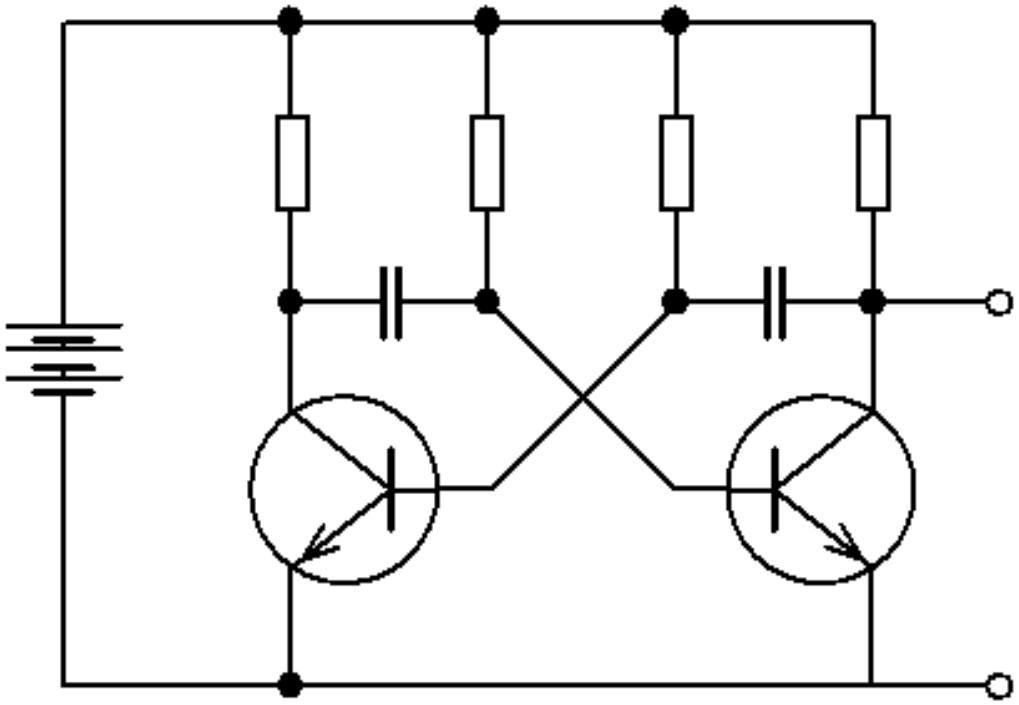
Gymnázium Botičská

Netradiční sbírka z fyziky VI

Elektrické obvody 3

Jakub Šafařík



Obsah

Seznam obrázků

Seznam rovnic

Seznam grafů

Předmluva

Svět kolem nás je neodmyslitelně spjat s elektřinou, elektrickými stroji a přístroji, tedy i s elektrickými součástkami, z nichž jsou námi používané funkční celky konstruovány. V moderním světě bychom bez elektrických zařízení, které nám značně usnadňují život, již nebyli schopni fungovat jako společnost, ani jako jedinci. Pochopit do detailu přesné postupy a principy fungování celých elektrických přístrojů se někdy zdá téměř nemožné.

Pokud se však nevzdáme hned na začátku a zahájíme naši objevnou cestu po tajích elektrických přístrojů, nezbývá nám nic jiného, než rozluštit tajemství elektrických součástek – základních kamenů těchto zařízení. Pochopíme-li základní funkci součástek, můžeme pokračovat dále k větším celkům, kterými jsou elektrické obvody, následně celé funkční bloky až nakonec pochopíme celý mechanismus a funkci vybraného přístroje.

Tento úkol není vůbec jednoduchý, zvláště v době, kdy nás výrobci zařízení nutí stát se pouhými uživateli těchto přístrojů a to velmi často bez možnosti porozumět principu jejich funkce. Věřím, že odpovědi na některé otázky, které si zvídavý uživatel moderních přístrojů ohledně jejich funkce pokládá, nalezne přímo v tomto textu.

Sbírka je třetím dílem série zabývající se elektrickými obvody. Jak se bude postupně počet publikací rozrůstat, bude čtenář mít šanci seznámit se s čím dál větším spektrem součástek a elektrických obvodů.

Ing. Jakub Šafařík, Ing. Paed. IGIP
e-mail: SafarikJ@gybot.cz

V Praze 20. 10. 2017, rev. 1.1.1

Úvod

Šestý díl sbírky netradičních úloh z fyziky je zaměřen na elektrické obvody. Látka navazuje na předcházející sbírky – Elektrické obvody 1 a Elektrické obvody 2, které byly úvodem do elektrických obvodů. Tento text si klade za cíl popsat funkci polovodičových součástek, jejich charakteristiky a následné využití v jednoduchých i složitějších obvodech.

Publikace je rozdělena do dvanácti kapitol, které na sebe navazují. Pro lepší názornost jsou v kapitole Přílohy uvedeny fotografie některých zapojení. Postupy sestavení jednotlivých obvodů jsou v učebnici detailně vysvětleny a jejich schémata podrobně popsána. Na základě takto vyložené problematiky by následně neměl být problém vyřešit úkoly, které jsou uvedeny v každé kapitole. Tyto úkoly si kladou za cíl ověřit znalosti a procvičit nabyté zkušenosti v tematice elektrických obvodů. Pro zájemce o hlubší studium problematiky slouží seznam doporučené literatury, ve které je možné nalézt informace sahající za rámec této sbírky.

Při práci s tímto textem ve školních lavicích je doporučeno, aby studenti pracovali ve dvojicích, společně konzultovali návrhy řešení a vybírali nejlepší cestu k dosažení požadovaného cíle. Pro vyřešení zadaných úkolů je většinou možné volit z několika postupů, které se od sebe liší nejen složitostí, ale i vhodností návrhu pro konkrétní využití. V ideálním případě by studenti měli být schopni vybírat postupy, návrhy a řešení, které budou z hlediska časového i finančního optimální.

I. Polovodiče

Již ze základní školy víme, že látky můžeme rozdělit na elektrické vodiče a elektrické izolanty.[1] Izolanty jsou tedy látky, které v dané aplikaci nevedou (či vedou velmi málo) elektrický proud – řádově $\rho > 10^8\ \Omega\cdot m$. Vodiče naopak jsou látky, které v dané aplikaci vedou (či vedou velmi dobře) elektrický proud – řádově $\rho < 10^{-6}\ \Omega\cdot m$. Z rozmezí hodnot měrných odporů vodičů a izolantů je patrné, že zbývá poměrně široký interval hodnot měrných odporů ($10^{-6}\ \Omega\cdot m - 10^8\ \Omega\cdot m$), jež přísluší látkám, které nazýváme polovodiče.[2]

Polovodiče tedy můžeme definovat jako látky, které mají velmi široký rozsah měrného odporu, který je závislý především na dvou parametrech:

- teplotě
- osvětlení

Mezi nejznámější polovodiče patří: křemík, germanium, selen, telur, uhlík (grafit), sulfid olovnatý, sulfid kademnatý, arsenid galia; nově se objevují i organické formy látek, které vykazují vlastnosti a chování polovodičů.

Z historického hlediska se datuje nástup polovodičů na scénu elektronických zařízení do 40. let 20. století, kdy v přístrojích postupně začali nahrazovat vakuové elektronky. S pokrokem v miniaturizaci se začaly polovodičové prvky ve stále větším množství vyskytovat jako součásti různých elektrických zařízení či funkčních bloků. V dnešní době by již žádný přístroj nemohl fungovat bez polovodičových prvků, jakými jsou například: dioda, tranzistor, integrované obvody, mikroprocesory…

[1] Toto dělení je samozřejmě silně relativní. Záleží na aplikaci, pro kterou danou látku používáme. Někdy lze ten samý prvek považovat za izolant, jindy se chová jako dobrý vodič. Záleží na vnějších podmínkách (velikost zdroje napětí, velikost sledovaného proudu…).

[2] Při srovnání měrného odporu nejlepšího vodiče (stříbra) a nejlepšího izolantu (diamant) zjistíme, že se liší o 24 řádů. Ve fyzice neexistuje jiná charakteristika látek, která by měla tak široký interval.

II. Polovodičové součástky bez přechodu

Mezi polovodičové součástky bez přechodu PN patří prvky, které využívají pro svou funkci procesy probíhající v polovodiči v důsledku působení vnějších činitelů, např.: teploty, osvětlení, magnetického pole, silného elektrického pole apod. Pro naši potřebu budou zajímavé především dvě součástky – termistor a fotorezistor.

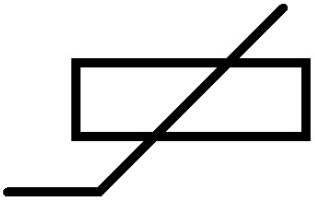
1. Termistor

Termistor je polovodičová součástka, jejíž vlastnost – elektrický odpor, je silně závislá na teplotě. Jedná se prakticky o rezistor, který je vyroben z polovodičového materiálu. Na rozdíl od rezistoru, kde závislost elektrického odporu na teplotě je přibližně lineární, u termistoru je tato funkce exponenciální. Termistory můžeme dle závislosti odporu na teplotě rozdělit do dvou skupin:

- Pozitivní (PTC) – s rostoucí teplotou elektrický odpor součástky roste.
- Negativní (NTC) – s rostoucí teplotou elektrický odpor součástky klesá.

Schematická značka termistoru je uvedena na Obr. 1.1. Termistor lze využít například pro:

- Měření teploty – musíme znát V-A charakteristiku termistoru.
- Měření průtokového množství – termistor se nejprve zahřeje průchodem elektrického proudu na požadovanou teplotu a následně se ponoří do proudu kapaliny nebo plynu, který jej ochlazuje. Ochlazení je závislé na průtoku (při dané teplotě protékající látky).
- Kompenzace odporu žhavícího vodiče – kovové vlákno má za studena malý odpor, který po zahřátí několikrát vzroste. Při zapnutí spotřebiče nastává proto velký proudový náraz. Dáme-li do série s vodičem termistor (ten má za studena velký odpor), jeho odpor postupně klesá s rostoucí teplotou. Tím zabráníme průchodu velkého proudu na počátku.



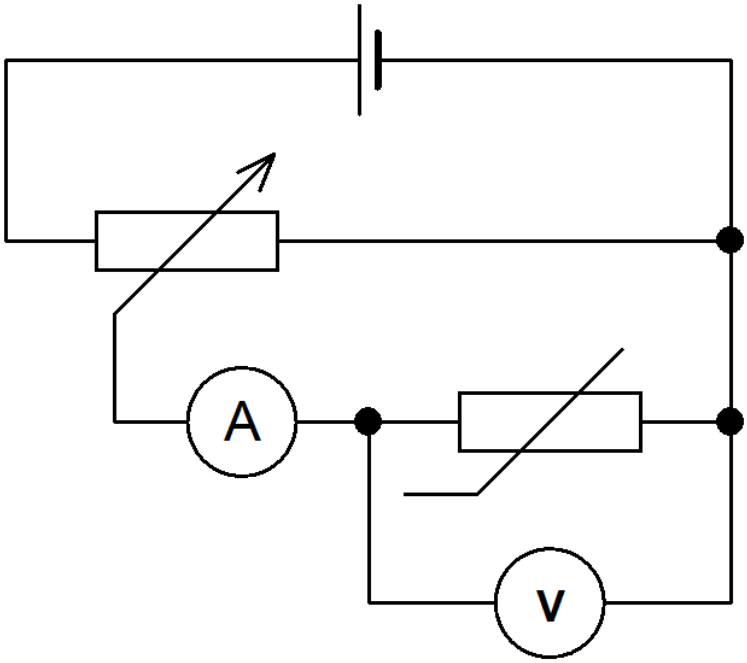
Obr. 1.1: Schematická značka termistoru

K určení velikosti odporu termistoru při dané teplotě můžeme použít buď přímé metody – měření je velmi jednoduché a vyžaduje pouze propojení termistoru k ohmmetru (multimetru) – viz Obr. 1.2.

Obr. 1.2: Měření odporu termistoru ohmmetrem

Nebo můžeme měření provést nepřímou metodou – změříme napětí na termistoru a proud tekoucí termistorem. Nepřímá metoda vyžaduje zapojení voltmetru, ampérmetru a vhodného zdroje napětí.[3] **Vždy se musíme ujistit, že v zapojeném obvodu nejsou překročeny mezní parametry součástek!** Termistor připojíme k takovému napětí a poteče jím takový proud, který nepřekročí maximální povolené hodnoty! Proto budeme raději vždy připojovat součástky přes reostat (v zapojení – dělič napětí). Schéma obvodu je znázorněno na Obr. 1.3.

[3] Pozor na skutečnost, že průtokem el. proudu se termistor také zahřívá. Tento jev se uplatní hlavně při větších hodnotách proudů.



Obr. 1.3: Měření odporu termistoru pomocí voltmetru a ampérmetru

Úkol

1. Změřte závislost odporu na teplotě pro PTC a NTC přímou metodou (ohmmetrem). Použijte kádinku se studenou vodou (voda s ledem) do které postupně přilévejte horkou vodu. Termistor uchyťte pomocí krokosvorek a ponořte do vody. Měřte přibližně po 5–10 °C a vždy počkejte na ustálení teploty. Teplotu změřte buď pomocí lihového teploměru, nebo elektronicky multimetrem[4], jehož součástí je sonda s termistorem. Hodnoty zapište do tabulek a zaneste do grafů, kterými proložte vhodné křivky.

2. Zapojte termistor (vyberte si PTC, nebo NTC) dle schématu na Obr. 1.3 a sledujte, jak se bude měnit jeho odpor při zvětšování protékajícího proudu. Zdůvodněte.

[4] Správné zapojení je uvedeno v kapitole Přílohy – Měření teploty pomocí multimetru.

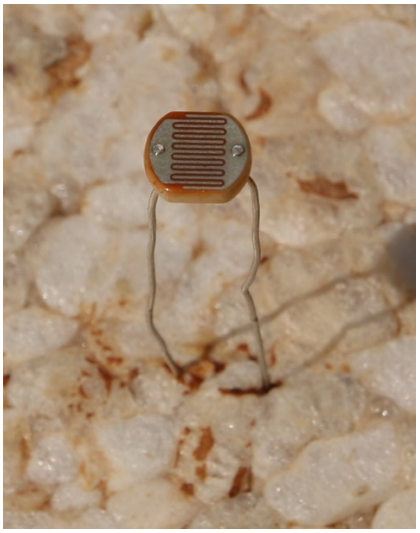
3. Změřte závislost odporu na teplotě pro PTC a NTC nepřímou metodou (měření proudu a napětí – zvolte malé hodnoty el. proudu, aby nedocházelo k přílišnému zahřívání termistoru průchodem proudu). Změřte přibližně 10 hodnot. Použijte kádinku se studenou vodou (voda s ledem) do které postupně přilévejte horkou vodu. Termistor uchyťte pomocí krokosvorek a ponořte do vody. Měřte přibližně po 5–10 °C a vždy počkejte na ustálení teploty. Teplotu měřte buď pomocí lihového teploměru, nebo elektronicky multimetrem[3], jehož součástí je sonda s termistorem. Hodnoty zapište do tabulek a dopočtěte elektrický odpor. Sestrojte grafy závislosti odporů na teplotě, kterými proložte vhodnou křivku. Dále sestrojte V-A charakteristiky termistorů. **Vždy se musíme ujistit, že v zapojeném obvodu nejsou překročeny mezní parametry součástek!**

4. Součástí mutlimetrů jsou i teplotní čidla vyrobená z termistorů. Navrhněte a realizujte pokus, při kterém zjistíte, jestli se jedná o PTC nebo NTC termistor.

5. Porovnejte přesnost vaší termistorové sondy pro měření teploty se sondou, která je součástí multimetru.

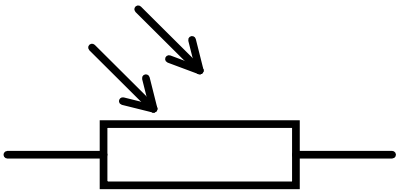
2. Fotorezistor

Fotorezistor – na Obr. 2.1, funguje na tzv. fotovodivostním principu – dopadem světla na polovodič dochází k procesu generace volných párů elektron-díra. Větší počet volných nábojů má za následek zvýšení vodivosti a tedy pokles elektrického odporu fotorezistoru. V-A charakteristika by měla vykazovat přibližně logaritmickou závislost na osvětlení.



Obr. 2.1: Fotorezistor

Součástky, které při osvětlení mění své parametry (fotorezistory, fotodiody, fototranzistory…) mají ve schematické značce zakresleny dvě šipky směřující k součástce – Obr. 2.2.



Obr. 2.2: Schematická značka fotorezistoru

Funkci fotorezistoru můžeme jednoduše ověřit pomocí ohmmetru. Připojíme multimetr pomocí krokosvorek k fotorezistoru a měníme velikost osvětlení. Zapojení je stejné jako na Obr. 1.2, jen místo termistoru použijeme fotorezistor.

Úkol

1. Změřte odpor fotorezistoru přímou metodou při třech různých hodnotách osvětlení (pokuste se změřit maximální a minimální hodnotu odporu).

2. Určete odpor fotorezistoru nepřímou metodou (pomocí měření napětí a proudu tekoucího touto součástkou – přibližně 10 hodnot) při třech různých hodnotách osvětlení (pokuste se změřit maximální a minimální hodnotu odporu). **Vždy se musíme ujistit, že v zapojeném obvodu nejsou překročeny mezní parametry součástek!**

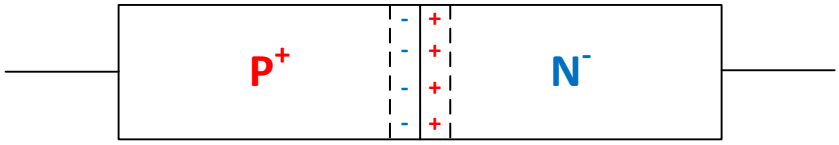
3. Sestrojte V-A charakteristiky fotorezistoru z úkolu 2. Grafem proložte vhodnou křivku.

III. Polovodičové prvky s přechodem

K dosažení vhodných účinků pro průtok elektrického proudu (např. v jednom směru proud protéká a v opačném ne) v pevných látkách se využívá energetická bariéra na styku dvou oblastí s různými vlastnostmi. Nejvíce používanou bariérou je v současnosti P-N přechod a přechod kov-polovodič. Nejznámější součástkou, kterou lze takto zkonstruovat je v případě využití pouze jednoho přechodu – polovodičová dioda, v případě dvou přechodů – tranzistor.[5]

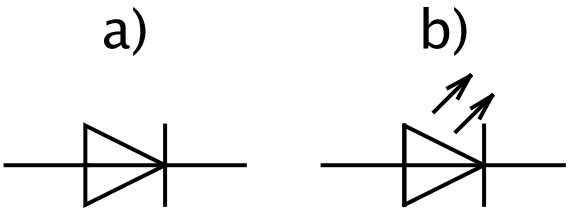
3. Dioda

Dioda je polovodičová součástka, která je tvořena dvěma oblastmi s různým typem vodivosti (P a N). Mezi těmito oblastmi je výše zmíněná energetická bariéra tzv. PN přechod (někdy též nazýván jako hradlová vrstva, či OPN – oblast prostorového náboje…). Situace je ilustrována na Obr. 3.1. Díky tomuto uspořádání propouští dioda elektrický proud pouze v jednom směru (v propustném zapojení) a v opačném směru (závěrné zapojení) dioda elektrický proud nepropouští[6] – viz Obr. 3.3. Aby diodou v propustném směru mohl protékat elektrický proud, musí být nejprve překonána energetická bariéra PN přechodu přiložením tzv. prahového napětí U_p.



Obr. 3.1: Princip polovodičové diody

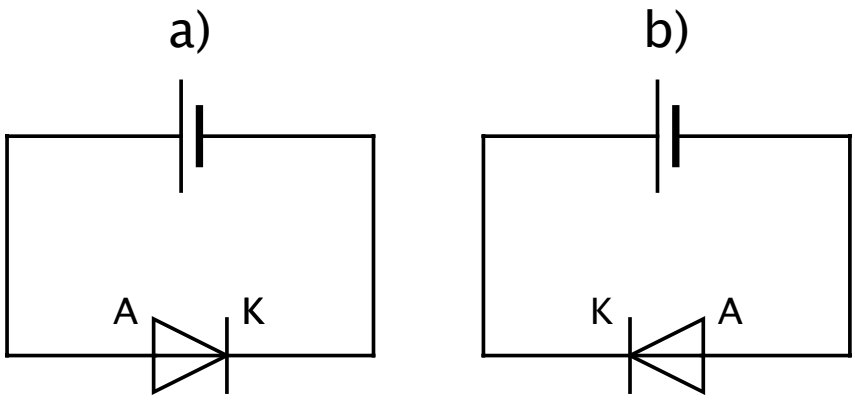
Na Obr. 3.2 je uvedena schematická značka běžné usměrňovací diody[7] a dalšího hojně užívaného typu diody LED[8]. LED funguje prakticky stejně jako usměrňovací dioda jen navíc je schopna vydávat světlo určité barvy. Různé typy (barvy) LED mají různé hodnoty prahových napětí.



Obr. 3.2: Schematická značka a) běžné usměrňovací diody b) LED

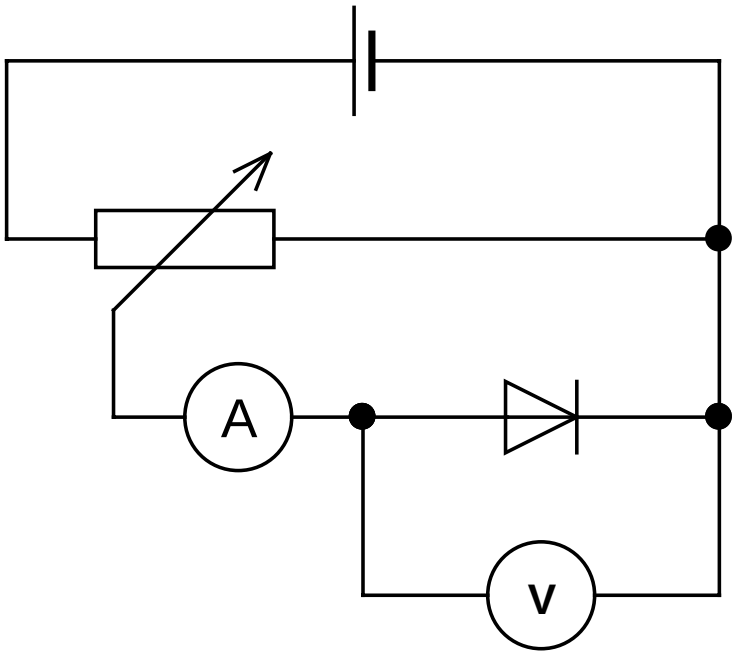
[5] Existují i další typy součástek s více přechody jako tyristory, triaky atd.
[6] Tento fakt není zcela přesný, malý proud (proud minoritních nosičů) prochází diodou i v závěrném směru. Existují také diody, které jsou přímo uzpůsobené na zapojení v závěrném směru (např. fotodioda, Zenerova dioda…) – více v kapitole 6.
[7] Nejběžnější typy jsou vyrobeny z křemíku nebo germania.
[8] Zkratka znamená Light Emitting Diode.

Na Obr. 3.3 je znázorněno, jak je nutné diodu zapojit, aby jí protékal/neprotékal elektrický proud. A značí anodu diody (kladnou polaritu), K katodu (zápornou polaritu).



Obr. 3.3: Zapojení diody a) v propustném b) v závěrném směru

U elektronických součástek nás zajímá především jejich V-A charakteristika (jaký proud jimi bude protékat při daném napětí). Pro měření V-A charakteristiky diody využijeme známé schéma s děličem napětí – Obr. 3.4. Je dobré si uvědomit, že polovodičové součástky nejsou lineární prvky, proto při měření V-A charakteristik nemůžeme očekávat (nebudeme prokládat) ve výsledném grafu přímku. Závislosti proudu na napětí u polovodičů vycházejí exponenciální.[9] Z teorie je známo, že dioda nevede el. proud hned od počátku charakteristiky (malé napětí nestačí k překonání hradlové vrstvy), ale až od hodnoty U_p, kterou označujeme jako prahové napětí.



Obr. 3.4: Zapojení pro měření V-A char. diody

[9] Pro polovodičové prvky tedy neplatí Ohmův zákon.

Úkol

1. Navrhněte a realizujte pokus, kterým zjistíte, která nožička diody je anoda a která katoda. Jak se od sebe vizuálně nožičky liší? **Vždy se musíme ujistit, že v zapojeném obvodu nejsou překročeny mezní parametry součástek!**

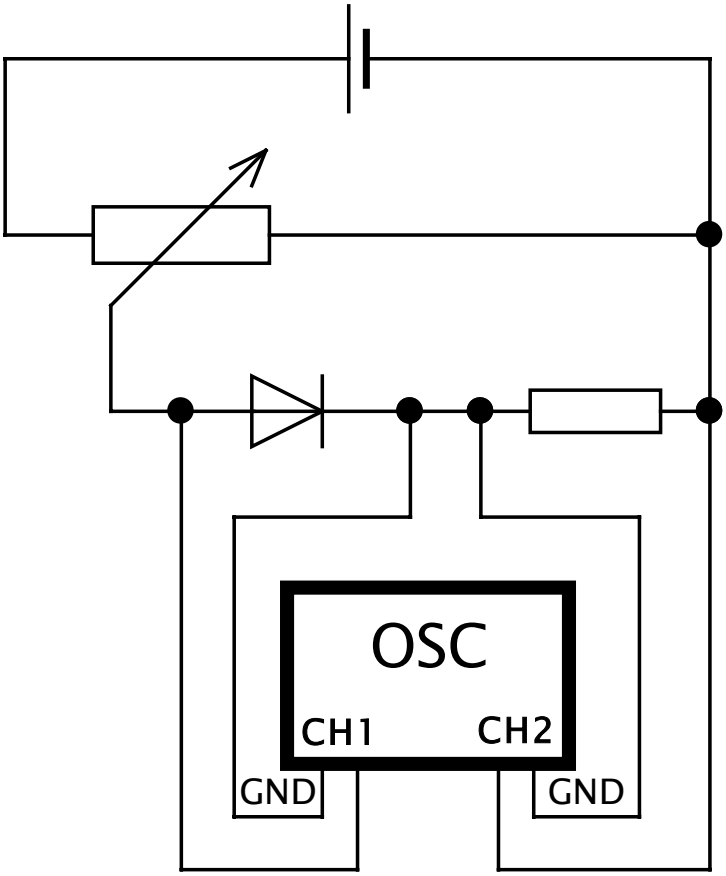
2. Změřte V-A charakteristiky tří typů LED diod, vyznačte v grafu prahové napětí (změřte co nejpřesněji). Proměřte charakteristiku i v závěrném směru. **Vždy se musíme ujistit, že v zapojeném obvodu nejsou překročeny mezní parametry součástek!**

3. Změřte V-A charakteristiky germaniové a křemíkové diody, vyznačte v grafu prahové napětí (změřte co nejpřesněji). **Vždy se musíme ujistit, že v zapojeném obvodu nejsou překročeny mezní parametry součástek!**

4. Měření V-A charakteristiky diody pomocí osciloskopu

V-A charakteristiku diody je možné zobrazit přímo na obrazovce osciloskopu. Charakteristiku buď můžeme zobrazovat po jednotlivých bodech (krocích) tím, že měřený obvod připojíme ke stejnosměrnému zdroji napětí; nebo můžeme charakteristiku vykreslit celou tak, že měřený obvod připojíme ke střídavému zdroji napětí.

Nejprve uvedeme variantu se stejnosměrným zdrojem. Schéma zapojení je uvedeno na Obr. 4.1. Velikost zdroje volíme přibližně 5 V a rezistor ve schématu 10 Ω. Sondu CH1 připojíme na anodu diody, její zem (GND) na katodu diody. Sondu CH2 připojíme mezi rezistor a zápornou svorku zdroje, její zem (GND) da druhou stranu rezistoru (ke katodě diody).

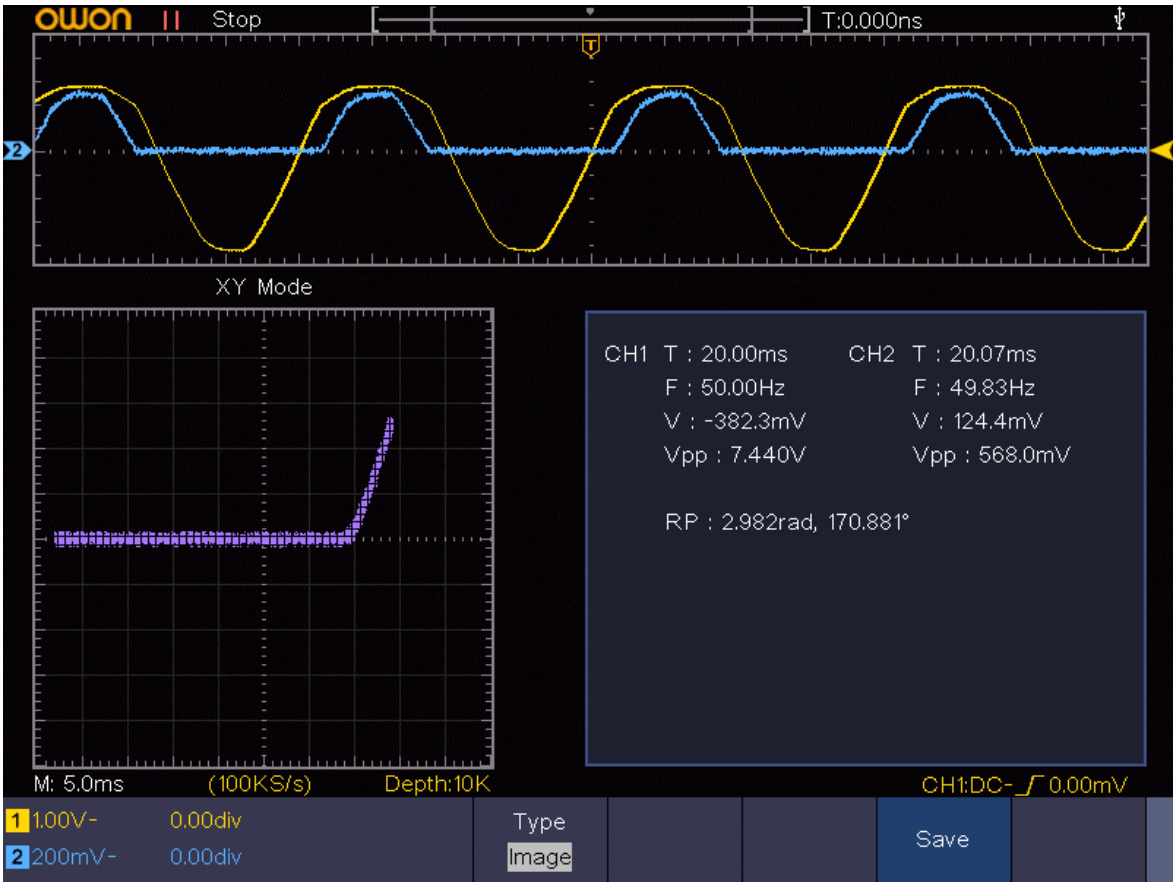


Obr. 4.1: V-A char. diody se stejnosměrným zdrojem

Celé měření funguje tak, že pomocí sondy CH1 měříme napětí na samotné diodě a pomocí sondy CH2 napětí na rezistoru, které je dle Ohmova zákona přímo úměrné proudu, který protéká rezistorem a tedy i diodou. CH2 nám tedy udává proud který (chceme-li přesnou hodnotu proudu, je nutné údaj, který nám ukazuje osciloskop – napětí, vydělit velikostí odporu; při velikosti odporu 10 Ω je přepočet snadný). CH2 si v osciloskopu nastavíme jako Y závislou veličinu na CH1 – X ose.

Pro správné zobrazení požadované charakteristiky je nutné také nastavit osciloskop. Nejprve nastavíme pro oba kanály měření stejnosměrného napětí.[10] Stiskneme tlačítko Display a nastavíme XY Mode jako ON. Aby zobrazené body odpovídali charakteristice diody otočíme Y osu – tlačítko CH1, Inverted nastavíme na ON.[11] Následně posunem reostatu můžeme sledovat, jak se postupně zobrazují jednotlivé body V-A charakteristiky diody.

Druhá možnost – měření v zapojení se zdrojem střídavého napětí je prakticky totožná. V obvodu pouze vyměníme napěťový zdroj za střídavý. Zbytek zapojení zůstává naprosto stejný. Nastavení osciloskopu se též nemění (včetně nastavení na měření DC!). Výsledný obrazec by měl vypadat tak jako na Obr. 4.2.



Obr. 4.2: Graf V-A char. diody z osciloskopu

Průběhy lze uložit přímo z osciloskopu na paměť typu Flash. Flash disk zasuneme do osciloskopu, zmáčkneme tlačítko Copy, Type nastavíme jako Image a zvolíme Save. Pomocí otočného voliče Multipurpose můžeme přepsat jméno souboru, pro potvrzení uložení na disk najedeme voličem na klávesu Enter a stiskneme volič.

[10] Popis nastavení je uveden v kapitole Přílohy –Osciloskop.
[11] Otočení provádíme z toho důvodu, že sonda CH2 je připojena k zápornému potenciálu vůči své zemi (GND).

Úkol

1. Změřte V-A charakteristiku LED diody pomocí osciloskopu. Měřte se stejnosměrným zdrojem a naměřené hodnoty srovnejte s předchozí úlohou (měření pomocí multimetrů). **Vždy se musíme ujistit, že v zapojeném obvodu nejsou překročeny mezní parametry součástek!**

2. Změřte V-A charakteristiku LED diody pomocí osciloskopu. Měřte se střídavým zdrojem. Naměřenou charakteristiku si uložte jako obrázek. **Vždy se musíme ujistit, že v zapojeném obvodu nejsou překročeny mezní parametry součástek!**

IV. Další typy diod

V této kapitole se podíváme na některé specifické typy diod. Specifické jsou diody z hlediska konstrukce i z hlediska praktického využití a zapojení v obvodu. Některé další typy diod:

- infračervená
- ultrafialová
- laserová
- Zenerova
- Schotkyho
- fotodioda
- PIN

První dva typy diod – infračervená a ultrafialová se od běžných LED liší pouze tím, že jsou schopny vyzařovat světlo v částech spektra, které lidské oko nevidí. Laserová dioda je zase specifická tím, že produkuje koherentní[12] záření. Jinak je funkce těchto diod prakticky shodná s běžnými LED.

Zajímavější typy diod jsou poslední čtyři zmíněné. Zenerova (stabilizační) dioda je prvek, který se využívá v závěrném směru a využívá se ke stabilizaci napětí. Schotkyho dioda je tvořena přechodem kov-polovodič. Protože v kovu se nosiče náboje pohybují mnohem rychleji, oblast přechodu se rychleji vyprázdní od nosičů. Schottkyho dioda vyniká velkou rychlostí přepínání přechodu, má také nižší prahového napětí (0,1–0,3 V). Fotodioda je speciálně upravená dioda s otevřeným pouzdrem a čočkou, která soustřeďuje dopadající světlo na přechod PN a tím v něm ovlivňuje proces generace. Protože obyčejná fotodioda při vyšších frekvencích vykazuje dlouhou dobu odezvy (trvá určitou dobu, než se nosiče při dopadu světla uvolní a také než po zhasnutí světla odtečou z OPN), pro použití především na účely datových přenosů přes optická vlákna je určena PIN fotodioda. PIN dioda má mezi přechod PN vloženou tenkou vrstvu téměř čistého polovodiče označovanou I[13]. Tato vrstva umožňuje provozovat diodu při větším napětí, které více urychluje světlem uvolněné nosiče a zkracuje tak dobu odezvy fotodiody.

[12] Koherentní vlny mají stejnou frekvenci, polarizaci a konstantní na čase nezávislý dráhový rozdíl.
[13] I znamená intrinsický (vlastní) polovodič.

5. IR, UV a LASER diody

Jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole, tyto typy diod se příliš neliší od klasických LED, proto i schémata zapojení budou totožná a pro ověření funkce dané diody můžeme použít např. obvodové zapojení na Obr. 3.4.

Úkol

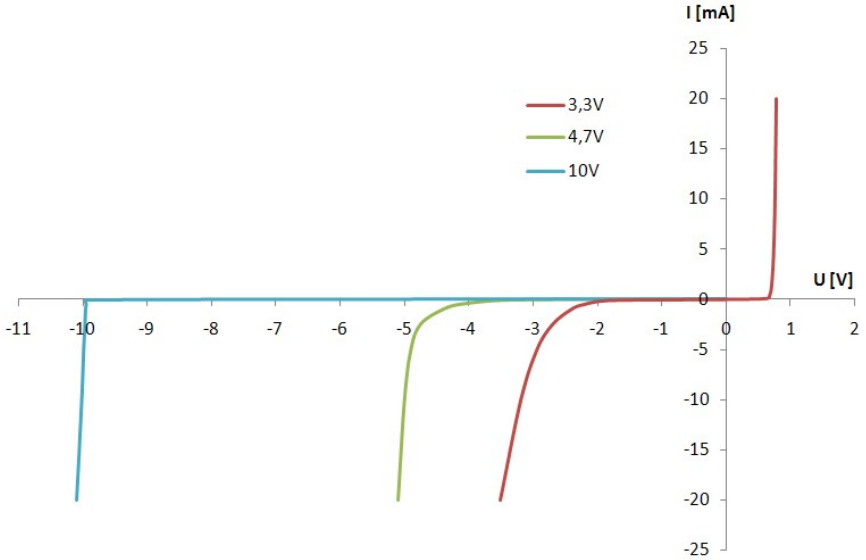
1. Ověřte funkci IR a UV diody pomocí optického spektrometru. **Vždy se musíme ujistit, že v zapojeném obvodu nejsou překročeny mezní parametry součástek**.

2. Navrhněte experiment a ověřte, zda LASER dioda vysílá opravdu koherentní paprsek záření (např. interferenční obrazec). Porovnejte s klasickou LED. **Vždy se musíme ujistit, že v zapojeném obvodu nejsou překročeny mezní parametry součástek**.

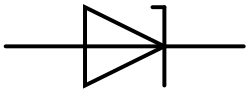
3. Změřte V-A charakteristiky IR, UV a LASER diody, vyznačte v grafu prahové napětí (změřte co nejpřesněji). **Vždy se musíme ujistit, že v zapojeném obvodu nejsou překročeny mezní parametry součástek**.

6. Zenerova dioda

Zenerovy diody jsou navrhovány a konstruovány tak, aby závěrná část V-A charakteristiky měla rychlý nárůst proudu při dosažení průrazného napětí U_{BR} (U_Z). Pracovní oblast těchto diod leží v oblasti elektrického nedestruktivního průrazu, kdy se při velkých změnách proudu mění hodnota Zenerova napětí (U_Z) jen velmi málo. Pracovní oblastí Zenerových diod rozumíme V-A charakteristiku v závěrném směru. Z průběhu VA charakteristiky Zenerovy diody – Obr. 6.1, je zřejmé, že odpor součástky v její pracovní oblasti je velmi malý. Schematická značka diody je na Obr. 6.2. Charakteristika v propustném směru je shodná s charakteristikou běžné polovodičové diody. Prahové napětí se pohybuje okolo 0,7 V. Stejně jako u všech ostatním součástek je při zapojení nutné respektovat mezní parametry diody, především maximální výkon, na který je dioda dimenzována (tedy max. proud, který jí může procházet).



Obr. 6.1: V-A char. Zenerovy diody s různými hodnotami UBR

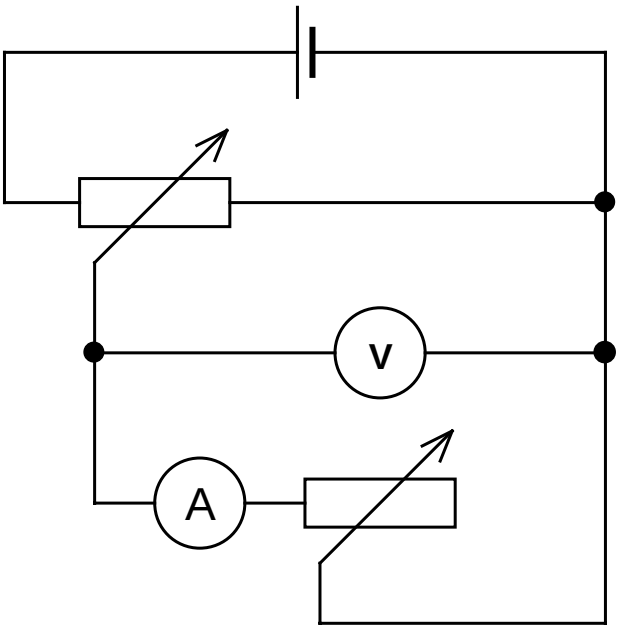


Obr. 6.2: Schematická značka Zenerovy diody

Hlavní funkcí Zenerovy diody je stabilizace napětí. Abychom tuto funkci ověřili, zapojíme nejprve nestabilizovaný obvod s proměnnou zátěží – Obr. 6.3. Jako zdroj použijeme plochou, nebo devítivoltovou baterii (dle napětí dané baterie vybereme vhodnou Zenerovu diodu – U_z menší než napětí zdroje), jako dělič napětí připojíme reostat a proměnnou zátěž bude reprezentovat potenciometr. Změříme, jak hodně se změní napětí na zátěži ΔU při změně proudu tekoucího zátěží ΔI.[14] Změnu proudu

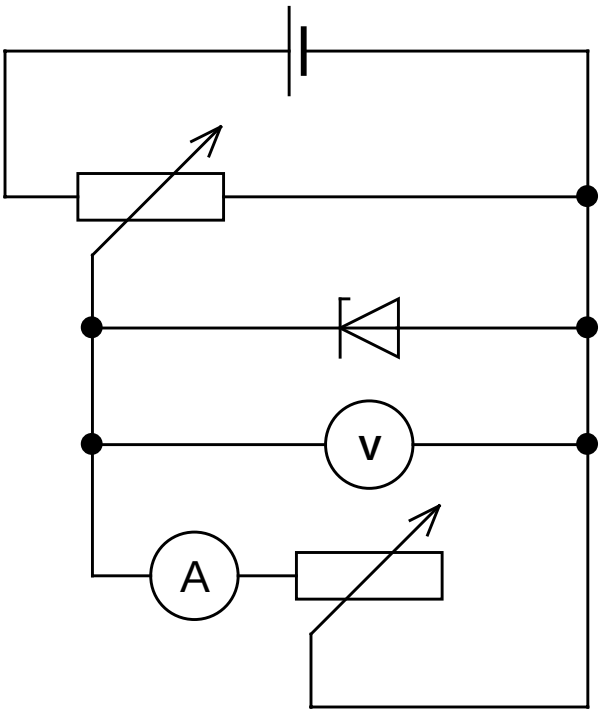
[14] Z teorie víme, že jednou z hlavních příčin nestálosti napájecího napětí v obvodu je vnitřní odpor napěťového zdroje Ri.

provádíme potenciometrem a hodnoty napětí vybíráme v rozsahu větším, nežli je U_z vybrané Zenerovy diody (nastavíme pomocí reostatu).



Obr. 6.3: Nestabilizovaný obvod s proměnnou zátěží

V dalším kroku zapojíme stejný obvod tentokrát doplněný o stabilizační člen – Zenerovu diodu – Obr. 6.4. Pomocí reostatu nastavíme pracovní bod diody (napětí na diodě větší nežli U_z) a opět zjistíme, jak se změní napětí na zátěži ΔU při změně proudu tekoucího zátěží ΔI. Tentokrát by změna měla být menší. Jak dobře bude stabilizace fungovat, ovlivňuje výběr Zenerovy diody, resp. strmost závěrné charakteristiky.



Obr. 6.4: Stabilizovaný obvod s proměnnou zátěží pomocí Zenerovy diody

Úkol

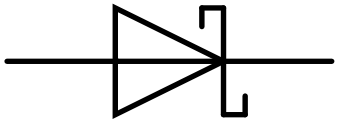
1. Proměřte V-A charakteristiku Zenerovy diody v závěrném směru.
2. Zapojte a proměřte nestabilizovaný a stabilizovaný obvod s proměnnou zátěží, viz výše.
3. Změřte zatěžovací charakteristiku nestabilizovaného a stabilizovaného obvodu. Vyneste do grafu a porovnejte. Obě dvě charakteristiky měřte pro napětí větší nežli U_z.

7. Schotkyho dioda

Schottkyho dioda je součástka, která využívá usměrňovací vlastnost přechodu kov-polovodič. Skládá se z kovového materiálu (zlato, hliník…), ke kterému je připojen polovodič typu N – viz Obr. 7.1. Elektrony v polovodiči mají větší energii nežli v kovu, tudíž na rozhraní přecházejí do kovu a v polovodiči za nimi zůstávají nepohyblivé díry, které vytváří OPN. Na okrajích hradlové vrstvy se neakumulují minoritní nosiče, proto je doba mezi vznikem a zánikem hradlové vrstvy značně menší. To předurčuje Schottkyho diody pro zpracování signálů s vysokými kmitočty. Tento typ diody má v propustném směru menší prahové napětí než běžný přechod PN.

Obr. 7.1: Struktura Schottkyho diody

Schottkyho diody se využívají v aplikacích pro velmi vysoké frekvence. Vzhledem k rychlým spínacím časům a malému napětí v propustném směru jsou Schottkyho diody užívány ve spínačích s dobou sepnutí jednotky ns i menší, jako ochranné prvky a jako součástky rychlých logických integrovaných obvodů. Malé napětí v přímém směru umožňuje využívat Schottkyho diod ve výkonové technice jako usměrňovače a spínače s větší energetickou účinností, menšími rozměry a hmotností než klasické diody. Jedním z nedostatků je menší závěrné napětí (průrazné napětí 10 až 150 V). Schematická značka Schottkyho diody je uvedena na Obr. 7.2.

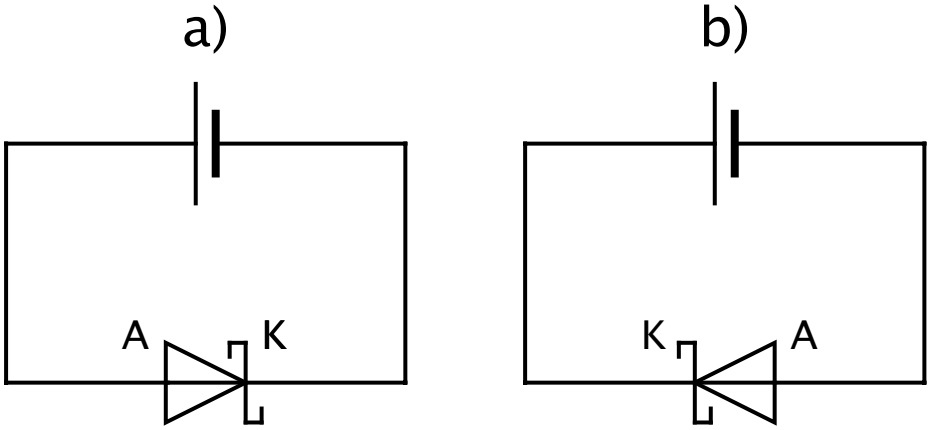


Obr. 7.2: Schematická značka Schottkyho diody

Stejně jako všechny ostatní diody je možné Schottkyho diodu provozovat v propustném a v závěrném zapojení – Obr. 7.3. Anodou u tohoto typu diody je kov a katodou polovodič. V propustném směru přechází volné elektrony z polovodiče do kovu (elektrony v polovodiči mají větší energii nežli v kovu) a diodou tak může téci poměrně velký proud. Na rozdíl od přechodu PN se prakticky neuplatňují minoritní nosiče. V závěrném směru připojíme kov k záporné elektrodě a tím posílíme energetickou bariéru (elektrony v polovodiči mají větší energii nežli v kovu). Diodou prochází velmi malý proud vzhledem k propustnému směru. V porovnání s přechodem PN je ale tento závěrný proud mnohonásobně větší.[15] Je to dáno tím, že přes bariéru

[15] Stále se pohybujeme v řádu nA.

v případě PN přechodu proudí minoritní nosiče, ale v případě přechodu kov-polovodič jsou to majoritní nosiče.



Obr. 7.3: Zapojení Schottkyho diody a) propustné b) závěrné

Úkol

1. Změřte V-A charakteristiky Schottkyho diody, vyznačte v grafu prahové napětí (změřte co nejpřesněji). Proměřte charakteristiku i v závěrném směru. **Vždy se musíme ujistit, že v zapojeném obvodu nejsou překročeny mezní parametry součástek!**

2. Změřte V-A charakteristiku Schotkyho diody pomocí osciloskopu. Měřte se střídavým zdrojem. Naměřenou charakteristiku si uložte jako obrázek. **Vždy se musíme ujistit, že v zapojeném obvodu nejsou překročeny mezní parametry součástek!**

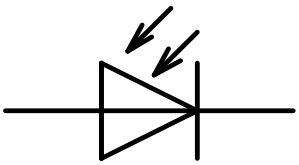
3. Porovnejte naměřenou charakteristiku s charakteristikami dalších typů diod.

8. Fotodioda

Vyrobíme-li součástku s PN přechodem tak, že na něj může dopadat světlo, lze takovouto diodu využít jako fotocitlivý prvek – fotodiodu. Při ozáření vlastního polovodiče zvýšíme jeho vodivost tím, že urychlíme proces generace. Tomuto jevu se říká vnitřní fotoefekt. Důležité je uvědomit si, že ozářením se zvyšuje vlastní vodivost polovodiče, tedy koncentrace nosičů obou polarit, po přidání příměsi se bude ozářením zvyšovat koncentrace minoritních nosičů.

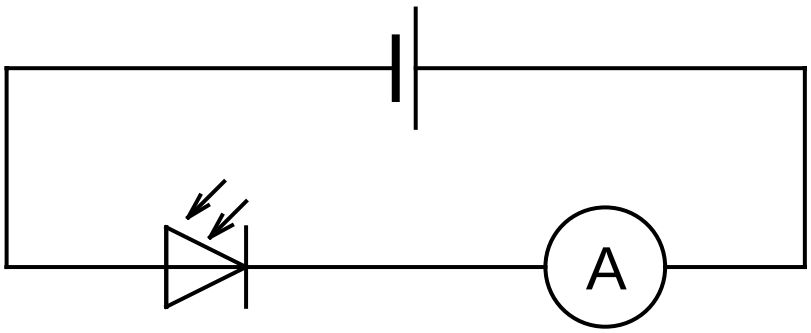
Fotodiodu, jejíž schematická značka je uvedena na Obr. 8.1, běžně zapojujeme do obvodu dvěma způsoby:

- Diodu zapojíme ke zdroji napětí v závěrném směru.
- Diodu zapojíme bez zdroje – dioda sama se stává zdrojem el. proudu.



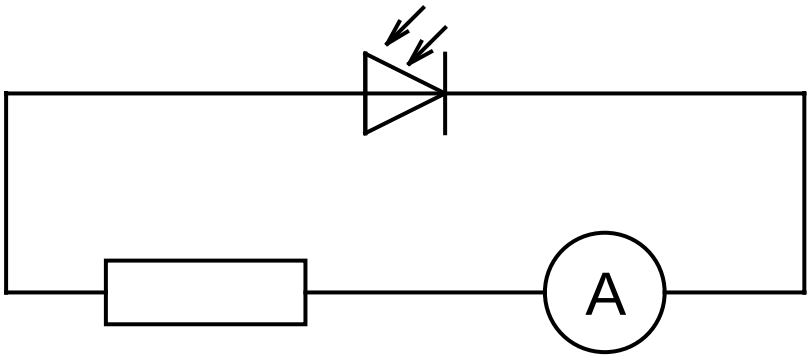
Obr. 8.1: Schematická značka fotodiody

První způsob zapojení je znázorněn na Obr. 8.2. U diody zapojené k vnějšímu zdroji v závěrném směru energie dopadajících fotonů uvolňuje z vyprázdněné oblasti elektrony a díry a ty mohou vést proud. Čím větší je intenzita dopadajícího světla, tím vyšší bude hodnota závěrného proudu. Tento režim práce fotodiody se využívá například pro měření intenzity světla, nebo vyhodnocení přerušení světelného paprsku, tedy jako fotobuňka.



Obr. 8.2: Fotodioda se zdrojem napětí

Druhý způsob zapojení je uveden na Obr. 8.3. Pokud dioda není připojena k vnějšímu zdroji, dopadající světlo uvolňuje elektrony a díry a ty poté mohou téct vnějším obvodem. Fotodioda tak vyrábí elektrickou energii o napětí několik desetin voltu přímo z energie světla. Tento režim práce fotodiody se využívá pro napájení nízkoodběrových přístrojů (kalkulačky, meteorologické stanice) nebo k výrobě elektřiny ve fotovoltaických elektrárnách.



Obr. 8.3: Fotodioda jako zdroj proudu

Úkol

1. Zapojte fotodiodu dle schématu na Obr. 8.2 a ověřte její funkci při různých hodnotách osvětlení. V jakých řádech se pohybuje proud tekoucí diodou? **Vždy se musíme ujistit, že v zapojeném obvodu nejsou překročeny mezní parametry součástek!**

2. Zapojte fotodiodu dle schématu na Obr. 8.3 a ověřte její funkci při různých hodnotách osvětlení. V jakých řádech se pohybuje proud tekoucí diodou? Jak velké napětí je na diodě?

3. Změřte V-A charakteristiky fotodiody, pro tři různé hodnoty osvětlení. Proměřte charakteristiku v propustném i v závěrném směru. **Vždy se musíme ujistit, že v zapojeném obvodu nejsou překročeny mezní parametry součástek!**

9. PIN dioda

Protože obyčejná fotodioda při vyšších frekvencích vykazuje dlouhou dobu odezvy (nějaký čas trvá, než se nosiče při dopadu světla uvolní a také než po zhasnutí světla odtečou z vyprázdněné oblasti), pro použití především na účely datových přenosů přes optická vlákna je určena PIN fotodioda, která má mezi přechod PN vloženou tenkou vrstvu téměř čistého polovodiče – I. Tato vrstva umožňuje provozovat diodu při větším napětí, které více urychluje světlem uvolněné nosiče a zkracuje tak dobu odezvy fotodiody.

Vrstva I se neuplatňuje při průchodu stejnosměrného proudu nebo nízkofrekvenčního proudu a dioda se chová jako obyčejná křemíková dioda (rovněž VA charakteristika je shodná). Při vysokých frekvencích (doba průletu nosičů náboje přes vrstvu I je srovnatelná s periodou procházejícího signálu) ztrácí dioda PIN svoje původní vlastnosti a stává se lineárním odporem. Velikost odporu se mění velikostí stejnosměrného proudu, kterým diodu v přímém směru polarizujeme. Dioda se používá při frekvencích řádově MHz až GHz. Dioda má velkou hodnotu průrazného napětí U_{BR} – až jednoty kV.

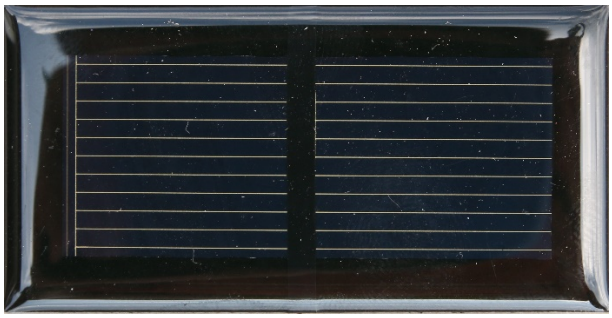
Úkol

1. Změřte V-A charakteristiky PIN diody. **Vždy se musíme ujistit, že v zapojeném obvodu nejsou překročeny mezní parametry součástek!**
2. Připojte klasickou usměrňovací diodu a PIN diodu ke generátoru signálu. Využijte známého zapojení s napěťovým děličem. Pomocí osciloskopu porovnejte průběhy napětí na diodách při zvyšování frekvence.

V. Využití polovodičových součástek v praxi

10. Solární panel

Jak již bylo uvedeno v kapitole 8, jako převodník solární energie na elektrickou můžeme použít například fotodiodu. U jedné polovodičové součástky by tento převod nebyl příliš efektivní, proto použijeme velkého množství těchto součástek. Nejjednodušší způsob jak získat velké množství fotocitlivých součástek na relativně malé ploše je zakoupit fotovoltaický panel – Obr. 10.1.



Obr. 10.1: Fotovoltaický panel

Panel uvedený na Obr. 10.1 má na zadní straně dva konektory (kladný a záporný pól). Pomocí těchto konektorů panel připojíme ke zdroji a měřicím přístrojům. Maximální hodnota napětí, které je panel schopen generovat při dobrém osvětlení je 0,58 V a proud 330 mA. Tyto hodnoty jsou samozřejmě závislé na míře osvětlení a typu zdroje světla.

Fotovoltaický panel využijeme jako zdroj elektrické energie pro požadované typy obvodů. Jeden samotný panel je poměrně slabým zdrojem, proto bude nutné využít vícečetnou kombinaci těchto panelů.

Úkol

1. Změřte velikost napětí a proudu produkovaného jedním solárním panelem při alespoň třech hodnotách osvětlení a pro různé typy zdrojů (slunce, žárovka, halogenová žárovka…). Pro přesnější měření použijte luxmetr.

2. Změřte velikost napětí a proudu produkovaného dvojicí solárních panelů při sériovém zapojení. Vyvoďte závěr.

3. Změřte velikost napětí a proudu produkovaného dvojicí solárních panelů při paralelním zapojení (pozor je nutné spojovat stejné panely). Vyvoďte závěr.

4. K sériové kombinaci dvou solárních panelů připojte motorek a ověřte, jak se bude měnit rychlost otáčení motorku v závislosti na osvětlení. Vypočtěte elektrický příkon motorku při různých hodnotách osvětlení (změřte proud a napětí). Využijte optické filtry pro sledování propustnosti světla na solární panely – vyvoďte závěr.[16]

5. Navrhněte a realizujte obvod se solárními panely, pomocí kterého budete schopni rozsvítit polovodičovou diodu. Pozor – při paralelním zapojení solárních panelů je nutné, aby jednotlivé větve obsahovali stejný počet panelů.

[16] Motorek i filtry jsou součástí stavebnice Solar assistent (viz Přílohy – Stavebnice Solar assistent)

11. Diodový omezovač

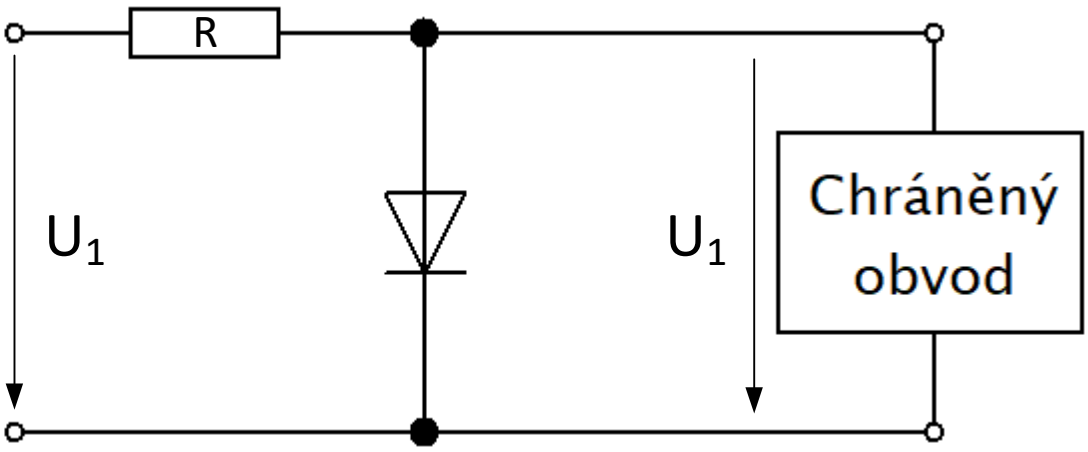
Elektronické obvody mají často na vstupu omezení velikosti napětí. Přivedeme-li na tento obvod napětí větší, může dojít k poškození obvodu. Z tohoto důvodu se před citlivé vstupy (Chráněného obvodu) zařazují omezovače napětí – Obr. 11.1.

Z V-A charakteristiky diody vidíme, že napětí na diodě v propustném směru příliš nepřesáhne prahové napětí U_p. Diodu tedy lze využít ke konstrukci diodového omezovače tak, že paralelně ke chráněnému vstupu připojíme diodu v propustném zapojení, jak je uvedeno na Obr. 11.1. V případě, že je vstupního napětí U_1 menší než U_p, se napětí beze změny přenese na vstup chráněného obvodu. V případě, že je U_1 větší než U_p začne diodou protékat elektrický proud a bude platit:

$$U_1 = R \cdot I + U_p$$

Rce. 11.1: Diodový omezovač

Zjednodušeně řečeno, přebytečné napětí se uplatní na ochranném rezistoru (který omezuje proud diodou) a na vstupu chráněného obvodu bude pouze U_p. Uvedený způsob však chrání vstup jen při jedné polaritě napětí. Chceme-li obvod chránit při obou polaritách (střídavé napětí), musíme zapojit antiparalelně dvě diody.[17]



Obr. 11.1: Diodový omezovač napětí

[17] Druhou diodu připojíme paralelně k první a otočíme její polaritu.

Úkol

1. Sestavte omezovač dle Obr. 11.1. Nezapomeňte vybrat vhodný rezistor *R* tak, aby proud tekoucí danou diodou nemohl nepřesáhnout její parametry, případně zapojte proměnný odpor (k diodě zapojte sériově ampérmetr a tento parametr hlídejte). Vstup U_1 realizujte pomocí děliče napětí. Chráněný obvod realizujte pomocí potenciometru v zapojení jako proměnný odpor. Ověřte funkci omezovače. **Vždy se musíme ujistit, že v zapojeném obvodu nejsou překročeny mezní parametry součástek!**

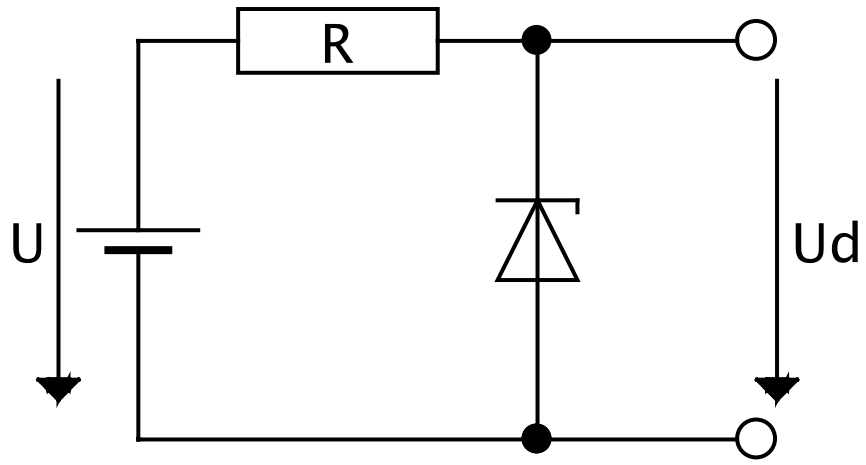
2. Změřte přenosovou charakteristiku omezovače (závislost U_2 na U_1) a vyneste do grafu. U_1 měňte pomocí děliče napětí. **Vždy se musíme ujistit, že v zapojeném obvodu nejsou překročeny mezní parametry součástek!**

3. Jak se budou měřené veličiny v obvodu měnit, pokud změníme velikost odporu chráněného obvodu (potenciometru)? Zkuste nejprve vysvětlit a následně ověřit.

12. Stabilizátor se Zenerovou diodou

Další možnost, jak udržet stabilní hodnotu napětí při změnách velikosti odebíraného proudu je stabilizátor se Zenerovou diodou. Na rozdíl od předchozí úlohy – Diodový omezovač napětí, tentokrát využijeme diodu v závěrném směru. Výhodou Zenerovy diody je prakticky kolmý průběh V-A charakteristiky závěrného směru za U_{BR}. V dalším využijeme teorii z kapitoly 6.

Aby stabilizátor mohl fungovat, musí být na diodě napětí větší nežli U_{BR} (jinými slovy U_{BR} musí být menší nežli napájecí napětí). Uveďme na příkladu: máme Zenerovu diodu s U_Z = 10 V (U_{BR}); stejnosměrný napájecí zdroj s napětím 12 V a ochranný rezistor 120 Ω. Schéma zapojení uvedeno na Obr. 12.1.



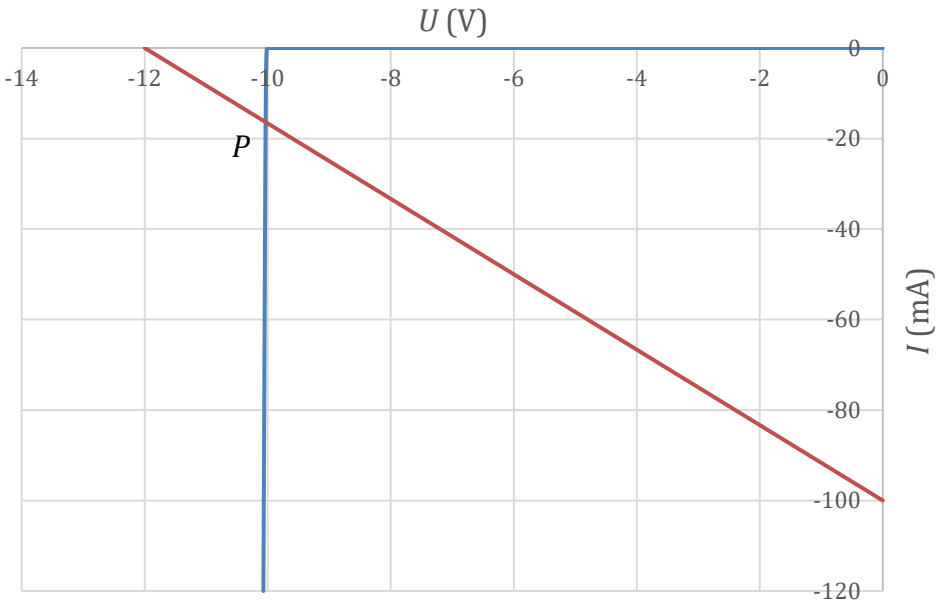
Obr. 12.1: Stabilizátor se Zenerovou diodou

Tentokrát zkusíme hodnoty proudů a napětí vypočíst. K tomu budeme potřebovat V-A charakteristiku dané Zenerovy diody. Pokud si prohlédneme Graf 12.1, vidíme, že modře je znázorněna charakteristika Zenerovy diody. Dále do grafu zakreslíme zatěžovací přímku (zdroj a rezistor). K jejímu určení nám stačí dva body: zapojení zdroje naprázdno[18] (12 V; 0 mA) a nakrátko[19] (0 V; 100 mA). Druhou hodnotu jsme vypočetli ze vztahu:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12}{120} = 100 \text{ mA}$$

Rce. 12.1: Výpočet pracovního bodu stabilizátoru

[18] Tedy bez diody.
[19] Dioda je zkratována.



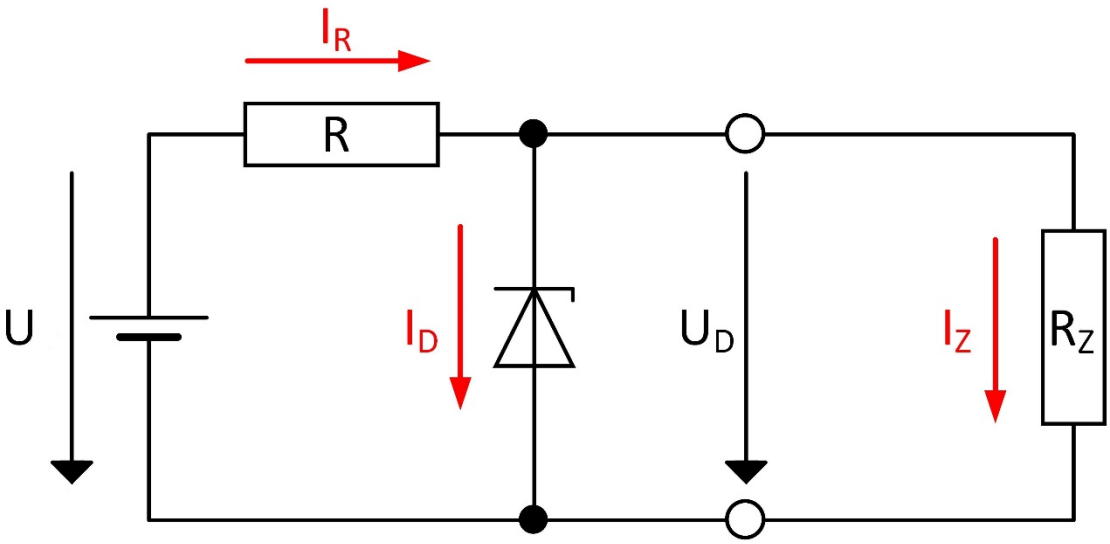
Graf 12.1: Pracovního bod nezatíženého stabilizátoru

V průsečíku zatěžovací přímky a char. diody se nachází bod P – pracovní bod Zenerovy diody. V-A charakteristiky diod jsou nelineární[20], proto se pro řešení obvodů s těmito prvky využívá grafické řešení. Jedná se prakticky o grafické řešení dvou rovnic o dvou neznámých.

Z grafu lze vyčíst, že pracovní bod má souřadnice P (10 V; 17 mA). Na diodě bude tedy úbytek napětí 10 V při protékajícím proudu 17 mA.

Aby měl stabilizátor z praktického hlediska význam, musíme k němu připojit obvod, pro nějž chceme vstupní napětí stabilizovat. V našem případě tím obvodem bude rezistor R_Z – Obr. 12.2.

[20] Není možné počítat pomocí Ohmova zákona – platí jen pro lineární prvky.



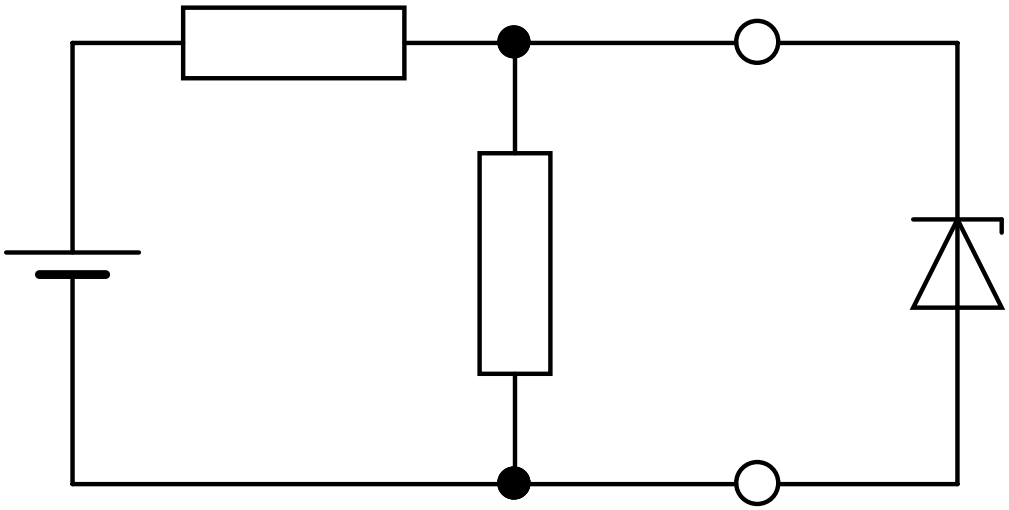
Obr. 12.2: Zatížený stabilizátor

Z porovnání schémat na na Obr. 12.2 a Obr. 12.3 je jasné, že se změní velikosti proudů a napětí v obvodu, dojte tedy k posunu pracovního bodu. Napájecí napětí U zůstává prakticky konstantní.[21] Pro proud bude platit rovnice:

$$I_R = I_D + I_{Rz}$$

Rce. 12.2: Proud tekoucí zatíženým stabilizátorem

Pro lepší přehlednost si schéma z Obr. 12.2 překreslíme na schéma na Obr. 12.3. Obě dvě zapojení jsou ekvivalentní.



Obr. 12.3: Překreslený stabilizátor se zátěží

[21] Platí pro tvrdé zdroje. Velikost výstupního napětí zdroje při změně zátěže je závislá na hodnotě vnitřního odporu.

Z Obr. 12.3 je vidět, že Zenerova dioda bude nyní připojena k jinému napětí, musíme tedy přepočíst zatěžovací charakteristiku. S využitím vztahu pro napěťový dělič, můžeme vypočíst novou hodnotu napětí na prázdno U_S (tedy napětí na R_Z při odpojené diodě):

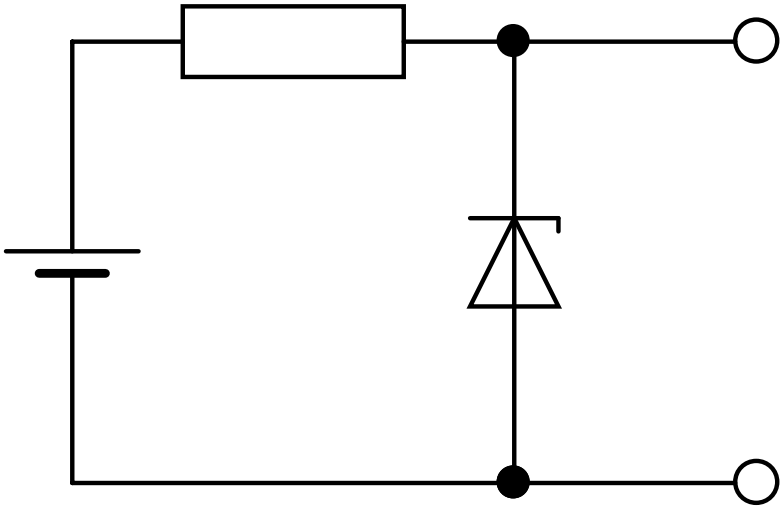
$$U_S = U \cdot \frac{R_Z}{R_Z + R}$$

Rce. 12.3: Výpočet napětí zatíženého stabilizátoru

$$R_S = \frac{R_Z \cdot R}{R_Z + R}$$

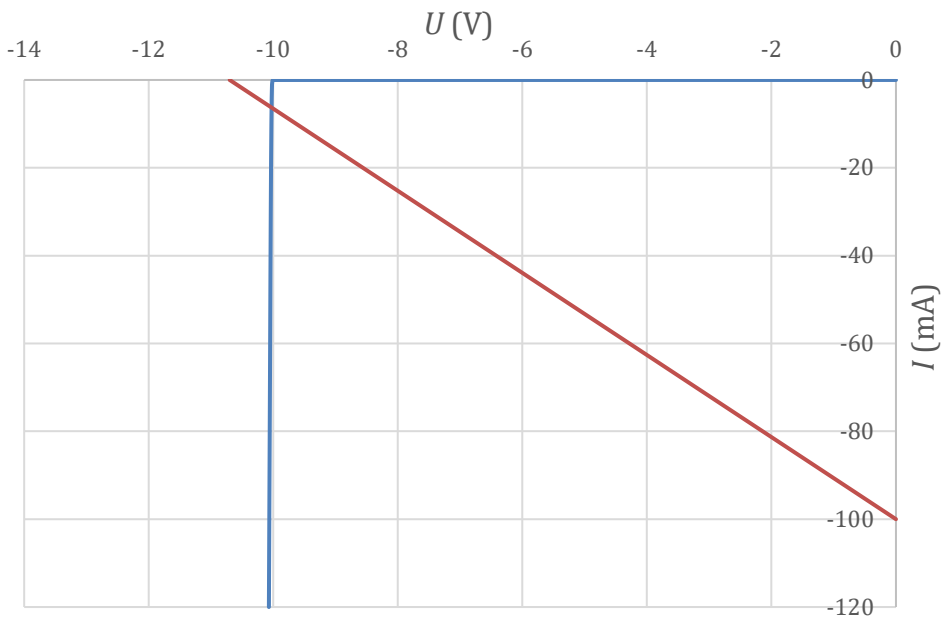
Rce. 12.4: Výpočet odporu zatíženého stabilizátoru

Na Obr. 12.4 je uvedeno náhradní schéma zatíženého stabilizátoru s přepočítanými hodnotami odporu a napětí. Toto schéma odpovídá nezatíženému děliči z Obr. 12.1 a tedy i výpočet pracovního bodu P_S bude stejný.



Obr. 12.4: Náhradní schéma zatíženého stabilizátoru

Dopočteme tedy polohu pracovního bodu pro zatížený stabilizátor. Zatěžovací rezistor zvolíme jako 1 kΩ. Napětí naprázdno po dosazení do Rce. 12.3 vychází U_S = 10,7 V; náhradní rezistor po dosazení do Rce. 12.4 R_S = 107 Ω; proud na krátko tedy 100 mA. Znázornění pracovního bodu zatíženého stabilizátoru uvádí Graf 12.2.



Graf 12.2: Pracovní bod zatíženého stabilizátoru

Z výpočtů i grafů je patrné, že když budeme u stabilizátorů se Zenerovou diodou zatěžovací odpor R_z zmenšovat (z původní hodnoty $R_z \rightarrow \infty$ pro nnezatížený stabilizátor; na R_z = 1 kΩ pro druhý případ) bude klesat hodnota napětí na diodě a tím pádem budeme muset použít diodu s menším *Uz*.

Výhoda stabilizátoru v zapojení se Zenerovou diodou oproti diodovému omezovači[22] je možnost použití pro mnohem větší hodnoty napětí.

K tomu aby nebyly překročeny provozní vlastnosti, bychom ještě měli dopočíst výkon, který bude na diodě (případně rezistorech atd…) a srovnat s parametry dané součástky, které udává výrobce. Výkon spočteme jednoduše ze znalosti proudu a napětí dle Rce. 12.5.

$$P = U \cdot I$$

Rce. 12.5: Výpočet výkonu

[22] Rozsah diodového omezovače je možné zvětšit zapojením dvou, případně tří diod v sérii.

Úkol

1. Navrhněte stabilizátor se Zenerovou diodou pro váš napěťový zdroj. Zvolte vhodně jednotlivé součástky (proveďte výpočty dle postupů v této kapitole) a zapojení realizujte. Ověřte funkci stabilizátoru (připojte vhodně voltmetr a ampérmetr). **Vždy se musíme ujistit, že v zapojeném obvodu nejsou překročeny mezní parametry součástek!**

2. Jakou Zenerovu diodu (s jakým největším *Uz*) bychom pro daný zdroj mohli použít?

3. Opakujte úkol 1 s diodou, která bude mít menší *Uz*. Co se v zapojení změní? Na co si především musíme při této změně dát pozor? **Vždy se musíme ujistit, že v zapojeném obvodu nejsou překročeny mezní parametry součástek!**

Přílohy

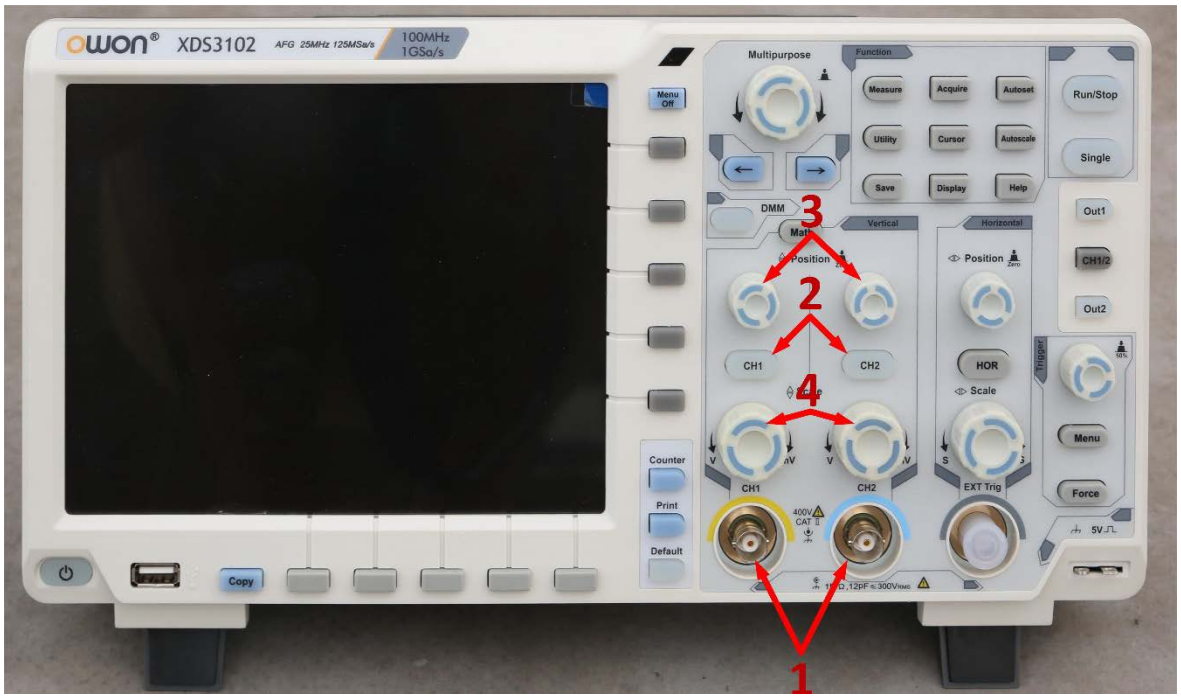
Měření teploty pomocí multimetru

Nastavení multimetru pro měření teploty je uvedeno na Obr. P. 1. Sondu připojíme do prostředních dvou zdířek – černý konektor nalevo a červený napravo. Otočný volič nastavíme do polohy °C, pro měření teploty v jednotkách stupně Celsia, případně do polohy °F pro měření ve stupních Fahrenheita.

Obr. P. 1: Zapojení sondy do multimetru pro měření teploty

Osciloskop

Osciloskop je přístroj, který umožňuje zobrazit průběh napětí v závislosti na čase. Na Obr. P. 2. je znázorněn digitální osciloskop.



Obr. P. 2: Osciloskop OWON

K osciloskopu připojíme měřící sondy ke kanálu 1 (CH1), případně i ke kanálu 2 (CH2) {1}. Důležité nastavení se ukrývá pod tlačítky CH1 a CH2 {2} – zde nastavíme, zda měříme stejnosměrný, nebo střídavý průběh (Couplink – AC/AC). Otočnými ovladači Position {3} nastavíme horizontální polohu křivky – nejlépe do nuly (budeme ovladačem otáčet do té doby, než se na stavovém řádku obrazovky nastaví 0.00div). Otočným ovladačem Scale {4} nad sondou daného kanálu nastavíme rozsah měřeného napětí, opět se zobrazí ve stavovém řádku.

Stavebnice Solar assistent

Solární panely, filtry a motorek obsahuje stavebnice Solar assistent – Obr. P. 3.. Ze stavebnice je možné sestavit držáky a stojánky, které umožňují například měnit úhel sklonu panelů vůči zdroji světla.

Obr. P. 3: Stavebnice Solar assistent

Doporučená literatura

[1] VOBECKÝ, Jan a Vít ZÁHLAVA. *Elektronika: součástky a obvody, principy a příklady*. 2. rozš. vyd. Praha: Grada, 2001, 188 s. ISBN 80-7169-884-9.

[2] MALINA, Václav. *Poznáváme elektroniku*. 1. vyd. České Budějovice: Kopp, 2006, 430 s. ISBN 80-7232-271-0.

[3] SVOBODA, Emanuel. *Přehled středoškolské fyziky*. 4. uprav. vyd. Praha: Prometheus, 2006, 531 s. ISBN 80-7196-307-0.

[4] ROUBALOVÁ, Jitka. *Elektrotechnika* [online]. Plzeň, 2015 [cit. 2016-08-15]. Dostupné z: http://download.spstrplz.cz/automatizace_vyrobnich_procesu/2_ucebni_texty_KA1/Elektrotechnika.pdf

[5] MIKULEC, Milan a HAVLÍČEK, Václav. *Základy teorie elektrických obvodů*. 2. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002. ISBN 80-01-02519-5.