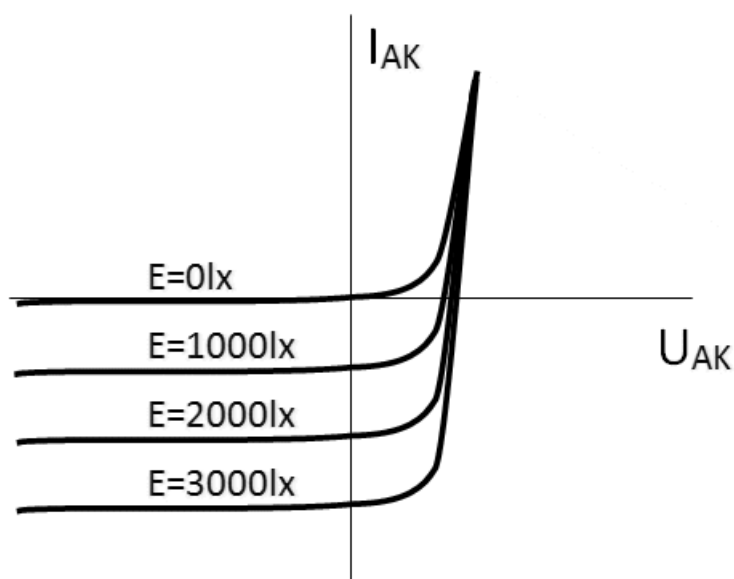
2.2.4 Fotodiody

Fotodioda je plošná polovodičová dioda, která je upravená tak, že na PN přechod může dopadat světlo. Není-li na přechod přivedeno žádné osvětlení, vypadá V-A charakteristika

fotodiody stejně jako V-A charakteristika běžné usměrňovací diody. Vliv osvětlení přechodu můžeme sledovat jako změnu V-A charakteristiky fotodiody. Tato charakteristika je na obrázku 2.18.



Obr. 2.17: Schématická značka fotodiody.

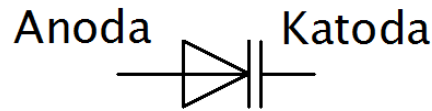


Obr. 2.18: V-A charakteristika fotodiody. [8]

Z V-A charakteristiky je vidět, že dioda pracuje ve třech kvadrantech. V I., III. a IV. kvadrantu. Fotodiodu využíváme jen ve III. a IV. kvadrantu. Ve III. kvadrantu pracuje fotodiody v tzv. odporovém režimu. V tomto režimu se dioda chová jako rezistor citlivý na světlo. Ve IV. kvadrantu pracuje dioda v tzv. hradlovém režimu. Zde se dioda chová jako zdroj elektrické energie. Je zde na diodě napětí naprázdno a na diodě se objevuje proud nakrátko, který je úměrný osvětlení a ploše fotodiody. Fotodiody využíváme k měření osvětlení nebo ke snímání dat. V hradlovém režimu můžeme diodu využívat jako stejnosměrný zdroj. [2]

2.2.5 Kapacitní dioda

Používá se také výraz varikap. Jedná se o součástku s jedním PN přechodem. Tato dioda se využívá v závěrném směru a lze si diodu představit jako rovinný kondenzátor. Využívá se změna parazitní kapacity PN přechodu v závislosti na velikosti přiloženého závěrného napětí.



Obř. 2.19: Schématická značka kapacitní diody.

Kapacitu diody C_P můžeme vyjádřit pomocí vzorce:

$$C_P = \frac{k}{\sqrt[n]{U_R}} \quad [F] \quad (2.6)$$

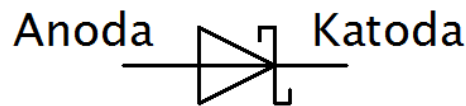
Kde k je konstanta, která závisí na materiálu a technologii provedení diody. Konstanta n nám značí, o jaký typ přechodu jde. Může nabývat hodnot 2 nebo 3. Kapacita C_P bez přiloženého napětí se pohybuje od desítek pikofarad až do stovek pikofarad. Z uvedeného vzorce je také patrné, že s velikostí přiloženého napětí se zvětšuje vyčerpaná oblast a snižuje se kapacita diody. Mezi základní parametry kapacitní diody patří kromě kapacity ještě činitel jakosti a mezní horní frekvence. To je frekvence, při níž je činitel jakosti roven jedné. Kapacitní diody se využívají například k přeladování rezonančních obvodů jako ladící kondenzátor. [2]

2.2.6 PIN dioda

Tato dioda se od ostatních diod liší v tom, že přechod není tvořen jen PN polovodiči. Mezi těmito prvky je tenká vrstva čistého křemíku. Při průchodu stejnosměrného proudu a střídavého proudu s nízkou mezní frekvencí se tato tenká vrstva křemíku neuplatňuje. Dioda se chová jako běžná usměrňovací dioda. Při vysokých frekvencích, kde je doba průletu nosičů náboje přes vrstvu I stejná s periodou signálu, ztrácí PIN dioda svoje původní nelineární vlastnosti a stává se lineárním odporem. Tento odpor se mění s velikostí stejnosměrného proudu, který diodou prochází v propustném směru. PIN diody se využívají až do stovek MHz. [5, 7]

2.2.7 Schottkyho dioda

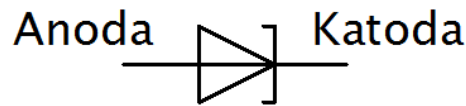
Schottkyho dioda je speciální součástka, která nemá PN přechod. Pro svou činnost využívá přechodu polovodič-kov. Nejčastěji je tento přechod tvořen křemíkem, který je využit jako polovodič a zlato nebo hliník jako kov. Doba zotavení je velmi rychlá v jednotkách pikosekund a mezní frekvence je v řádech gigahertzů. Oproti klasické usměrňovací diodě má Schottkyho dioda nižší prahové napětí, zhruba od 0,3 V. Dále má tato dioda vyšší závěrný proud a nižší závěrné napětí. Proto se tyto diody využívají jako usměrňovací diody v obvodech s vysokou frekvencí. Využití například ve výpočetní technice. [2]



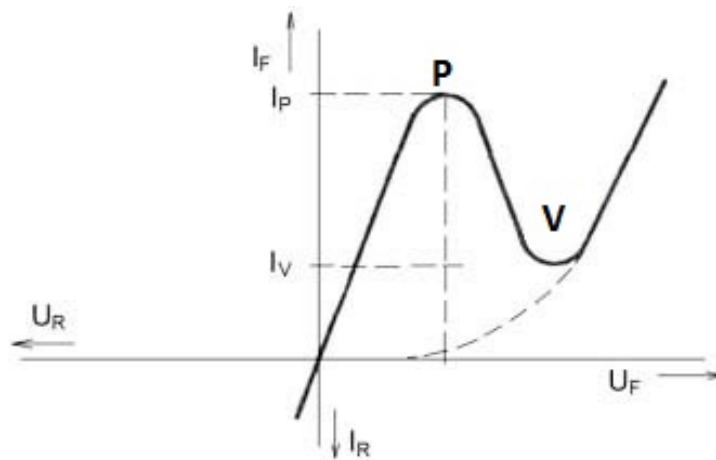
Obr. 2.20: Schématická značka Schottkyho diody.

2.2.8 Tunelová dioda

Tunelová dioda je polovodičová součástka s jedním PN přechodem. Tento přechod je velmi úzký. Dioda pracuje na principu tunelového jevu.



Obr. 2.21: Schématická značka tunelové diody.



Obr. 2.22: V-A charakteristika tunelové diody. [9]

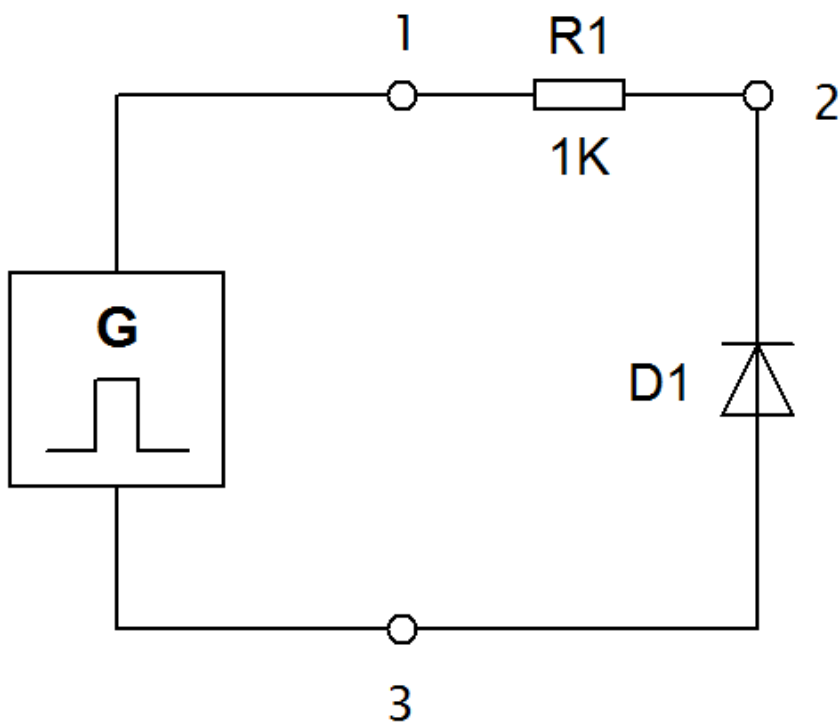
V-A charakteristika se od ostatních diod liší. V závěrném směru se tunelová dioda chová jako lineární rezistor s malým odporem. V propustném směru proud lineárně stoupá až do bodu P . V tomto bodu dosahuje maximálního proudu I_P při napětí U_P , které bývá 0,1 V. Při zvyšování napětí v propustném směru pak proud diodou klesá, až dosáhne bodu V . Napětí v tomto bodu je zhruba 0,3 až 0,4 V. Poté se dioda chová jako běžná usměrňovací dioda. Z uvedeného popisu je patrné, že dioda se využívá v pracovní oblasti mezi body P a V . V této oblasti má totiž záporný diferenciální odpor. Využívá se především v oscilátorech nebo v rychlých spínačích. [2]

3

Návrh měřícího přípravku

3.1 Současné měření dynamických vlastností

V současné době se již na předmětu KTE/FE měří dynamické vlastnosti diod. Konkrétně jde o dobu zotavení. Schéma zapojení je vidět na obrázku 3.1.

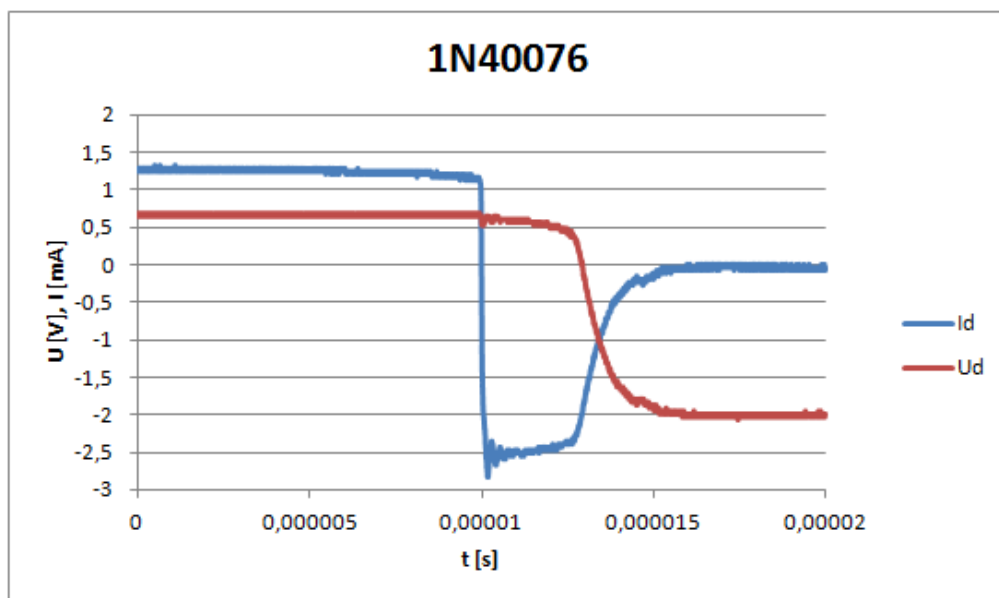


Obr. 3.1: Schéma zapojení pro měření dynamických vlastností.

Ze schématu zapojení je vidět, že k měření dynamických vlastností je využit generátor symetrického obdélníkového signálu. Obdélníkový signál je nastaven na frekvenci 1 kHz se střídou signálu 1:1. Napětí signálu je nastaveno na 2 V špička-špička. Měřené diody se přes $1\text{ k}\Omega$ pracovní odpor připojují ke generátoru obdélníkového signálu. K měření doby

zotavení se používá digitální osciloskop s napěťovými sondami. První sonda se připojí na svorku číslo 1 a touto sondou se měří napětí na odporu. Změřené napětí na odporu odpovídá protékajícímu proudu diodou v mA . Druhá sonda se připojuje na svorku číslo 3 a slouží k měření napětí na diodě. Zemní svorky obou sond se připojují na svorku číslo 2, a to z důvodu, že zemní svorky osciloskopu jsou uvnitř propojené. Z tohoto důvodu musí být osciloskop připojen k síti elektrického napětí přes oddělovací transformátor, aby byla vytvořena plovoucí země.

Toto schéma zapojení není vhodné ze dvou hlavních důvodů. Prvním důvodem je, že musí být použit oddělovací transformátor. Druhým a závažnějším důvodem je, že generátor obdélníkového signálu nedokáže při přechodu z kladného napětí na záporné dodat potřebný proud. To má za důsledek, že naměřené průběhy u rychlejších diod nejsou moc čitelné a nejde odečíst doba zotavení. Příklad naměřeného průběhu je na obrázku 3.2. [7]



Obr. 3.2: Doba zotavení na diodě 1N40076.

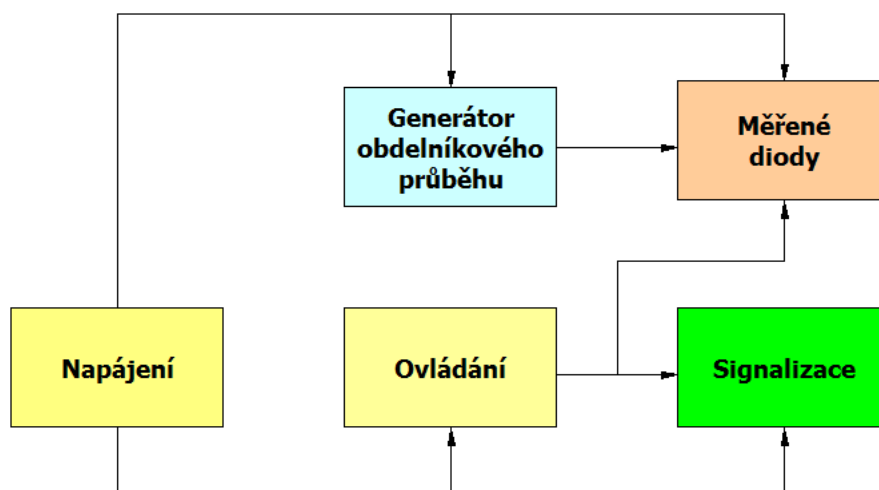
3.2 Základní myšlenka návrhu měřícího přípravku

Požadavky na nový měřící přípravek vycházejí hlavně z nedostatků stávajícího řešení, které byly rozebrány v minulé kapitole. Další požadavek je, aby byly měřeny diody s různou dobou zotavení. Použité součástky musí být levné a dobře dostupné na trhu. Zapojení musí být snadno ovladatelné a srozumitelné. Celý přípravek musí být na jedné DPS a musí být konstrukčně odolný proti pohybu a otřesům. Tato DPS musí obsahovat vhodné konektory a zdířky na připojení ostatních přístrojů. Mezi tyto přístroje patří jen zdroj napětí a digitální osciloskop.

Celkový návrh měřícího přípravku je rozdělen na 5 částí. Mezi tyto části patří:

- Napájecí obvod
- Generátor obdélníkového průběhu
- Ovládaní
- Měřené diody
- Signalizace

Blokové schéma přípravku je vidět na obrázku 3.3. V následujících kapitolách budou jednotlivé části postupně podrobně rozebrány.



Obr. 3.3: Blokové schéma měřícího přípravku.

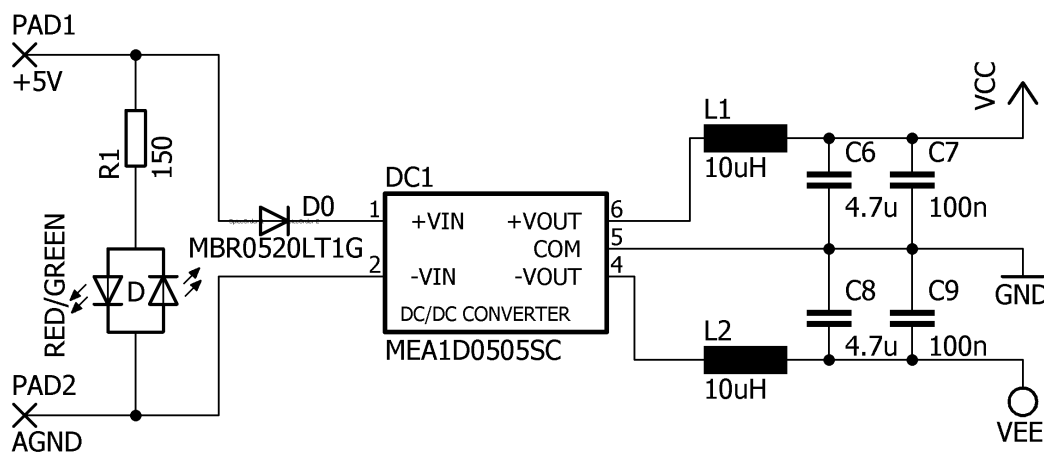
3.3 Návrh napájení pro měřící přípravek

Tato kapitola se věnuje návrhu a výběru napájení. Z hlediska koncepce celého přípravku je tento návrh důležitý. Z údajů v kapitole 3.1 je patrné, že napájení pro měřící přípravek musí být izolovaný od sítě elektrického napětí. Z důvodu, aby byla splněná podmínka, že se již nebude využívat oddělovací transformátor u osciloskopu. Z hlediska výběru vhodného napájení přípravku, můžeme tedy zdroje napětí rozdělit takto:

- izolovaný zdroj napětí
 - nesymetrický zdroj napětí
 - symetrický zdroj napětí
- akumulátorový zdroj napětí

Možnost napájení z akumulátoru není vhodná z několika důvodů. Prvním důvodem je, že akumulátory by se musely neustále nabíjet z důvodu velkého počtu měření na předmětu Fyzikální elektronika. Druhým důvodem je, že potřebujeme pro měření doby zotavení symetrický zdroj napětí.

Pro napájení přípravku je tedy vybrán symetrický zdroj napětí, který bude galvanicky oddělený od sítě elektrického napětí. Těmto požadavkům nejvíce odpovídá izolovaný DC/DC měnič. Jde o měnič řady MEA od firmy Murata s označením MEA1D0505SC. Je to izolovaný měnič stejnosměrného napětí. Vstupní napětí měniče je v rozsahu 4,5V až 5,5V. Na výstupu je symetrické napětí $\pm 5V$. Výstupní výkon měniče je 1W. Celkové schéma zapojení napájecího obvodu je na obrázku 3.4. [10]



Obr. 3.4: Schéma zapojení napájecího obvodu.

Z obrázku 3.4 je vidět, že nejdůležitější součástí je stejnosměrný měnič. Na vstup tohoto měniče je přivedeno přes Schottkyho diodu napětí 5V z pevného stejnosměrného zdroje. Tato dioda je použita z důvodu ochrany měniče při přepólování. Schottkyho dioda je vybrána z důvodu, že má nižší úbytek napětí v propustném směru, než klasická usměrňovací dioda. Dále je u měniče použita LED dioda. Jedná se o dvoubarevnou diodu. Zelená barva signalizuje, že vstupní napětí je připojeno správně. Je-li barva na diodě červená, je vstupní napětí připojeno obráceně. Tato dioda má úbytek napětí 2V a proud diodou je 20 mA. Před touto diodou je předřadný odpor $R1$. Výpočet předřadného odporu je:

$$R = \frac{U - U_D}{I_D} = \frac{5 - 2}{0,02} = 150 \quad [\Omega] \quad (3.1)$$

Za měničem je zapojen LC filtrační obvod. Tento obvod a použité součástky jsou převzaty z dokumentace k danému měniči. Konkrétně jde o cívku, jejíž hodnota je 10 μH a kondenzátor o hodnotě 4,7 μF . Paralelně k tomuto kondenzátoru je připojen ještě kondenzátor o hodnotě 100 nF . Za tímto filtračním obvodem je poté napětí, kterým se napájí zbytek měřicího přípravku. [11]

3.4 Návrh generátoru obdélníkového průběhu

V současné kapitole se podíváme na návrh generátoru obdélníkového průběhu. Tento generátor musí mít tyto vlastnosti:

- Symetrický obdélníkový průběh se střídou 1:1
- Frekvence 1 kHz
- Napětí signálu minimálně 2 V špička-špička

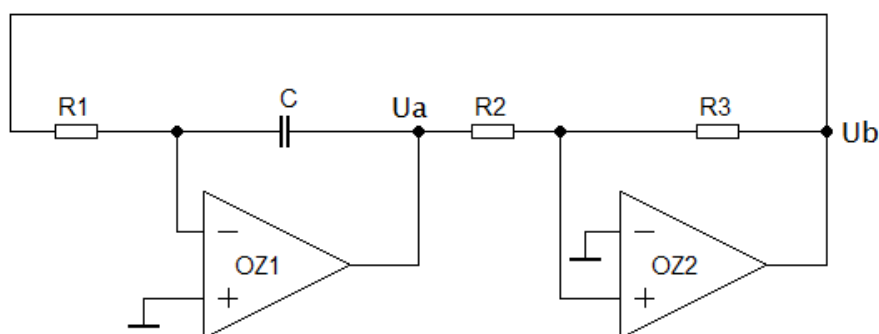
Generátor s těmito požadavky jde sestavit mnoha způsoby. U tohoto přípravku je použitý takzvaný relaxační generátor, který je detailně popsán v následující kapitole.

3.4.1 Teoretický rozbor relaxačního generátoru

Relaxační generátor je astabilní klopný obvod, který neustále kmitá na určené frekvenci. Na jeho výstupu může být například pilovitý nebo obdélníkový průběh napětí. Skládá se celkem ze 3 částí:

- z akumulčního prvku
- ze zdroje akumulované energie
- z komparátoru

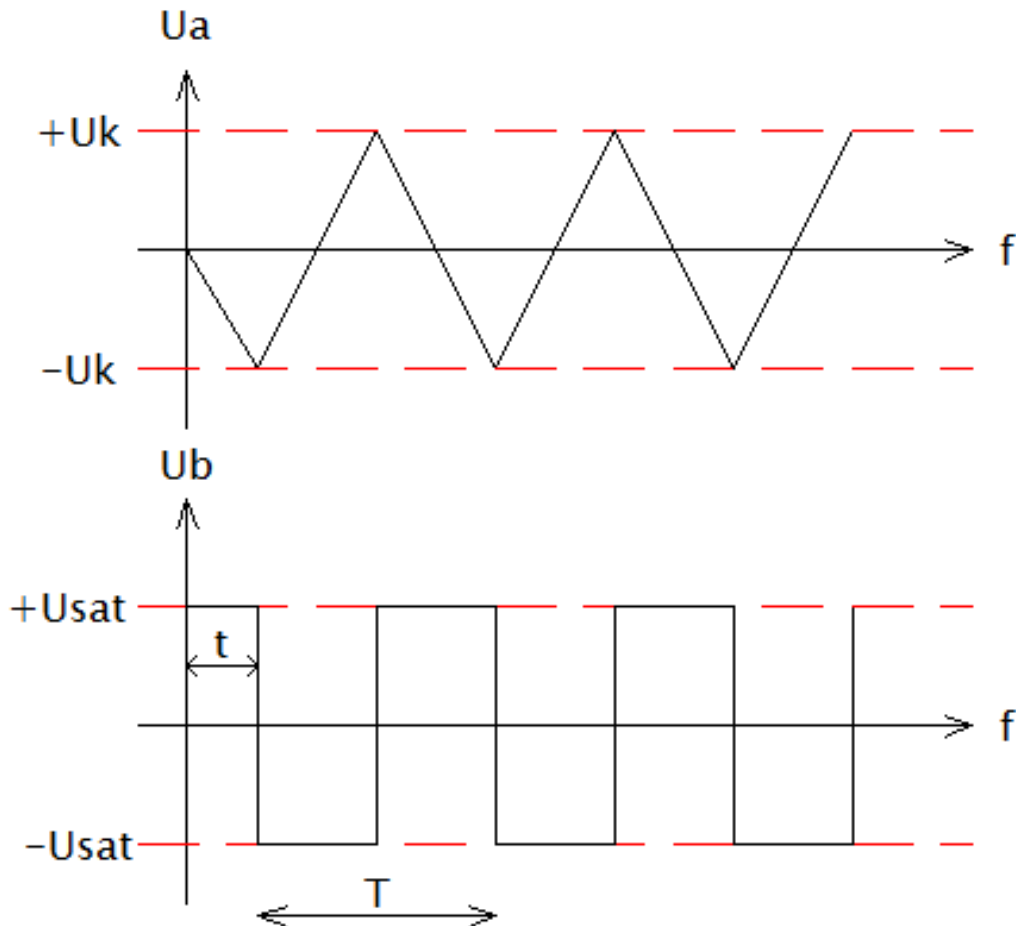
Jako akumulční prvek se u relaxačních generátorů používá cívka nebo kondenzátor. Zdroj akumulované energie je buď napětí nebo proud. Zde záleží jaký se použije akumulční prvek. Komparátor v obvodu slouží jako spínací prvek a zdroj akumulční energie, který na svém výstupu má dvě různá napětí. Nejčastěji se využívá komparátor s hysterezí. Obecné schéma relaxačního generátoru, kde je jako akumulční prvek použit kondenzátor, je na obrázku 3.5. [12]



Obr. 3.5: Obecné schéma relaxačního generátoru.

Nyní se blíže podíváme na princip relaxačního generátoru. Z obrázku 3.5 je vidět, že odpory $R2$, $R3$ a operační zesilovač $OZ2$ tvoří komparátor s hysterezí a operační zesilovač

$OZ1$, odpor $R1$ a kondenzátor $C1$ představují integrátor. Napětí U_b za komparátorem $OZ2$ může tedy nabývat pouze dvou hodnot, a to $\pm U_{sat}$. Průběhy napětí relaxačního generátoru jsou na obrázku 3.6.



Obr. 3.6: Průběhy napětí relaxačního generátoru.

K překlopení komparátoru $OZ2$ dojde tehdy, když napětí mezi diferenčními vstupy je $0V$. Poté platí tato rovnost:

$$\frac{U_a}{R2} = -\frac{U_b}{R3} \Rightarrow U_a = -U_b \cdot \frac{R2}{R3} \quad (3.2)$$

Nyní se podíváme jak se napětí U_a mění v čase.

$$u_a(t) = -\frac{1}{C} \int_0^t i_c \cdot dt + u_c(0) = -\frac{1}{R1 \cdot C} \int_0^t u_b \cdot dt = -\frac{U_c}{R1 \cdot C} \cdot t \quad [V] \quad (3.3)$$

Spojíme rovnice 3.2 a 3.3. Po úpravě dostaneme rovnici pro t .

$$-U_b \cdot \frac{R2}{R3} = -U_b \cdot \frac{t}{R1 \cdot C} \quad [V] \quad (3.4)$$

$$t = \frac{R1 \cdot R2 \cdot C}{R3} \quad [s] \quad (3.5)$$

Do rovnice 3.5 nyní dosadíme, že $t = \frac{T}{4}$, což vyplývá z obrázku 3.6. Dostaneme rovnici pro periodu T a frekvenci f .

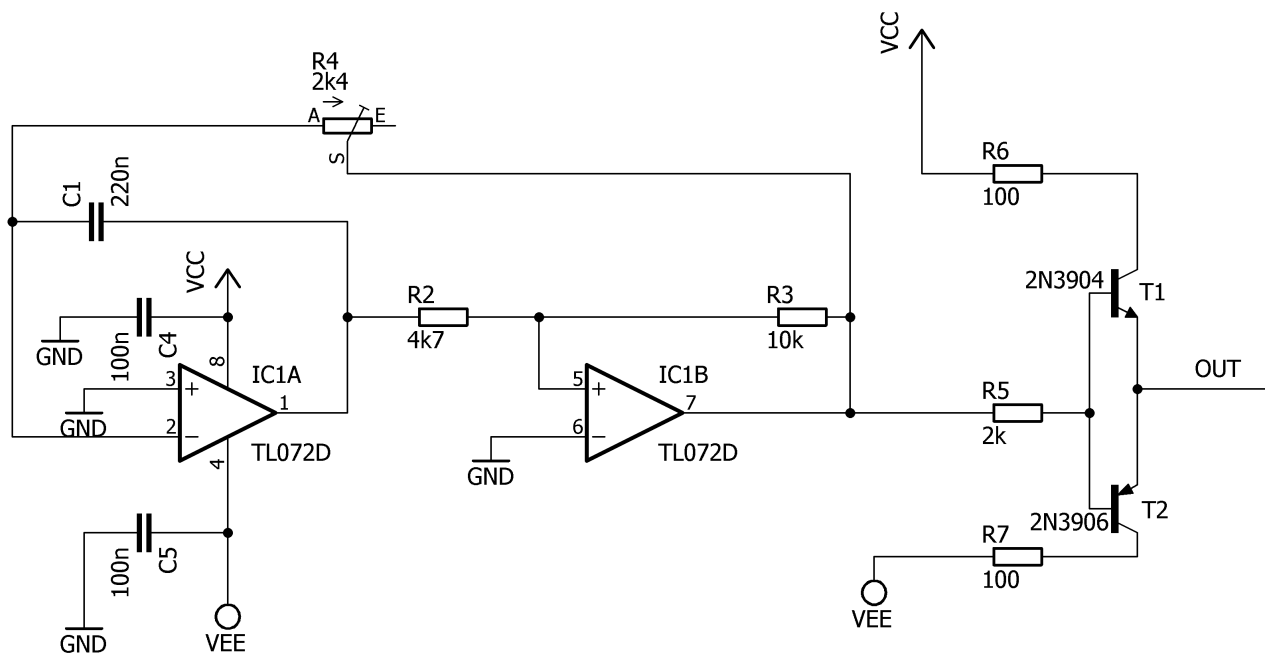
$$T = \frac{4 \cdot R1 \cdot R2 \cdot C}{R3} \quad [s] \quad (3.6)$$

$$f = \frac{R3}{4 \cdot R1 \cdot R2 \cdot C} \quad [Hz] \quad (3.7)$$

Jak je vidět z rovnice 3.7, frekvence relaxačního generátoru nezávisí na velikosti saturačního napětí. Tato frekvence závisí pouze jen na velikosti použitých součástek. Na výstupu *OZ2* je tedy symetrický obdélníkový průběh dané frekvence. Jak je vidět u obrázku 3.6, amplituda výstupního signálu je rovna saturačnímu napětí operačního zesilovače. [12]

3.4.2 Návrh reálného generátoru

V minulé kapitole byl proveden teoretický rozbor relaxačního generátoru, kde byl jako akumulací prvek použit kondenzátor. Tento obvod je i základem generátoru, který je využit u měřicího přípravku. Celé schéma obdélníkového generátoru je vidět na obrázku 3.7.



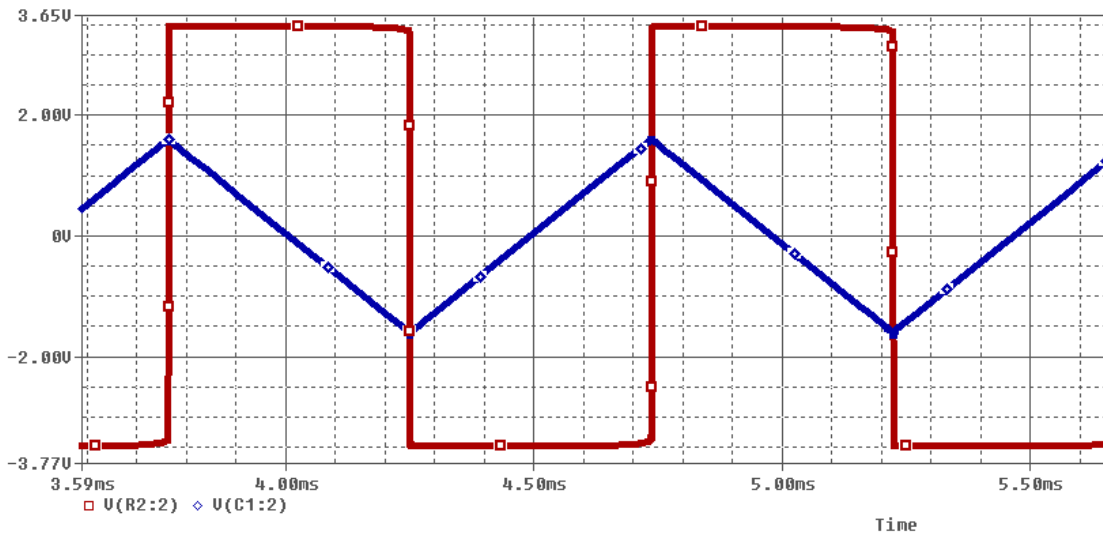
Obr. 3.7: Schéma zapojení generátoru.

Hlavní součástky obdélníkového generátoru jsou operační zesilovače *IC1A* a *IC1B* s označením TL072. Tyto dva operační zesilovače jsou umístěny ve společném pouzdru. Tyto zesilovače jsou napájené symetrickým napětím $\pm 5V$. Společně s kondenzátorem *C1*, s odpory *R2* a *R3* a potenciometrem *R4* tvoří operační zesilovače relaxační generátor. Potenciometr byl zvolen z důvodu, že ostatní součástky nejsou zcela přesné, a také proto

že přesně vypočtená hodnota R_4 se nevyrábí. Součástky C_1 , R_2 a R_3 byly zvoleny a hodnota potenciometru se dopočítala z upravené rovnice 3.7 pro frekvenci 1kHz .

$$R_4 = \frac{R_3}{4 \cdot R_2 \cdot C \cdot f} = \frac{10000}{4 \cdot 4700 \cdot 220 \cdot 10^{-9} \cdot 1000} = 2418 \quad [\Omega] \quad (3.8)$$

Takto navržený relaxační generátor byl nejprve vyzkoušen v simulačním programu *PSPICE*. Jeho výstupní průběhy můžete vidět na obrázku 3.8. Červený průběh odpovídá napětí označené jako U_b . Napětí U_a pak odpovídá modrý průběh.



Obr. 3.8: Nasimulované průběhy generátoru.

Z obrázku 3.8 můžete vidět, že generátor má na výstupu symetrické obdélkové napětí U_b . Amplituda tohoto napětí je $\pm 3,5\text{V}$ a perioda signálu je $0,973\text{ms}$. Tato perioda odpovídá frekvenci $1027,75\text{kHz}$. Dále je z obrázku 3.8 vidět, že U_a je symetrické pilovité napětí. Frekvence tohoto napětí je stejná jako frekvence napětí U_b . Amplituda signálu je $\pm 1,6\text{V}$. To znamená že simulace dopadla dle teoretických předpokladů. Pro ověření je v rovnici 3.9 výpočet překlápěcího napětí U_a . Tato rovnice vychází z rovnice 3.2

$$U_a = \pm U_b \cdot \frac{R_2}{R_3} = \pm 3,5 \cdot \frac{4700}{10000} = \pm 1,645 \quad [\text{V}] \quad (3.9)$$

Kondenzátory C_4 a C_5 slouží jako blokové kondenzátory napájení pro oba operační zesilovače. Jejich hodnota 100nF je doporučená hodnota z katalogového listu. [13]

Výstupní průběh obdélkového průběhu je poté přiveden na tranzistory T_1 a T_2 . Tyto tranzistory jsou v tzv. komplementárním zapojení a slouží jako proudové posílení výstupu generátoru. Pro toto zapojení byly vybrány tranzistory s označením $2n3904$ a $2n3906$. Před tranzistory je odpor R_5 , který slouží k nastavení maximálního proudu báze. Hodnota odporu R_5 je $2\text{k}\Omega$. Výpočet tohoto odporu vycházel z rovnic 3.10 a 3.11.

$$I_{bmax} = \frac{I_{cmax}}{h_{21e}} \quad [\text{A}] \quad (3.10)$$

$$R5 = \frac{U_{R5}}{I_{bmax}} \quad [\Omega] \quad (3.11)$$

Na kolektor tranzistoru $T1$ je připojeno napájecí napětí $+5V$ přes odpor $R6$. Stejně tomu je i u tranzistoru $T2$, ke kterému je přes odpor $R7$ připojeno napětí $-5V$. Tyto odpory jsou použity ze dvou důvodů. Prvním důvodem je omezení kolektorového proudu I_c . Druhým důvodem je, že pro velmi malé napětí okolo $0V$ mohou být tranzistory otevřené současně. Odpory $R6$ a $R7$ tudíž chrání před zkratem při současném otevření tranzistorů. Hodnota odporů $R6$ a $R7$ byla zvolena na hodnotu 100Ω . To znamená, že kolektorový proud je omezen na $50 mA$. Emitory tranzistorů jsou spojeny, a za nimi tvoří tak výstupní svorku navrženého symetrického obdélníkového generátoru s proudovým posílením. Za tímto výstupem se budou připojovat jednotlivé měřené diody.

3.5 Výběr měřených diod a návrh výběrového obvodu

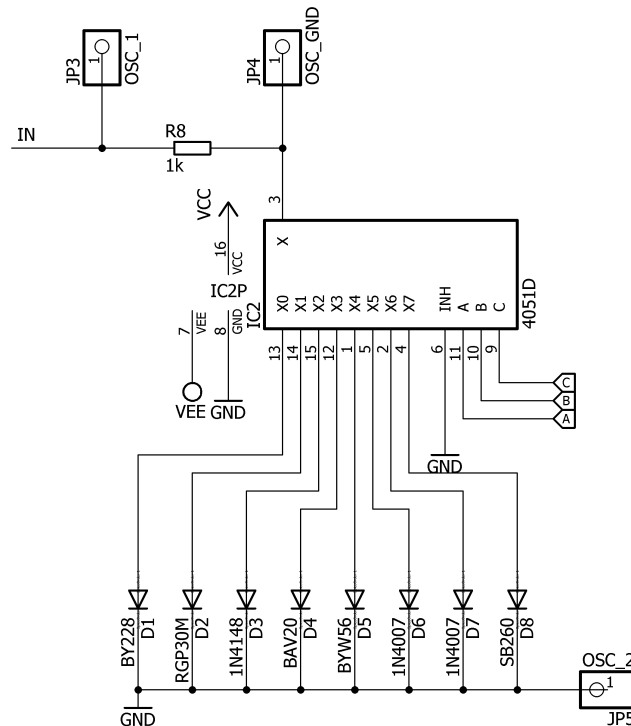
Jedním z požadavků na nový měřicí přípravek je, aby byly vybrány diody s různou dobou zotavení. Je vybráno 8 vývodových diod s různou dobou zotavení. Vybrané diody a jejich katalogová hodnota doby zotavení jsou uvedeny v tabulce 3.1. [14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21]

Název diody	Doba zotavení (katalogová hodnota)
BY228	20000 ns
FR307	500 ns
1N4148	4 ns
BA159	500 ns
BYW56	4000 ns
1N4007	2000 ns
1N4937	200 ns
SB260	400 ns

Tab. 3.1: Tabulka vybraných diod s jejich katalogovou dobou zotavení.

Z tabulky 3.1 vyplývá, že jsou vybrány diody s dobou zotavení od jednotek ns až do desítek μs .

Aby uživatel nemusel jednotlivé diody měnit ručně, jsou všechny diody na DPS. Jejich přepínání je provedeno pomocí elektronického přepínače. Schéma zapojení výběrového obvodu je na obrázku 3.9.



Obr. 3.9: Schéma zapojení výběrového obvodu s diodami.

Z obrázku 3.9 je patrné, že jako elektronický přepínač je použit 8 kanálový analogový multiplexor/demultiplexor. Celé označení tohoto obvodu je 74HC4051 a tento obvod, který je označen *IC2*, pracuje jako demultiplexor. Tento obvod má nízký odpor sepnutí a umožňuje přivést na vstup obvodu analogové napětí v rozsahu $\pm 5V$. Demultiplexor je napájen symetrickým napětím $\pm 5V$. Před demultiplexorem je odpor *R8* o hodnotě $1\text{ k}\Omega$. Jedná se o pracovní odpor měřených diod. V obvodu je tento odpor umístěn z důvodu omezení závěrného proudu po dobu zotavení. Na jednotlivé výstupy demultiplexoru je připojeno 8 měřených diod. Celý demultiplexor je ovládán pomocí 4 bitů, a to bitů *A*, *B*, *C* a bitu *INH*, který slouží k povolení běhu daného obvodu. Pravdivostní tabulka demultiplexoru je znázorněna v tabulce 3.2. [22]

Z tabulky 3.2 vyplývá, že když je na bit *INH* přivedena logická 1, obvod nepracuje. Proto u měřicího přípravku je na bit *INH* přivedena trvale logická 0. Ovládání zbylých tří ovládacích bitů bude popsáno a vysvětleno v kapitole 3.6.

Proud, který teče měřenou diodou se bude měřit na odporu *R8*. Proto se jedna měřící sonda osciloskopu připojí na konektor *JP3*. Zemní svorka měřící sondy se připojí na konektor *JP4*. Tento konektor slouží i jako zemní svorka pro druhou napěťovou sondu osciloskopu. Druhá sonda se připojí na konektor *JP5*. Tato sonda měří napětí na diodě.

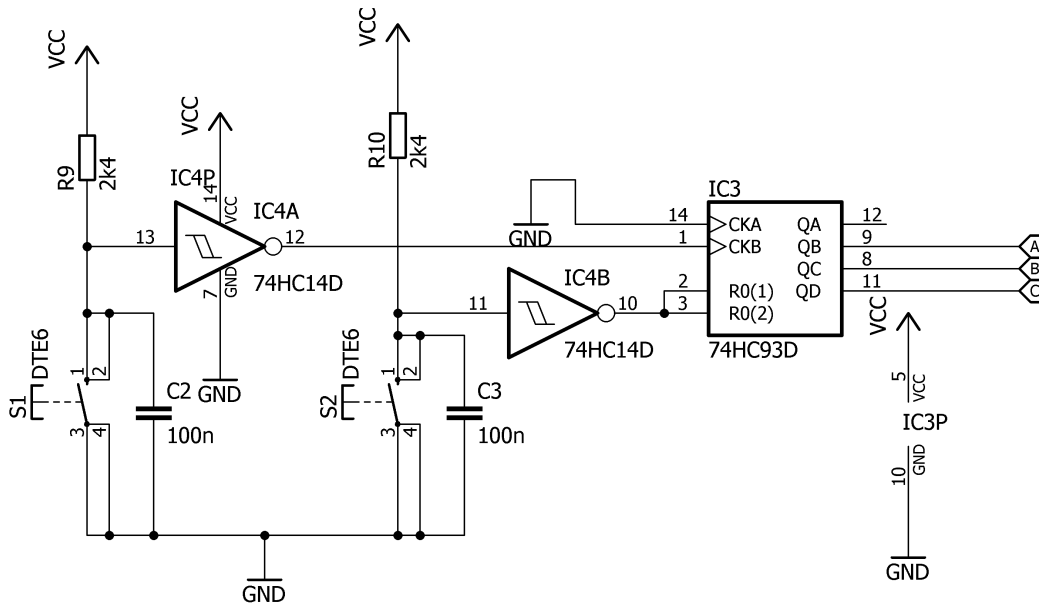
Řídící bity				Sepnutý výstup
INH	C	B	A	
0	0	0	0	X0
0	0	0	1	X1
0	0	1	0	X2
0	0	1	1	X3
0	1	0	0	X4
0	1	0	1	X5
0	1	1	0	X6
0	1	1	1	X7
1	-	-	-	Žádný

Tab. 3.2: Pravdivostní tabulka demultiplexoru.

3.6 Návrh ovládací části měřícího přípravku

Jak bylo řečeno v minulé kapitole všechny měřené diody jsou na DPS. Výběr konkrétní diody je realizován pomocí analogového demultiplexoru. K přepínání jsou tedy potřeba 3 bity. Z důvodu jednoduchosti ovládaní se diody budou přepínat dokola v pořadí $D1 - D2 - D3 - D4 - D5 - D6 - D7 - D8 - D1$. Z tohoto důvodu je pro přepínání nejvhodnější asynchronní binární čítač, který se bude inkrementovat pomocí tlačítka. Z tohoto důvodu je vybrán čítač s označením $74HC93$, který je ve schématu zapojení označen jako $IC3$.

Jedná se o 4-bitový asynchronní čítač. Tento čítač může pracovat ve třech režimech. A to jako 1-bitový, 3-bitový a 4-bitový čítač. Má dva vstupy pro hodinový signál. Dále má 4 výstupy a dva vstupy na resetování. Oba hodinové vstupy $CP0$ a $CP1$ reagují na sestupnou hranu. Čítač obsahuje dva asynchronní vstupy na resetování čítače. Aby se čítač vynuloval, musí být oba vstupy $MR1$ a $MR2$ v logické 1. Celé schéma ovládacího obvodu měřícího přípravku je na obrázku 3.10. [23]



Obr. 3.10: Schéma zapojení ovládacího obvodu.

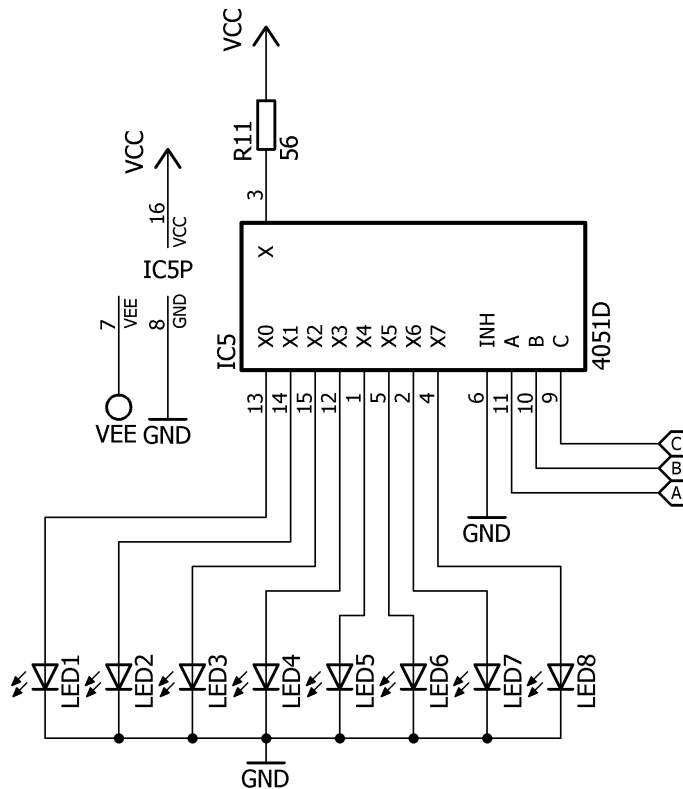
Z důvodu, že na přepínání demultiplexoru potřebujeme jen 3 bity, je čítač *IC3* zapojen jako 3-bitový čítač. Z toho důvodů je použit hodinový vstup označený *CKB*. Druhý hodinový vstup není využíván, a proto je trvale připojen na logickou 0. Jak bylo dříve řečeno, inkrementace čítače je provedena pomocí tlačítka *S1*. Před tímto tlačítkem je odpor *R9* o hodnotě $2,4\text{ k}\Omega$, který je připojen na $+5\text{V}$. Aby bylo ošetřeno, že se při stisku tlačítka zvýšila hodnota čítače o jedničku, musí být tlačítko ošetřeno proti zákmitům. Nejjednodušším způsobem ošetření tlačítka je použití dolní RC propusti se Schmittovým klopným obvodem. Mezní frekvence této dolní propusti je uvedena v rovnici 3.12. Proto je k tlačítku *S1* připojen paralelně kondenzátor *C2*. Výstup tlačítka je přes jeden Schmittův klopný obvod *IC4A* připojen na vstup hodinového signálu. [24, 25]

$$f_{mez} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad [Hz] \quad (3.12)$$

Dále schéma na obrázku 3.10 obsahuje tlačítko *S2*, které slouží k resetování čítače. Toho tlačítko *S2* je opět ošetřeno proti zákmitům stejně jako tlačítko *S1*. Výstup Schmittova klopného obvodu *IC4B* je poté připojen na oba vstupy pro resetování čítače. Čítač i Schmittovy klopné obvody jsou napájeny $+5\text{V}$. Pro ovládání demultiplexoru jsou poté využity výstupy čítače *QB*, *QC* a *QD*.

3.7 Návrh signalizační části měřícího přípravku

Tato část práce se věnuje návrhu signalizační části měřícího přípravku. Signalizace je provedena pomocí LED diod, aby uživatel věděl, u které diody měří dobu zotavení. Pro přepínání LED diod je využit demultiplexor *IC5*, který je ovládán stejně jako demultiplexor *IC2*. Schéma zapojení je na obrázku 3.11.



Obr. 3.11: Schéma zapojení signalizační části měřícího přípravku.

Na vstup demultiplexoru je připojen předřadný odpor R_{11} . Tento odpor je připojen na $+5V$. Hodnota odporu je 56Ω . Tato hodnota byla vypočten z rovnice 3.13 a 3.14.

$$R_{celk} = \frac{5 - 3,2}{0,02} = 90 \quad [\Omega] \quad (3.13)$$

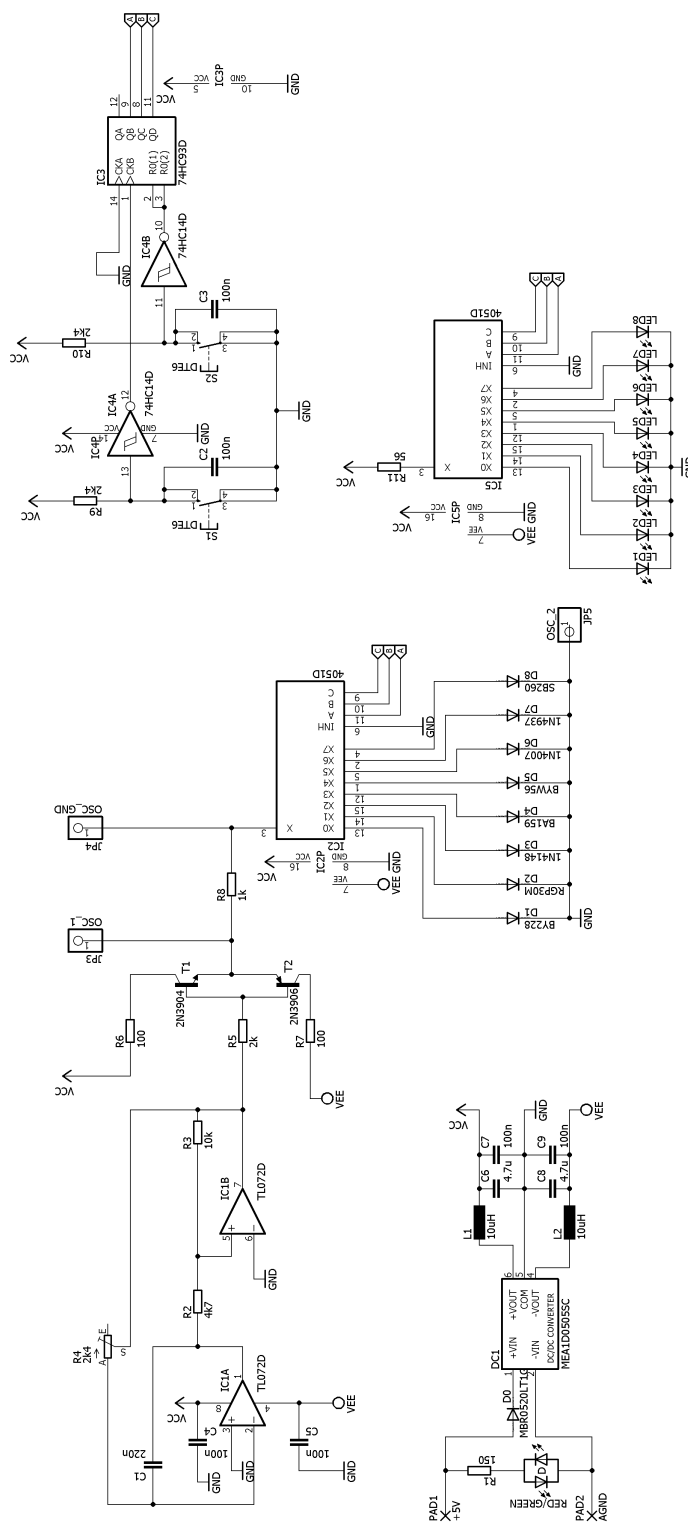
Z rovnice vyplývá že celkový předřadný odpor má být 90Ω . Z katalogového listu demultiplexoru vyplývá, že demultiplexor má odpor při sepnutém stavu 40Ω . Hodnota odporu R_{11} se tedy vypočte z rovnice 3.14 a poté je vybrána nejbližší hodnota odporu. [22]

$$R_{11} = R_{celk} - R_{demul} = 90 - 40 = 50 \Rightarrow 56 \quad [\Omega] \quad (3.14)$$

Na výstup demultiplexoru jsou poté připojeny zelené LED diody. Ovládání je stejné jako u demultiplexoru *IC2*. To znamená, že je ovládán pomocí čtyř bitů. Bit *INH* je trvale v logické 0 . Bity *A, B, C* jsou ovládány z čítače *IC3*.

3.8 Návrh DPS

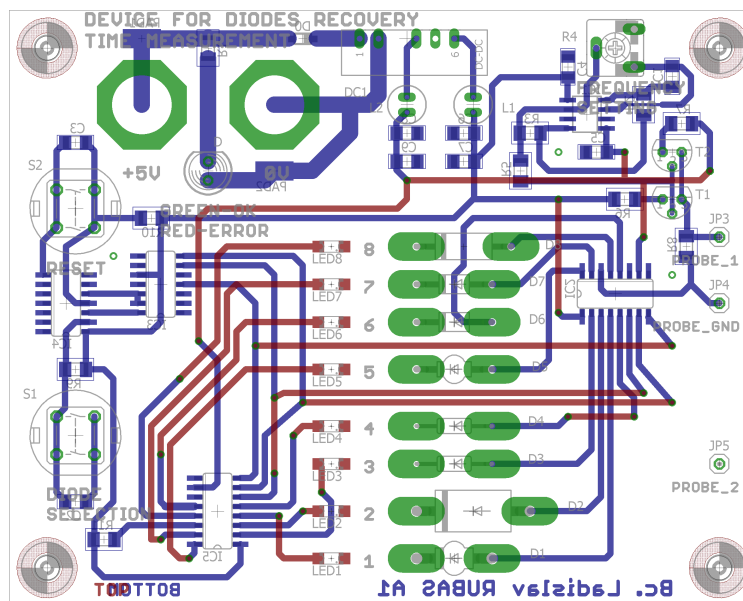
V minulých kapitolách byly probrány a navrženy jednotlivé části měřícího přípravku. Celkové schéma zapojení přípravku je na obrázku 3.12.



Obr. 3.12: Kompletní schéma zapojení měřícího přípravku.

Aby bylo možné na přípravku měřit, musí být zhotoven na DPS. Celý přípravek je zkonstruován na dvojrstvé DPS. Rozměry desky jsou 100x80 mm. Deska obsahuje z obou stran nepájivou masku a z vrchní strany popisky. Celá deska je navržena ve studenské verzi programu Eagle. Navržená deska odpovídá třídě přesnosti 4.

Tato třída přesnosti byla zvolena z těchto důvodů. Vysoká robustnost desky, možnost průchodu vodiče mezi nožičkami integrovaných obvodů, velká propojitelnost součástek a efektivní využití celé desky. Navrženou DPS můžete vidět na obrázku 3.13. Šířka spoje na desce byla zvolena co největší. A to od 0.8128 mm do 2.1844 mm. Na obou stranách desky je pak rozlita měď, která má potenciál signálu *GND*.

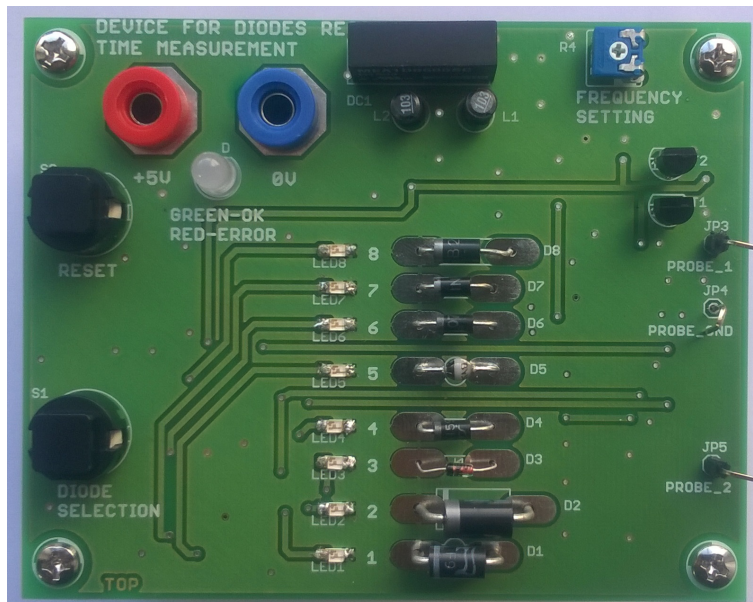


Obr. 3.13: Navržená DPS.

Jak je vidět z obrázku 3.13, jsou použity jak vývodové součástky, tak i SMD součástky. Všechny kondenzátory a odpory, kromě potenciometru R_4 , jsou v SMD provedení v pouzdru 1206. V tomto pouzdru jsou také LED diody 1 až 8. LED dioda D je v klasickém vývodovém provedení. Všechny integrované obvody, IC_1 až IC_5 , jsou v SMD provedení. Všechny ostatní součástky jsou poté ve vývodovém provedení. Mezi tyto součástky patří cívky L_1 a L_2 , tranzistory T_1 a T_2 , tlačítka S_1 a S_2 a všechny měřené diody D_1 až D_8 . Osciloskop se poté připojuje na konektory označené jako $PROBE_1$, $PROBE_2$ a $PROBE_GND$. Pro připojení napájení $+5V$ a $0V$ jsou použity panelové zdířky o průměru montážního otvoru 8 mm. Tyto panelové zdířky mají vnitřní průměr 4 mm. V každém rohu desky jsou poté umístěny montážní otvory. Všechny nápisy na desce jsou v anglickém jazyce, a to z toho důvodu, že na přípravku budou měřit i zahraniční studenti.

Dále je z obrázku 3.13 vidět, že součástky jsou na desce umístěny s ohledem na jejich vazby k ostatním součástkám. V levé horní části desky se nachází součástky pro přívod napájení. Vedle nich je poté umístěn měnič napětí s příslušným filtračním obvodem. V pravé horní části desky je zrealizován relaxační generátor s proudovým posílením. Ovlá-

dání a přepínání diody se nachází na levé straně desky. Měřené a signalizační diody se poté nachází uprostřed desky a jsou seřazeny zespoda nahoru. V pravé části přípravku se poté nachází konektory pro připojení napěťových sond osciloskopu. Na obrázku 3.14 je fotografie osazeného přípravku.

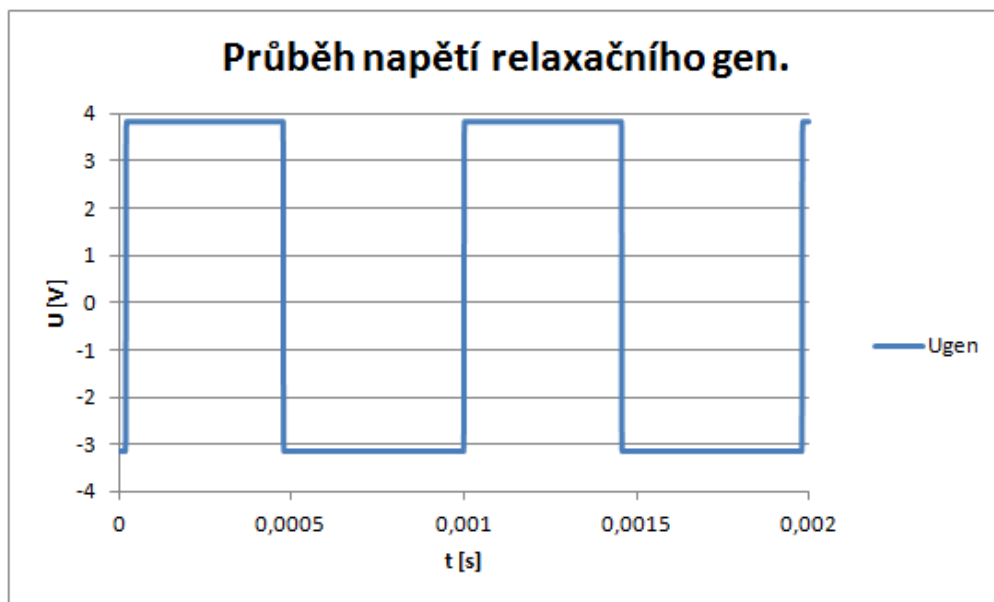


Obr. 3.14: Fotografie přípravku.

4

Ověření měřícího přípravku

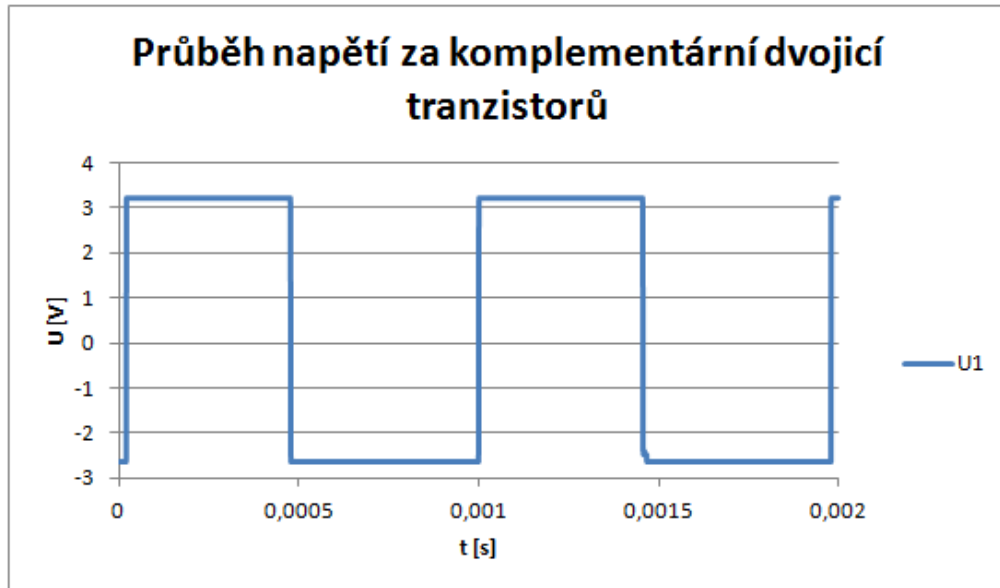
Před tím, než se podíváme na průběhy na měřených diodách, je třeba ověřit správnou funkčnost relaxačního generátoru. Průběh napětí relaxačního generátoru je vidět na obrázku 4.1.



Obr. 4.1: Průběh napětí relaxačního generátoru.

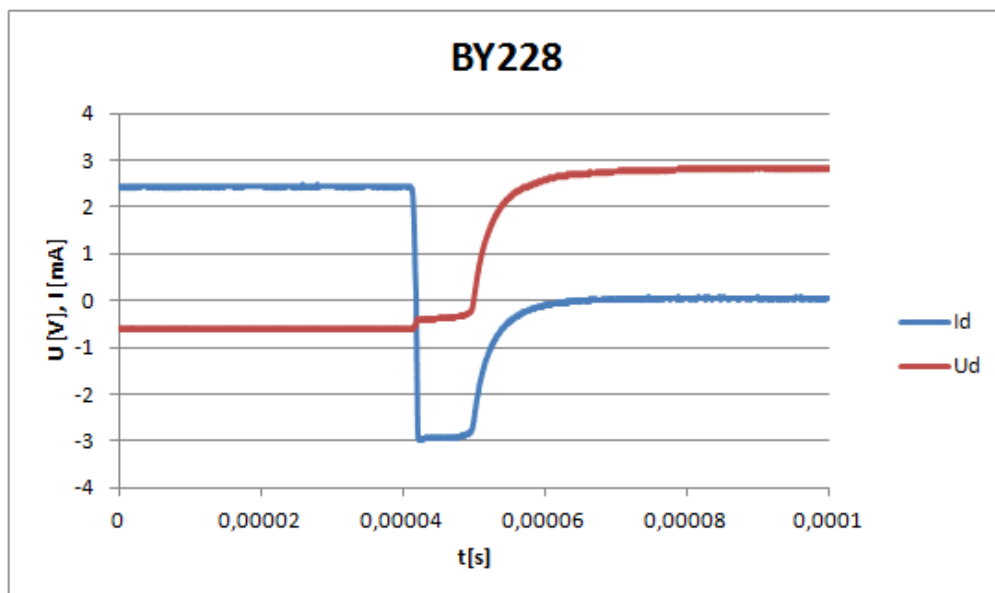
Z obrázku 4.1 je vidět, že relaxační generátor generuje na svém výstupu obdélníkový průběh. Velikost amplitudy při kladné polaritě je 3,84 V. Při záporné polaritě signálu je amplituda -3,16 V. Z toho vyplývá, že obdélníkový signál není symetrický. Nesymetrie je způsobena tím, že se jedná o klasický operační zesilovač, který má na svém výstupu určitý rozkmit výstupního napětí, i když je napájen symetrickým napájením. Rozkmit operačního zesilovače TL072 je uváděn okolo 3 V.[13]

Perioda signálu je 0,98 ms. To odpovídá frekvenci 1,02 kHz. Tato frekvence pro měření doby zotavení je vyhovující. Frekvenci lze popřípadě doladit potenciometrem R4. Toto napětí je dále přivedeno na komplementární dvojici tranzistoru. Výstupní napětí je vidět na obrázku 4.2.



Obr. 4.2: Průběh napětí relaxačního generátoru s komplementární dvojicí tranzistorů.

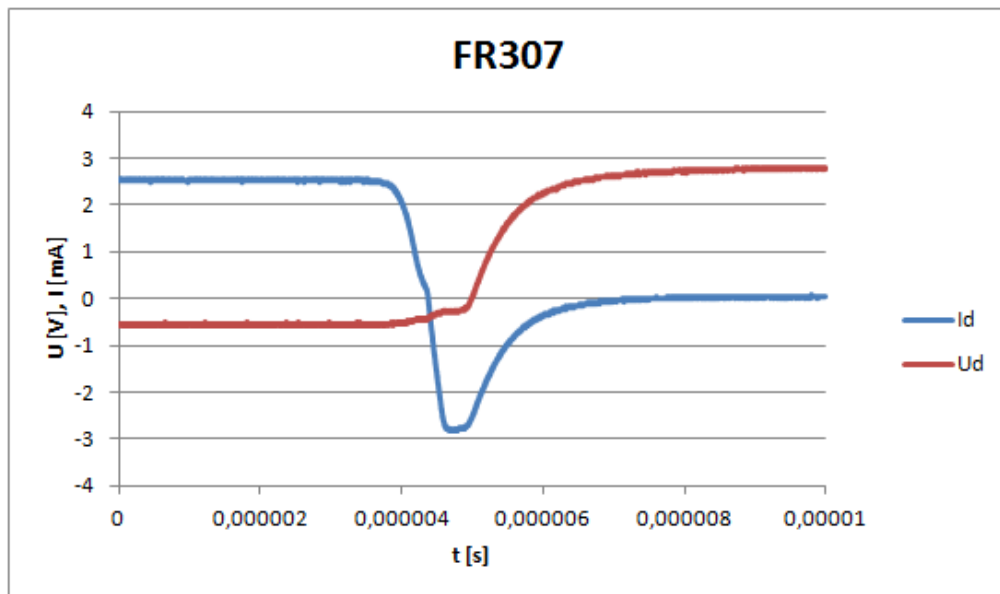
Napětí za komplementární dvojicí tranzistorů se zmenšilo. A to o hodnotu 0,64 V, respektive 0,56 V. Toto zmenšení je způsobeno úbytkem napětí na tranzistorech. Amplituda signálu kladné polarity je 3,2 V. V záporné polaritě je amplituda napětí -2,64 V. Frekvence signálu je stejná, tedy 1,02 kHz. Toto obdélníkové napětí je poté přes pracovní odpor a demultiplexor přiváděno na zvolenou diodu. Na průběhy napětí a proudu na diodách a jejich dobu zotavení se podíváme nyní.



Obr. 4.3: Průběh napětí a proudu na diodě BY228.

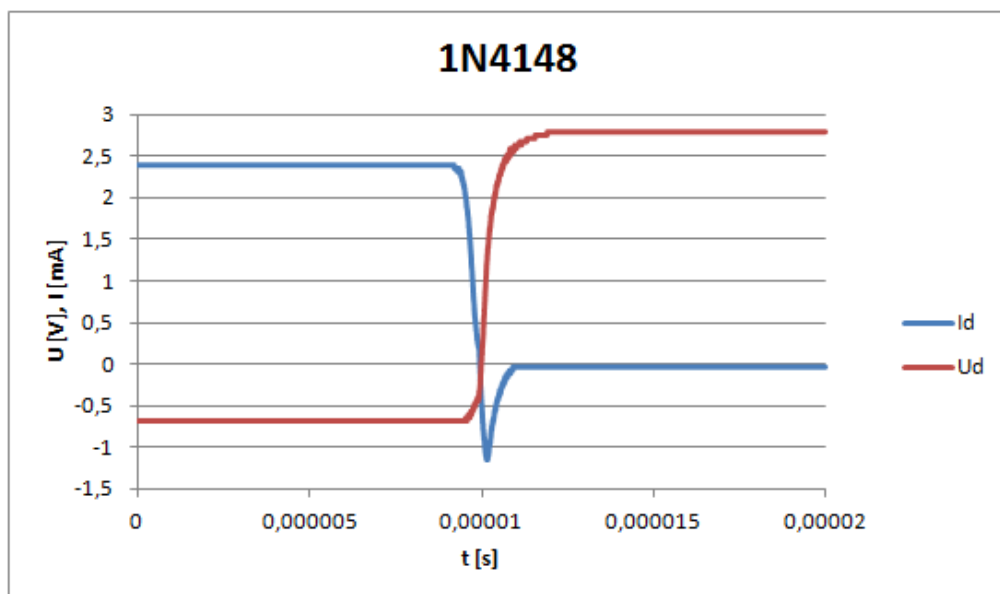
Dioda zapojená na kanálu číslo 1, je dioda s označením BY228. Naměřený průběh je na obrázku 4.3. Dioda má úbytek napětí v propustném směru 0,64 V. Proud diodou v

propustném směru je $2,56 \text{ mA}$ a maximální závěrný proud je $2,96 \text{ mA}$. Doba zpoždění je $6,02 \text{ }\mu\text{s}$ a doba ustálení je $6,08 \text{ }\mu\text{s}$. To odpovídá době zotavení $12,1 \text{ }\mu\text{s}$.



Obr. 4.4: Průběh napětí a proudu na diodě *FR307*.

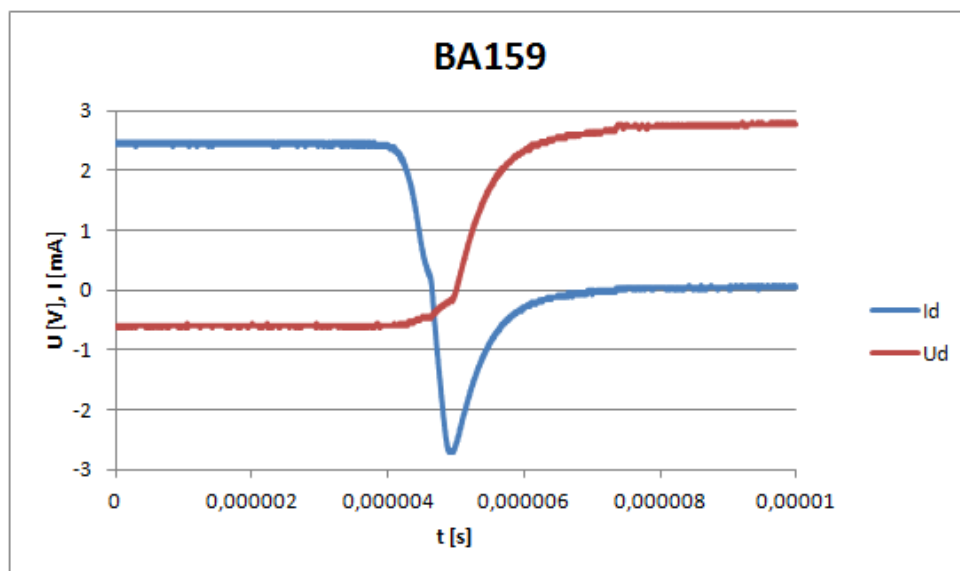
Na obrázku 4.4 je průběh proudu a napětí diody, která je zapojená na druhém kanálu. Označení této diody je *FR307*. Změřená doba zotavení této diody je $1,53 \text{ }\mu\text{s}$. Doba zpoždění je $0,4 \text{ }\mu\text{s}$ a doba ustálení je $1,13 \text{ }\mu\text{s}$. Proud v propustném směru je $2,52 \text{ mA}$ a špičkový proud v závěrném směru je $2,8 \text{ mA}$. Dioda má v propustném směru úbytek napětí $0,52 \text{ V}$.



Obr. 4.5: Průběh napětí a proudu na diodě *1N4148*.

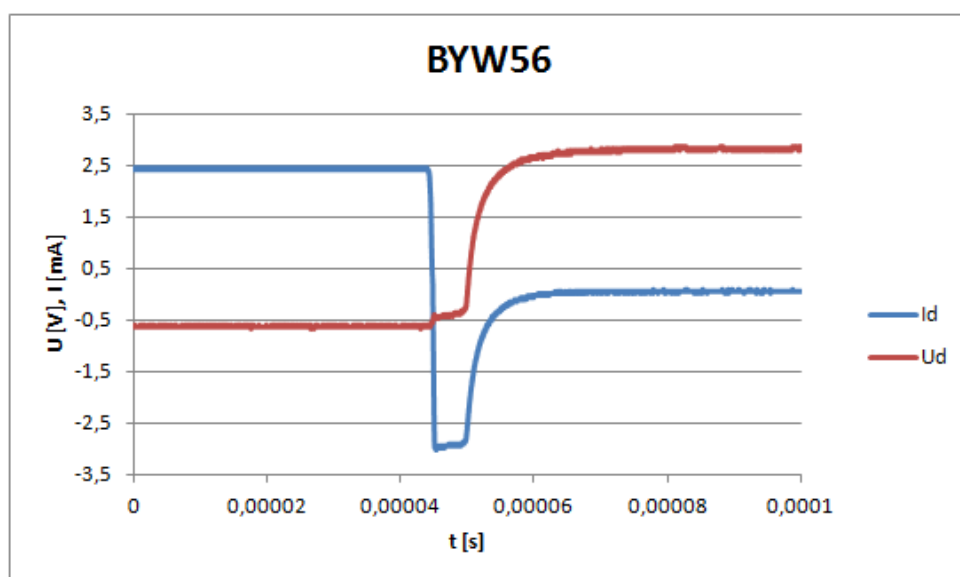
Na třetím kanálu je zapojena dioda s označením *1N4148*, její změřené průběhy jsou

na obrázku 4.5. Na osciloskopu bylo změřeno, že doba zotavení této diody je 810 ns . Doba zpoždění byla 220 ns a doba ustálení byla 590 ns . Proud diodou v propustném směru je $2,44 \text{ mA}$. Maximální proud v závěrném směru je $1,16 \text{ mA}$. Dioda má úbytek napětí v propustném směru $0,68 \text{ V}$.



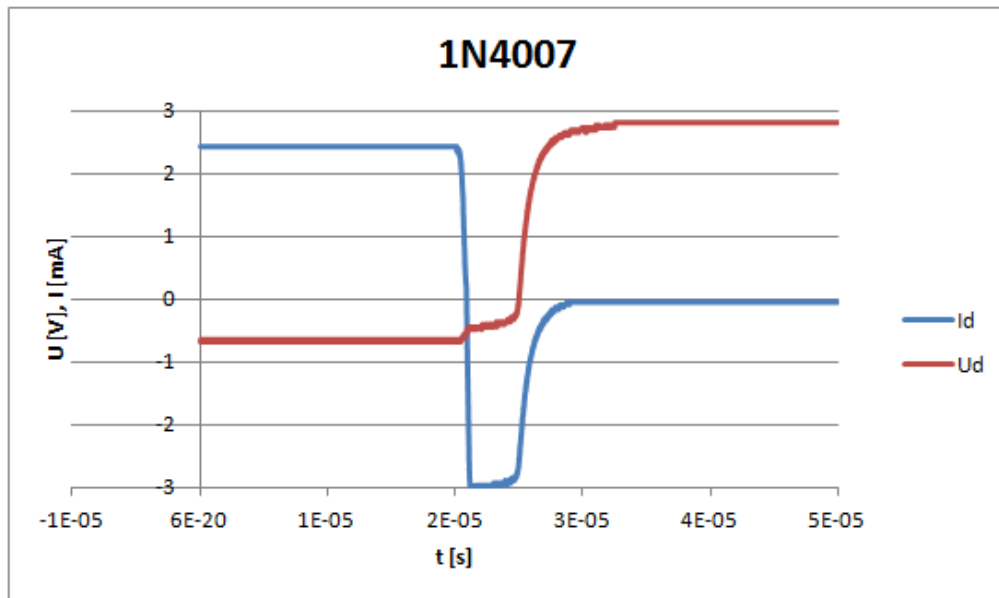
Obr. 4.6: Průběh napětí a proudu na diodě BA159.

Jako další dioda v pořadí je zapojená dioda BA159, která se nachází na čtvrtém kanálu. Její průběh napětí a proudu jsou na obrázku 4.6. Tato dioda má úbytek napětí v propustném směru $0,6 \text{ V}$ a proud $2,44 \text{ mA}$. Maximální proud v závěrném směru je $2,72 \text{ mA}$. Doba zpoždění je $0,31 \mu\text{s}$ a doba ustálení je $1,08 \mu\text{s}$. To odpovídá době zotavení $1,39 \mu\text{s}$.



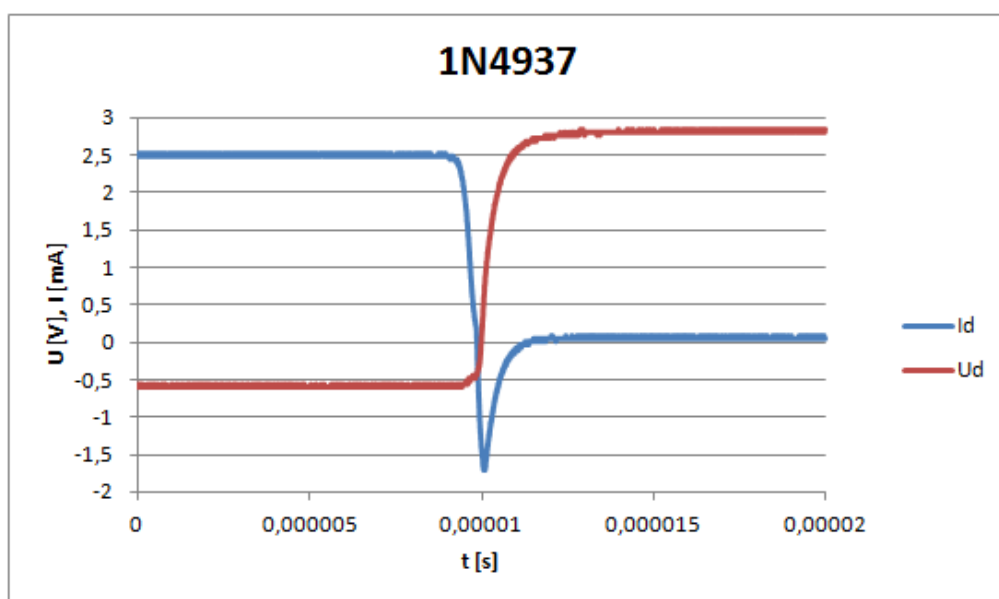
Obr. 4.7: Průběh napětí a proudu na diodě BYW56.

Na kanálu číslo pět je dioda s označením *BYW56*. Z průběhů na obrázku 4.7 je vidět, že dioda má úbytek napětí $0,68\text{ V}$. Proud diodou v propustném směru je $2,44\text{ mA}$ a v závěrném směru je maximální proud $2,96\text{ mA}$. Doba zotavení diody je $10\text{ }\mu\text{s}$. Doba zpoždění je $4,92\text{ }\mu\text{s}$ a doba ustálení je $5,08\text{ }\mu\text{s}$.



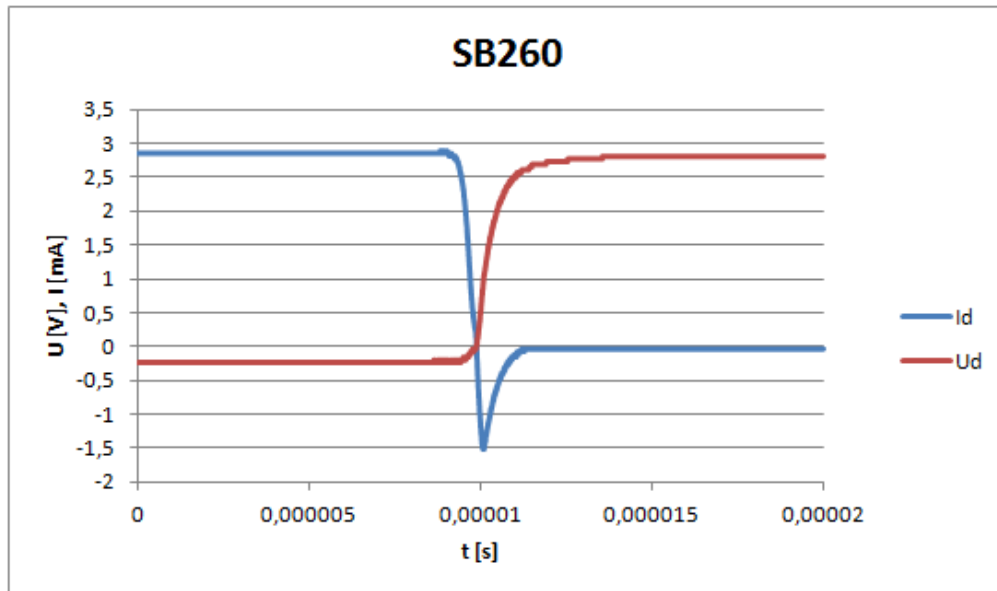
Obr. 4.8: Průběh napětí a proudu na diodě 1N4007.

Na obrázku 4.8 je dioda s označením 1N4007, která se nachází na šestém kanálu. Dioda má úbytek napětí $0,68\text{ V}$. Proud v propustném směru je $2,4\text{ mA}$ a špičkový závěrný proud je 3 mA . Doba zpoždění je $3,82\text{ }\mu\text{s}$ a doba ustálení $2,28\text{ }\mu\text{s}$. To odpovídá době zotavení $6,1\text{ }\mu\text{s}$.



Obr. 4.9: Průběh napětí a proudu na diodě 1N4937.

Předposlední dioda má označení 1N4937. Dioda má proud v propustném směru $2,48 \text{ mA}$ a maximální proud v závěrném směru $1,92 \text{ mA}$. V propustném směru má dioda úbytek napětí $0,6 \text{ V}$. Doba zpoždění je $0,21 \mu\text{s}$ a doba ustálení $0,78$. Doba zotavení je $0,99 \mu\text{s}$.



Obr. 4.10: Průběh napětí a proudu na diodě SB260.

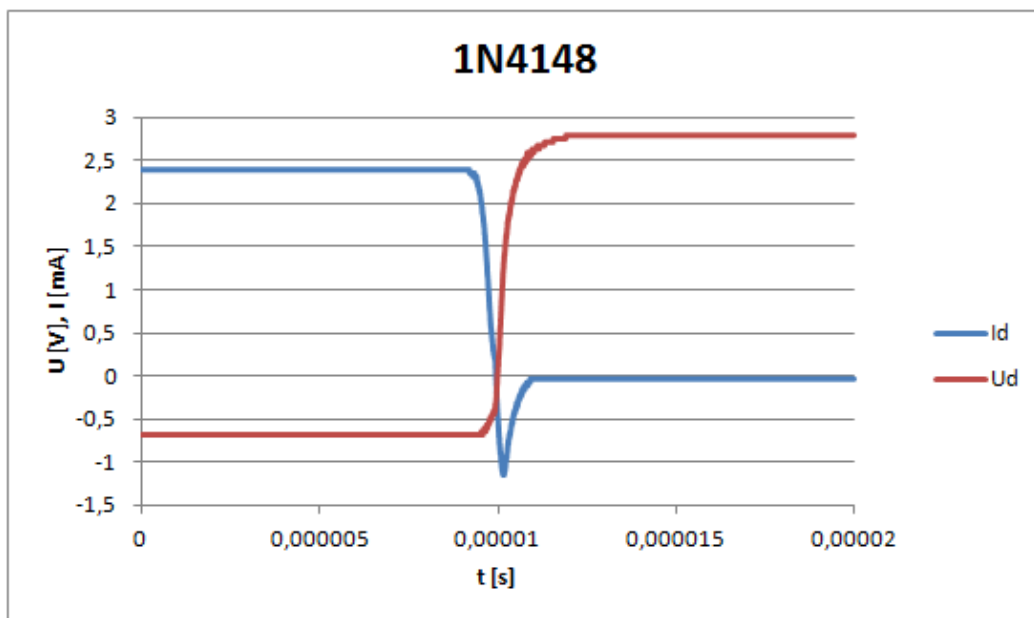
Na posledním osmém kanálu se nachází dioda s označení SB260. Doba zpoždění této diody je 200 ns . Doba ustálení je 900 ns . Doba zotavení této diody je $1,1 \mu\text{s}$. Dioda má úbytek napětí $0,24 \text{ V}$. Proud v propustném směru je $2,84 \text{ mA}$ a špičkový závěrný proud je $1,48 \text{ mA}$.

Pro přehlednost jsou naměřené údaje uvedeny v tabulce 4.1.

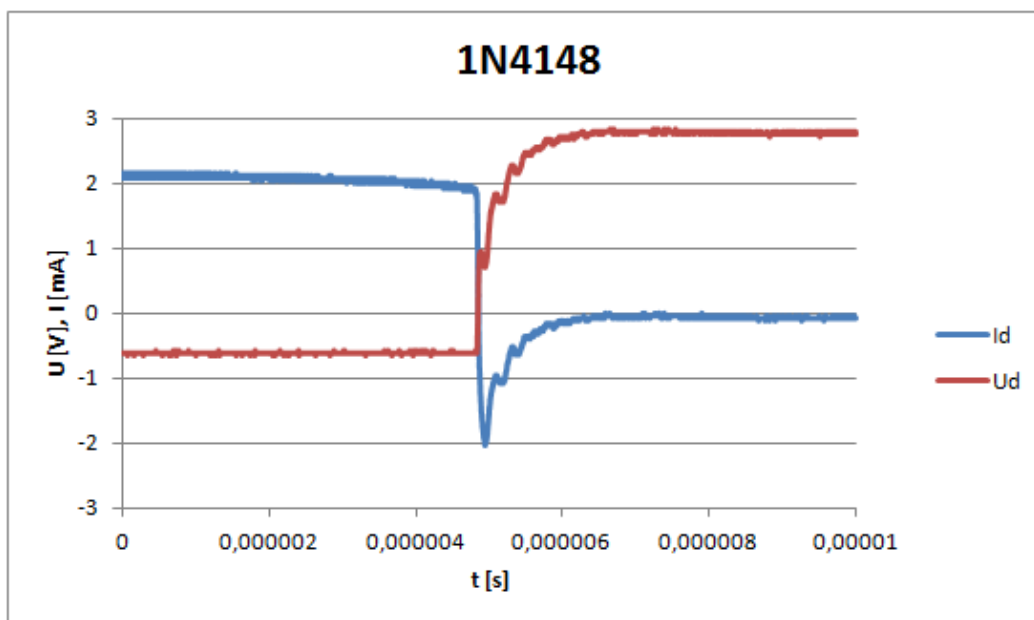
Číslo kanálu	Název diody	$t_s [\mu\text{s}]$	$t_r [\mu\text{s}]$	$t_{rr} [\mu\text{s}]$	$I_F [\text{mA}]$	$I_{R_{max}} [\text{mA}]$	$U_F [\text{V}]$
1	BY228	6,02	6,08	12,1	2,56	2,96	0,64
2	FR307	0,4	1,13	1,53	2,52	2,8	0,52
3	1N4148	0,22	0,59	0,81	2,4	1,16	0,68
4	BA159	0,31	1,08	1,39	2,44	2,72	0,6
5	BYW56	4,92	5,08	10	2,44	2,96	0,68
6	1N4007	3,82	2,28	6,1	2,4	3	0,68
7	1N4937	0,21	0,78	0,99	2,48	1,92	0,6
8	SB260	0,2	0,9	1,1	2,84	1,48	0,24

Tab. 4.1: Přehled změřených hodnot na diodách.

Na obrázcích 4.11 a 4.12 jsou uvedeny naměřené průběhy na diodě 1N4148 pomocí nového přípravku a měření doby zotavení pomocí původní metody. Je vidět, že měření na stejné diodě pomocí přípravku je bez zákmitů a doba zotavení jde lépe odečíst.



Obr. 4.11: Průběh napětí a proudu na diodě 1N4148 umístěné na přípravku.



Obr. 4.12: Průběh napětí a proudu na diodě 1N4148 měřené původní metodou.

V následující tabulce 4.2, jsou uvedeny pro srovnání doby zotavení změřené pomocí přípravku, dále doby zotavení měřené původní metodou a katalogové doby zotavení.

Název diody	t_{rr} [μs] - přípravek	t_{rr} [μs] - původní metoda	t_{rr} [μs] - katalog
BY228	12,1	12,5	20
FR307	1,53	1,74	0,5
1N4148	0,81	1,02	0,004
BA159	1,39	1,51	0,5
BYW56	10	10,5	4
1N4007	6,1	5,28	2
1N4937	0,99	1,14	0,2
SB260	1,1	1,38	0,4

Tab. 4.2: Přehled dob zotavení diod.

V tabulce 4.2 jsou uvedeny doby zotavení všech diod, které jsou umístěny na měřicím přípravku. Tyto diody byly také změřeny pomocí původní metody. Z tabulky 4.2 je vidět, že doby zotavení, změřené původní metodou, jsou o několik desetin μs delší. Jedině u diody 1N4007 je doba zotavení kratší, než při měření pomocí přípravku. Z tabulky 4.2 je také vidět, že změřené doby zotavení se liší od katalogových hodnot. To je způsobeno důvodem, že měření doby zotavení, které je uvedeno v katalogovém listu, se provádí různými metodami. Také je to způsobeno tím, že se měří při jiných protékajících proudech diodami a při jiném pracovním odporu.

5

Návrh nové měřicí úlohy

Cílem této úlohy je zjistit dynamické vlastnosti diod. Tyto vlastnosti je důležité znát, pokud se diody používají ve spínacím režimu. Při náhlé změně kladné polaroty napětí na zápornou polaritu neklesne protékající proud diodou na nulovou hodnotu, ale po dobu zotavení (t_{rr}) teče diodou proud v závěrném směru (I_r). To je způsobeno kapacitou diody. Dobu zotavení můžeme rozdělit na dobu zpoždění (t_s) a dobu ustálení (t_r).

Při době zpoždění teče diodou maximální závěrný proud (I_r), který je omezen pouze pracovním odporem R . Po této době začne proud exponenciálně klesat. Doba, po kterou klesne proud na 10% I_r se nazývá doba ustálení. Součtem doby zpoždění a doby ustálení dostáváme dobu zotavení.

Tuto dobu můžeme buď změřit pomocí osciloskopu, nebo vypočítat. Pro vypočítání doby zpoždění a doby ustálení platí tyto vzorce.

$$t_s = \tau \cdot \ln\left(1 + \frac{I_f}{I_r}\right) \quad [s] \quad (5.1)$$

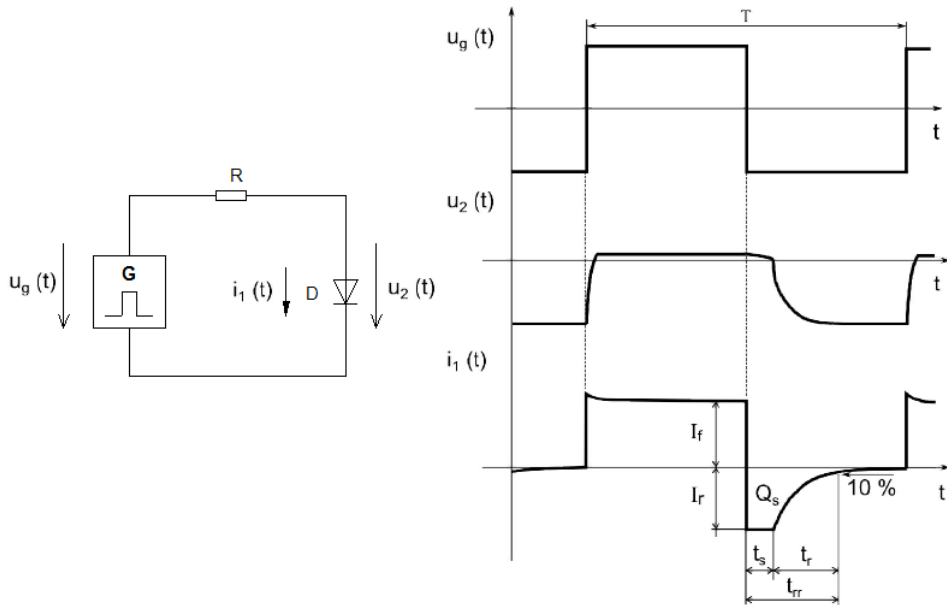
$$t_r \approx 3 \cdot \tau \approx 3 \cdot R \cdot C_r \quad [s] \quad (5.2)$$

Kde:

- I_f - proud v propustném směru
- I_r - proud v závěrném směru
- R - pracovní odpor diody
- C_r - kapacita diody v závěrném směru

Pro zotavovací náboj diody poté platí rovnice:

$$Q_s = I_r \cdot t_s \quad [C] \quad (5.3)$$

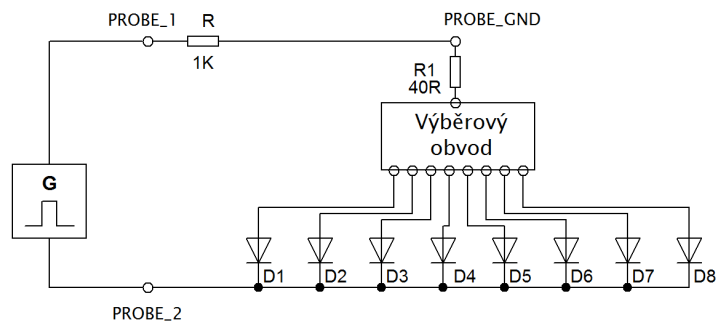


Obr. 5.1: Časové průběhy napětí a proudu na diodě.

Použité přístroje

- Zdroj stejnosměrného napětí $+5\text{ V}$.
- Digitální osciloskop s napěťovými sondami.
- Přípravek pro měření doby zotavení.

Principiální schéma zapojení



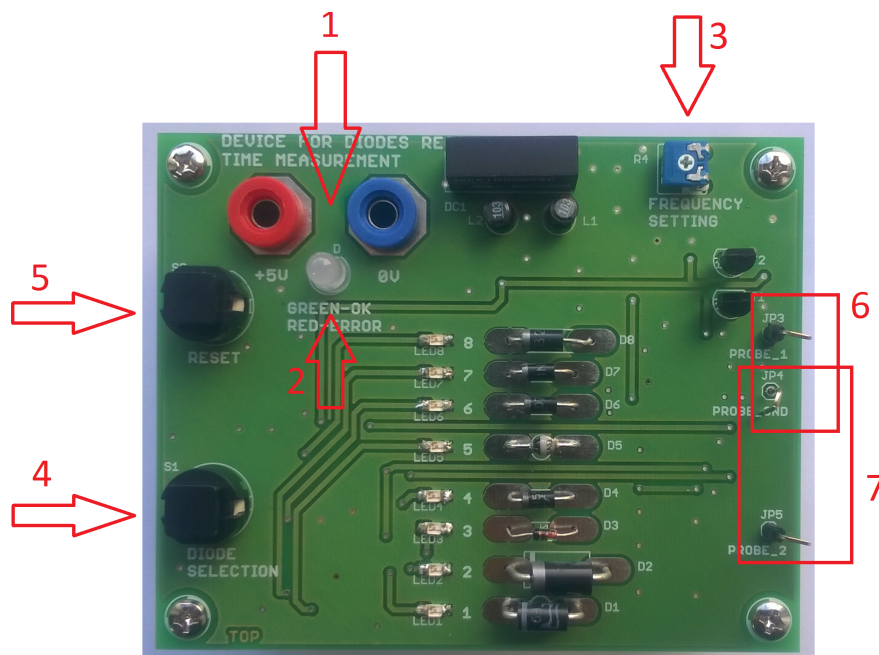
Obr. 5.2: Principiální schéma měření doby zotavení.

Z principiálního schématu je vidět (obrázek 5.2), že měřené diody jsou připojeny k výběrovému obvodu, aby se vždy měřilo pouze na jedné diodě. Odpor $R1$ představuje odpor výběrového obvodu. Před těmito diodami je v sérii zapojen odpor R o hodnotě $1\text{ k}\Omega$. Toto je pracovní odpor diod, který slouží k omezení proudu diodou. K těmto součástkám je poté připojen generátor obdélníkového signálu. Dále je z obrázku 5.2 patrné, kde se nacházejí jednotlivé konektory pro připojení napěťových sond osciloskopu.

Zadání

1. Prostudujte katalogové hodnoty měřených diod.
2. Zkontrolujte zda jsou napěťové sondy správně vykompenzované.
3. Připojte napájení +5V k měřicímu přípravku a napěťové sondy osciloskopu.
4. Změřte pro všechny diody doby zpoždění, ustálení a zotavení. Následně změřte proudy I_f , I_r a napětí U_f , U_r .
5. Z naměřených hodnot vypočítejte zotavovací náboj Q_s , časovou konstantu τ a dobu zpoždění t_s .
6. Porovnejte naměřené a vypočítané hodnoty.

Popis přípravku na měření



Obr. 5.3: Popis ovládání měřicího přípravku.

1. Svorky pro napájení - červená +5V, modrá 0V .
2. Signalizační dioda pro napájení - Zelená barva - napájení připojeno správně, červená barva - napájení je připojeno obráceně.
3. Potenciometr pro doladění frekvence - pokud není frekvence 1 kHz, nutno doladit.
4. Tlačítko S1 pro přepnutí na další měřenou diodu.
5. Tlačítko S2 pro nastavení měření od první diody.

6. Svorky pro připojení první napěťové sondy. Měření napětí na rezistoru o hodnotě $1k\Omega$. Toto napětí odpovídá proudu protékající diodou v mA .
7. Svorky pro připojení druhé napěťové sondy. Měření napětí na zvolené diodě, ale v obrácené polaritě.

Naměřené a vypočítané hodnoty

Název diody	t_s [μs]	t_r [μs]	t_{rr} [μs]	I_F [mA]	I_R [mA]	U_F [V]	U_r [V]
BY228							
FR307							
1N4148							
BA159							
BYW56							
1N4007							
1N4937							
SB260							

Tab. 5.1: Naměřené hodnoty.

Vzorce pro výpočet Q_s , τ , t_s .

$$Q_s = I_r \cdot t_s \quad [C] \quad (5.4)$$

$$\tau \approx \frac{t_r}{3} \quad [s] \quad (5.5)$$

$$t_s = \tau \cdot \ln\left(1 + \frac{I_f}{I_r}\right) \quad [s] \quad (5.6)$$

Název diody	Q_s [nC]	τ [μs]	t_s [μs]
BY228			
FR307			
1N4148			
BA159			
BYW56			
1N4007			
1N4937			
SB260			

Tab. 5.2: Vypočítané hodnoty.

Vzorové naměřené a vypočítané hodnoty

Název diody	t_s [μs]	t_r [μs]	t_{rr} [μs]	I_F [mA]	I_R [mA]	U_F [V]	U_r [V]
BY228	6,02	6,08	12,1	2,56	2,96	0,64	2,8
FR307	0,4	1,13	1,53	2,52	2,8	0,52	2,8
1N4148	0,22	0,59	0,81	2,4	1,16	0,68	2,8
BA159	0,31	1,08	1,39	2,44	2,72	0,6	2,76
BYW56	4,92	5,08	10	2,44	2,96	0,68	2,64
1N4007	3,82	2,28	6,1	2,4	3	0,68	2,76
1N4937	0,21	0,78	0,99	2,48	1,92	0,5	2,8
SB260	0,2	0,9	1,1	2,84	1,48	0,24	2,8

Tab. 5.3: Naměřené hodnoty - vzorová tabulka.

Název diody	Q_s [nC]	τ [μs]	t_s [μs]
BY228	3,74	2,03	1,26
FR307	0,68	0,38	0,24
1N4148	0,26	0,20	0,22
BA159	0,63	0,36	0,23
BYW56	3,01	1,69	1,02
1N4007	1,34	0,76	0,45
1N4937	0,41	0,26	0,22
SB260	0,48	0,30	0,32

Tab. 5.4: Vypočítané hodnoty - vzorová tabulka.

6

Závěr

Hlavním úkolem této diplomové práce bylo navrhnout, prakticky zrealizovat a ověřit funkci měřicího přípravku pro měření dynamických charakteristik diod. Konkrétně se jedná o měření doby zotavení vybraných diod. Tento hlavní cíl práce byl splněn. Byl navrhnout, zrealizován a prakticky vyzkoušen měřící přípravek pro měření doby zotavení celkem na 8 různých diodách. V práci jsou změřeny doby zotavení u všech vytipovaných diod, a dále jsou uvedeny průběhy napětí a proudu na těchto diodách.

Realizovaný přípravek bude sloužit pro studenty při laboratorním cvičení z předmětu Fyzikální Elektronika. Proto byly zrealizovány celkem dva stejné měřící přípravky. Ke konci práce byla upravená měřící úloha pro toto laboratorní cvičení.

Nově zrealizovaný přípravek má několik výhod. První výhodou je, že byl odstraněn problém s využíváním oddělovacího transformátoru, přes který byl napájen osciloskop. Další výhodou je, že studenti nemusí přepínat a připojovat další diody ručně, ale přepínání diod je realizováno pomocí tlačítek. Poslední a nejdůležitější výhodou je to, že naměřené průběhy jsou bez rušivých zákmitů. To má za následek, že naměřené průběhy jsou čitelnější a hodnoty dob zotavení a proudů jsou lépe měřeny.

Z naměřených výsledků plyne, že katalogové hodnoty se liší od naměřených hodnot. To je způsobeno důvodem, že měření doby zotavení, která je uvedena v katalogovém listu se měří různými metodami s jinými parametry proudů a pracovního odporu. Z toho plyne, že katalogové hodnoty dob zotavení jsou spíše orientační údaje v jakých jednotkách se může doba zotavení u různých diod pohybovat. Reálná doba zotavení pak záleží na konkrétní aplikaci, kde jsou diody využívány.

V rámci návrhu vylepšení měřicího přípravku je možné navrhnout lepší generátor obdélníkového signálu, protože navržený generátor není zcela symetrický. Jako další vylepšení navrhuji možnost připojení více měřených diod, a to buď s využitím 16-ti kanálového multiplexoru, nebo použít více menších multiplexorů. Posledním návrhem vylepšení je snížit spotřebu přípravku. Spotřeba se pohybuje okolo 53 mA . Při nižší spotřebě by mohl být navržen napájecí obvod, aby mohl být přípravek napájen z baterie.

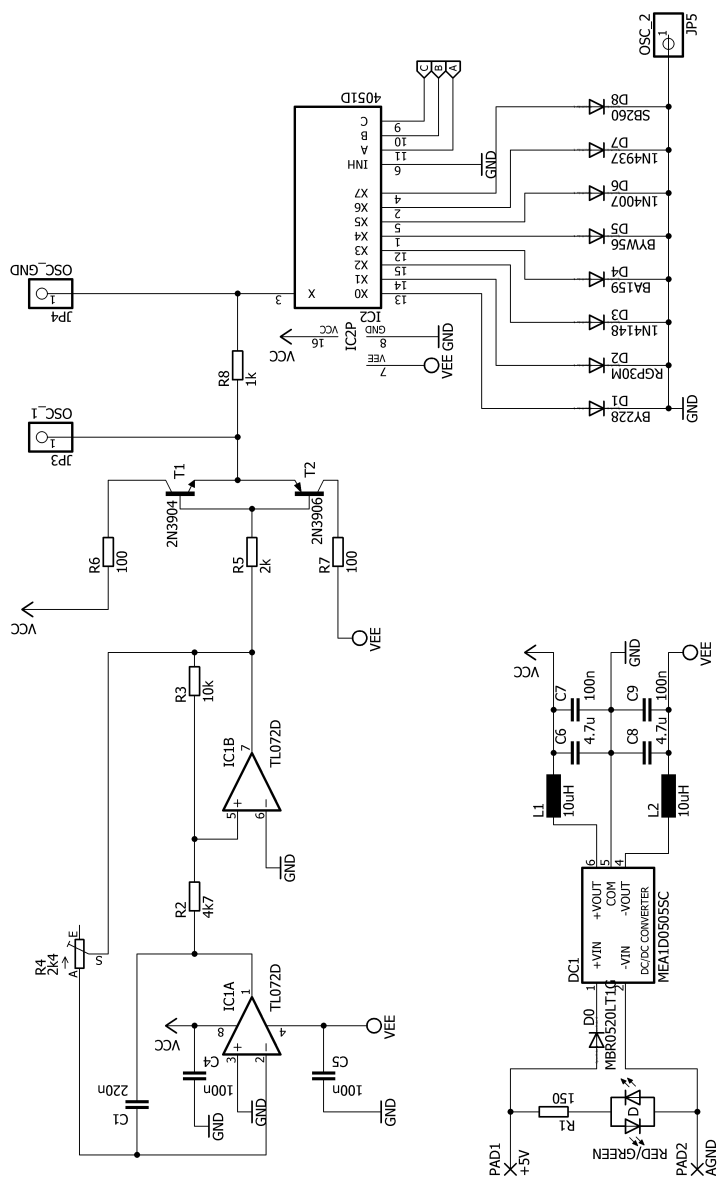
Literatura

- [1] Dioda. [online]. [cit. 06. 12. 2015]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Dioda>
- [2] BRZOBOHATÝ, J., MUSIL, V., BAJER, A., BOUŠEK, J. *Elektronické součástky* [online]. Brno: VUT v Brně, 2002 [cit. 06. 12. 2015]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~bousek/Elektronicke_soucastky_aktualni.pdf
- [3] PN přechod – dioda. [online]. [cit. 06. 04. 2016]. Dostupné z: http://lucy.troja.mff.cuni.cz/~tichy/elektross/soucastky/jeden_prechod/dioda.html
- [4] Voltampérová charakteristika diody. [online]. [cit. 06. 12. 2015]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/578>
- [5] MAŤÁTKO, Jan. *Elektronické součástky a základní obvody*. Praha: SNTL, 1987. ISBN
- [6] Kapacita diody. [online]. [cit. 06. 12. 2015]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/579>
- [7] BLECHA, Tomáš. *Dynamické vlastnosti diod*, podklady k přednášce z předmětu KTE/FE.
- [8] Základy elektroniky. [online]. [cit. 06. 12. 2015]. Dostupné z: <http://www.spsemoh.cz/vyuka/zel/diody.htm>
- [9] Mikroelektronické systémy. [online]. [cit. 06. 12. 2015]. Dostupné z: <http://352lab.vsb.cz/ServerFinalVer/Tonhauser/sou.html>
- [10] Murata Power Solutions Inc. *DC-DC Converter* [online]. 2013. [cit. 30. 2. 2016]. Dostupné z: <http://power.murata.com/en/products/dc-dc-converters.html>
- [11] Murata Power Solutions Inc. *MEA1D0505DC DC-DC Converter* [online]. 2013. [cit. 30. 2. 2016]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/1790428.pdf>
- [12] PINKER, Jiří, KOUCKÝ, Václav. *Analogové elektronické systémy. 2. vydání*. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. ISBN 80-7082-506-5.

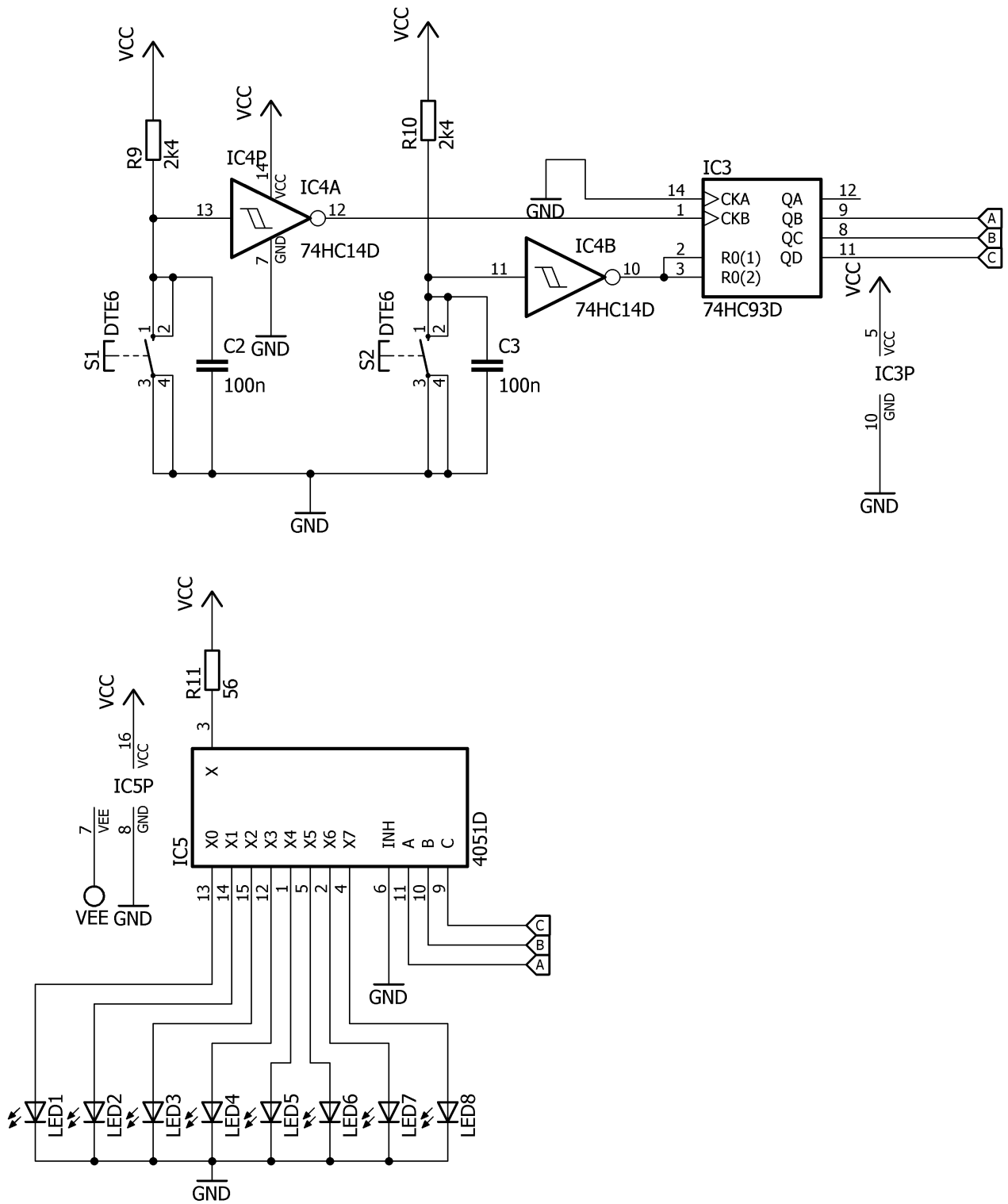
- [13] Texas Instruments Inc. *TL072 Operational Amplifiers*. [online]. 1998 [cit. 16. 02. 2016]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/926/003/tl072-smd-datasheet-1.pdf>
- [14] Vishay Semiconductors Inc. *BY228 Standard Diode*. [online]. 2012 [cit. 16. 02. 2016]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/86003/by228.pdf>
- [15] Multicomp Inc. *FR307 Standard Power Diode*. [online]. 2006 [cit. 17. 02. 2016]. Dostupné z: <http://www.farnell.com/datasheets/315151.pdf>
- [16] Vishay Semiconductors Inc. *1N4148 Fast Switching Diodes*. [online]. 2013 [cit. 17. 02. 2016]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/81857/1n4148.pdf>
- [17] Vishay Semiconductors Inc. *BA159 Fast Switching Diodes*. [online]. 2013 [cit. 17. 02. 2016]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/88536/ba157.pdf>
- [18] Vishay Semiconductors Inc. *BYW56 Standard Diode*. [online]. 2015 [cit. 17. 02. 2016]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/86049/byw52.pdf>
- [19] Vishay Semiconductors Inc. *1N4007 Standard Diode*. [online]. 2011 [cit. 17. 02. 2016]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/88503/1n4001.pdf>
- [20] Vishay Semiconductors Inc. *1N4937 Fast Switching Diode*. [online]. 2013 [cit. 17. 02. 2016]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/88508/1n4933.pdf>
- [21] Vishay Semiconductors Inc. *SB260 Schottky Diode*. [online]. 2013 [cit. 17. 02. 2016]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/docs/88717/sb220.pdf>
- [22] Texas Instruments Inc. *74HC4051 Analog Multiplexers*. [online]. 2011 [cit. 20. 02. 2016]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/425/147/74hc4051-dip16-texas-instruments-datasheet-1.pdf>
- [23] Texas Instruments Inc. *74HC93 Binary Counter*. [online]. 1990 [cit. 20. 02. 2016]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/951/021/74hc-93-smd-datasheet-1.pdf>
- [24] Základy ovládání mikrokontroléru. *Ošetření zákmitů*. [online]. [cit. 20. 02. 2016]. Dostupné z: <http://www.tajned.cz/2013/10/osetreni-zakmitu-na-vstupnim-pinu-mikrokontroleru/>
- [25] Texas Instruments Inc. *74HC93 Schmitt Inverter*. [online]. 1993 [cit. 20. 02. 2016]. Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/425/009/74hc-14-datasheet-1.pdf>
- [26] FIRŠTOVÁ, Zdeňka. *Pravidla pro bibliografické odkazy a citace informačních zdrojů*. Plzeň: Univerzitní knihovna ZČU v Plzni, 2011. [Cit. 2. 4. 2016]. Dostupné z: <http://www.iso690.zcu.cz>

Příloha A

Schéma zapojení



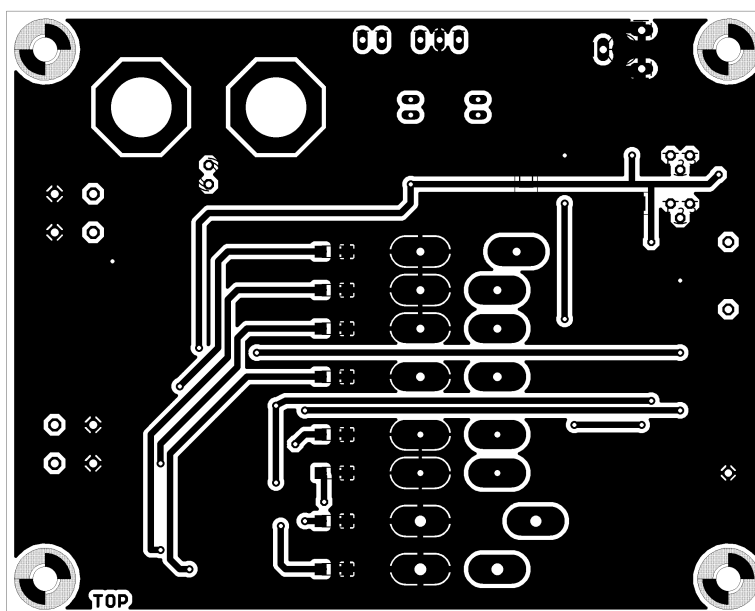
Obr. A.1: Schéma zapojení měřícího přípravku 1. část.



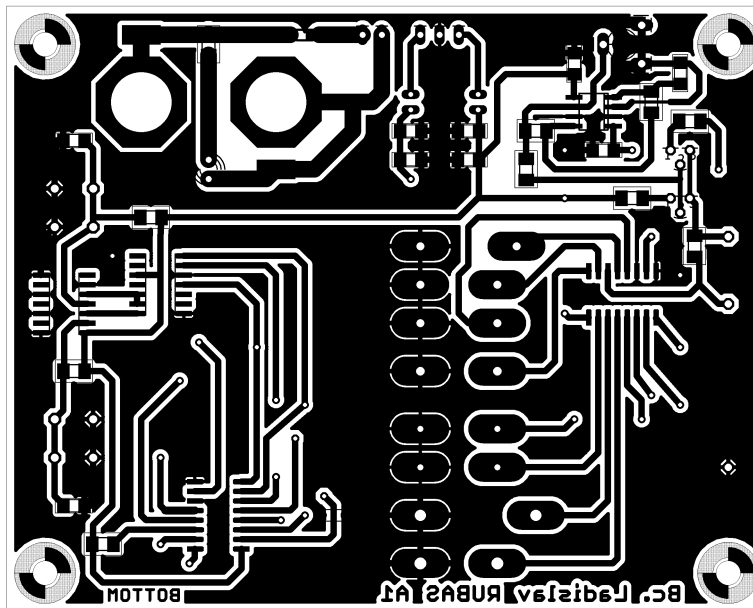
Obr. A.2: Schéma zapojení měřícího přípravku 2. část.

Příloha B

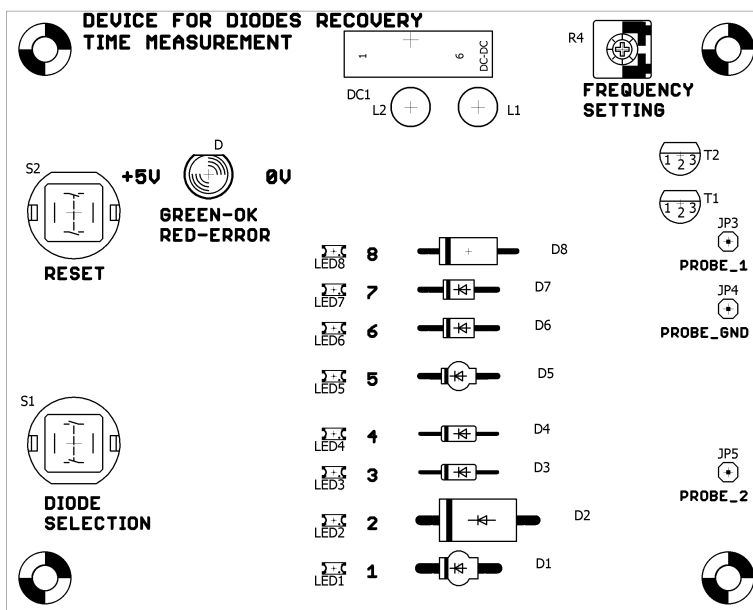
Deska plošného spoje



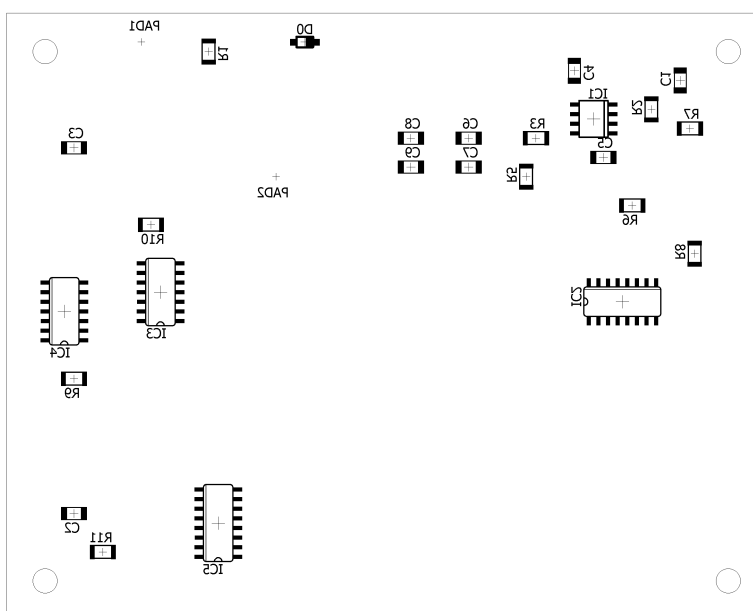
Obr. B.1: Deska plošného spoje - Vrchní (TOP) strana (měřítko 1:1).



Obr. B.2: Deska plošného spoje - Spodní (BOTTOM) strana (měřítko 1:1).



Obr. B.3: Osazovací výkres - Vrchní (TOP) strana (měřítko 1:1).



Obr. B.4: Osazovací výkres - Spodní (BOTTOM) strana (měřítko 1:1).

Příloha C

Seznam součástek

Součástka	Hodnota	Popis	Pouzdro	Množství
R1	150Ω	Rezistor	1206	1x
R2	$4,7k\Omega$	Rezistor	1206	1x
R3	$10k\Omega$	Rezistor	1206	1x
R4	$5k\Omega$	Potenciometr	CA6V	1x
R5	$2k\Omega$	Rezistor	1206	1x
R6, R7	100Ω	Rezistor	1206	2x
R8	$1k\Omega$	Rezistor	1206	1x
R9, R10	100Ω	Rezistor	1206	2x
R11	56Ω	Rezistor	1206	1x
S1, S2		Tlačítko	DTE6	2x
C1	$220nF$	Keramický kondenzátor	1206	1x
C2 - C5, C7 - C9	$100nF$	Keramický kondenzátor	1206	6x
C6, C8	$4,7\mu F$	Keramický kondenzátor	1206	2x

Tab. C.1: Seznam součástek 1. část.

Součástka	Hodnota	Popis	Pouzdro	Množství
L1, L2	$10\mu H$	Induktor		2x
DC1	$\pm 5V$	Izolovaný DC měnič	SIP	1x
IC1	TL072	Operační zesilovač	S08	1x
IC2, IC5	74HC4051	Demultiplexor	S016	2x
IC3	74HC93	Binární čítač	S014	1x
IC5	74HC14	Schmittův k. o.	S014	1x
LED1 - LED8	GREEN	LED dioda	1206	8x
LED0	RED/GREEN	LED dioda	5mm	1x
D0	MBR0520LT1G	Dioda	SOD123	1x
D1	BY228	Dioda	SOD64	1x
D2	FR307	Dioda	DO201	1x
D3	1N4148	Dioda	DO35	1x
D4	BA159	Dioda	DO41	1x
D5	BYW56	Dioda	SOD57	1x
D6	1N4007	Dioda	DO41	1x
D7	1N4937	Dioda	DO41	1x
D8	SB260	Dioda	DO15	1x
PAD1	RED	Panelová zdířka	8mm	1x
PAD2	BLUE	Panelová zdířka	8mm	1x
JP1 - JP3		Konektor		3x
T1	2N3904	Bipolární tranzistor	TO92	1x
T2	2N3906	Bipolární tranzistor	TO92	1x

Tab. C.2: Seznam součástek 2. část.