

MĚŘENÍ POLOVODIČOVÉHO USMĚRŇOVAČE STABILIZACE NAPĚTÍ

ÚKOL MĚŘENÍ:

1. Změřte charakteristiku křemíkové diody v propustném směru. Měřenou závislost zpracujte graficky formou $I_d = f(U_d)$.
2. Změřte závěrnou charakteristiku Zenerovy diody a vynesete ji graficky jako $I_d = f(U_z)$.
3. Zapojte můstkový usměrňovač a nakreslete jeho zatěžovací charakteristiku $U = f(I)$.
4. Ověřte si průběh napětí a závislost velikosti zvlnění na odebíraném proudu pozorováním na obrazovce osciloskopu.
5. Změřte totéž jako v 3. a 4. úkolu při zapojení integrovaného stabilizátoru na výstupu usměrňovače.
6. Zapojte jednocestný usměrňovač a proveďte totéž jako dle 3. a 4. úkolu.

1. TEORETICKÝ ÚVOD

K napájení elektronických přístrojů, při některých elektrických pohonech a v řadě dalších aplikací potřebujeme stejnosměrný proud. Získá se z proudu střídavého usměrněním. V úloze se proto seznámíme s vlastnostmi, zapojením a měřením polovodičových usměrňovačů, filtrací usměrněného napětí a jeho stabilizací.

1.1 Princip polovodičové diody

Usměrňovacím prvkem, zapojeným v usměrňovači, bývá dnes polovodičová křemíková dioda. Znečištěním monokrystalu čtyřmocného Si nepatrným množstvím pětímocného prvku (např. P, As, Sb) vznikne polovodič typu N, protože z pěti valenčních elektronů příměsného atomu se jen čtyři zabudují v kovalentních vazbách a zbývající pátý je v krystalu jen volně vázaný a může zprostředkovat vedení proudu. Příměsi tohoto typu se nazývají donory.

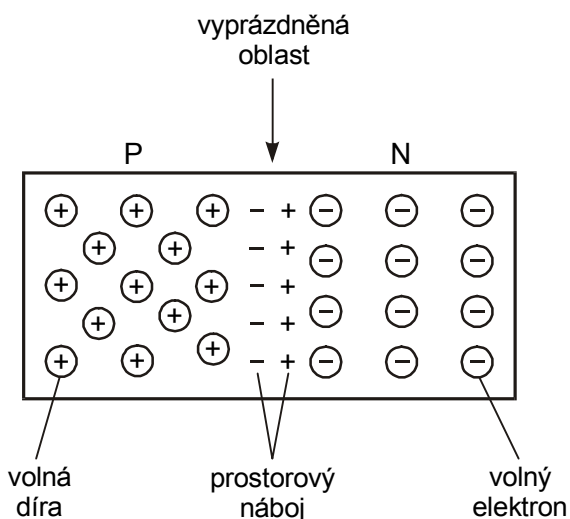
Znečištěním monokrystalu Si trojmocným prvkem (např. Ga, B, Al) vznikne polovodič typu P. Nižší počet valenčních elektronů příměsného atomu podmiňuje existenci nenasycené kovalentní vazby, v níž chybí jeden elektron. Poněvadž v místě neúplné vazby je přebytek kladného náboje a poněvadž přeskokem elektronů ze sousedních vazeb se může neúplná vazba přemísťovat, chová se taková vazba jako kladně nabitá a volně pohyblivá kvazičástice, zvaná díra. Díry zprostředkovávají vedení proudu v polovodiči typu P. Příměsi, které umožňují vznik děr, se nazývají akceptory.

V polovodiči typu N se kromě volných elektronů (většinové nosiče náboje) vyskytují také volné díry, avšak v koncentraci podstatně nižší (menšinové nosiče náboje). Podobně je tomu i v polovodiči typu P, kde většinovými nosiči jsou díry a menšinovými nosiči elektrony.

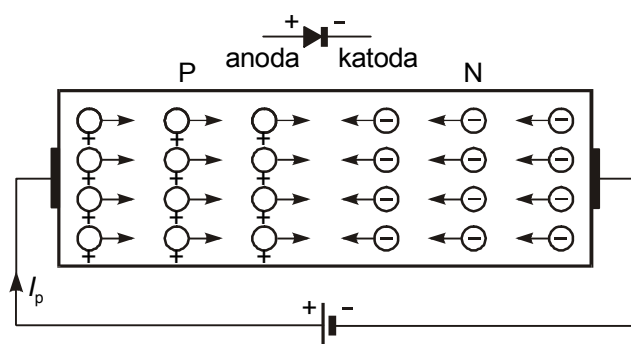
Vytvoří-li se v jediném monokrystalu obě oblasti typu P i N, vzniká na jejich rozhraní oblast zvaná přechod PN. Většinové (majoritní) elektrony z oblasti N difundují do oblasti P, kde zrekombinují až do určité vzdálenosti od přechodu s většinovými dírami. Naopak většinové díry z oblasti P difundují do oblasti N, kde rekombinují s většinovými elektrony. Na obou stranách přechodu tak vzniká oblast bez volných nosičů náboje. Nepohyblivý náboj na

ionizovaných donorech na straně N a ionizovaných akceptorech na straně P vytvoří vnitřní elektrické pole (pole prostorového náboje), které zabrání další difuzi volných nosičů náboje a ustaví se tak ve velmi krátké době rovnovážný stav (obr. 1). Velikost oblasti vyprázdňené od volných nosičů závisí na velikosti dotace jednotlivých oblastí P a N. Čím vyšší dotace, tj. koncentrace donorů, případně akceptorů, tím je vyprázdňená oblast menší.

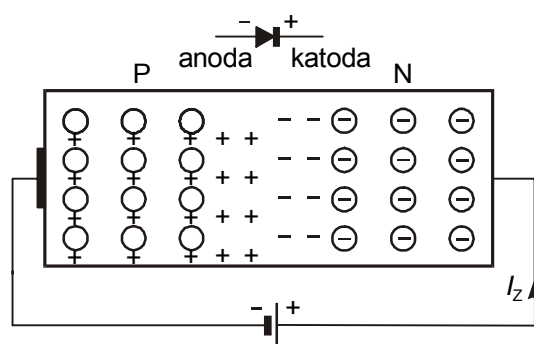
Připojíme-li na polovodič typu P plus pól a na polovodič typu N minus pól stejnosměrného zdroje (obr. 2), oslabí přiložené napětí zdroje vliv vnitřního elektrického pole a při dosažení prahového (tzv. difúzního) napětí bude přechod propouštět většinové nosiče. Vnější obvodem začne v propustném směru diody protékat proud I_p . Šipka ve schematické značce diody (obr. 2) ukazuje směr propustnosti proudu.



Obr. 1 PN přechod v termodynamické rovnováze



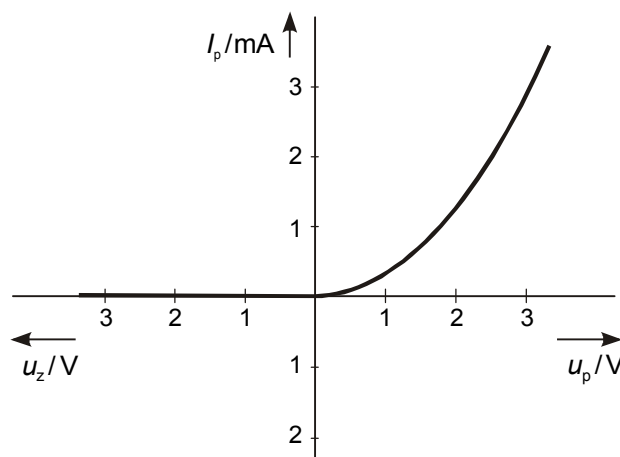
Obr. 2 PN přechod v propustném směru



Obr. 3 PN přechod v závěrném směru

Připojíme-li k přechodu PN zdroj s opačnou polaritou (obr. 3), většinové nosiče budou přitaheny elektrodami zdroje, tím se od sebe oddálí a šířka přechodu se zvětší. Přes přechod se mohou dostat jen menšinové nosiče náboje. Protože těchto je v oblasti P i N málo, bude vnějším obvodem protékat jen velmi malý závěrný proud I_z . Přechod je tím polarizován v nepropustném, neboli závěrném směru.

Podstatou diod je tedy usměrňovací jev, spočívající v různé vodivosti součástky v jednom a druhém směru. Charakteristika ideální diody v propustném směru ukazuje, že dioda má zpočátku velký odpor, který při dosažení určitého napětí začne velmi rychle klesat. S rostoucím proudem I_p se úbytek napětí U_p na diodě na strmé části charakteristiky mění jen velmi málo (obr. 4).



Obr. 4 VA charakteristika diody

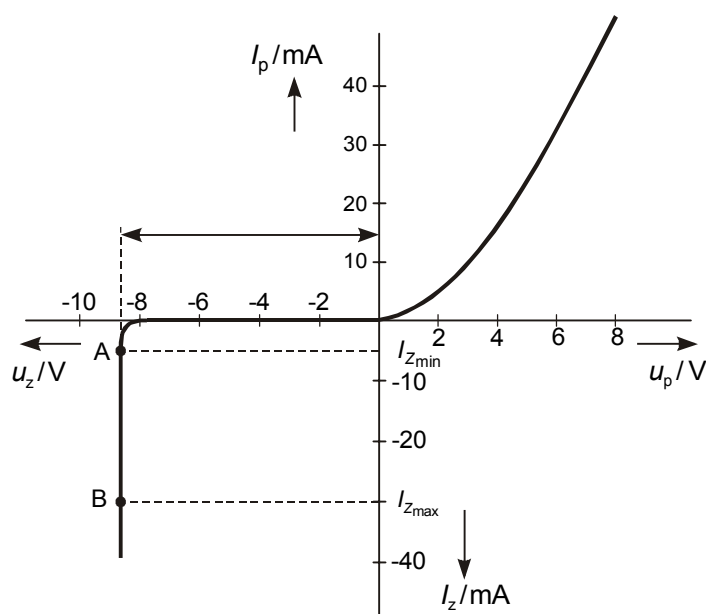
Proud v nepropustném směru I_Z je v širokém rozmezí téměř stálý, avšak při dosažení určitého závěrného napětí U_{ZP} , zvaného průrazné, se vodivost diody v nepropustném směru značně zvýší a to má za následek tepelné zničení PN přechodu a tím i diody.

Usměrňovací diody charakterizují následující hlavní parametry:

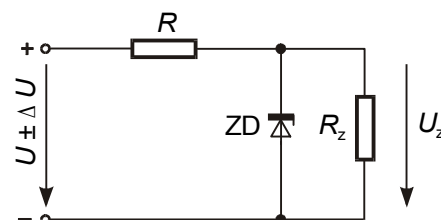
- největší usměrněný proud $I_{SS\max}$ udává maximální přípustnou střední hodnotu usměrněného proudu; při překročení se dioda nadměrně zahřívá a poté se zničí;
- největší úbytek napětí U_{AK} mezi anodou a katodou diody v propustném směru při jmenovitém proudu diody;
- největší přípustné závěrné napětí U_{RRM} .

1.2 Stabilizace napětí Zenerovou diodou

Zenerova dioda je křemíková dioda určená pro provoz v nepropustném (závěrném) stavu. V propustném směru se tyto diody neliší od ostatních křemíkových diod. Zenerovy diody se vyznačují vysokým stupněm dotace na obou stranách přechodu PN. Pracují v oblasti průrazu, který vzniká na diodě zapojené v nepropustném směru v důsledku tunelového jevu po připojení určitého napětí na její přechod. K průrazu dochází při malých napětích, řádově jednotek až desítek voltů.



Obr. 5 VA charakteristika Zenerovy diody



Obr. 6 Stabilizátor napětí se Zenerovou diodou

Z charakteristiky Zenerovy diody (obr. 5) je zřejmé, že v pracovní oblasti mezi body A, B je na diodě Zenerovo napětí U_Z téměř konstantní. Pracovní oblast je vymezena rozmezím proudu $I_{Z\min}$ a $I_{Z\max}$. Této části charakteristiky je využito pro stabilizaci napětí. Při proudch větších než $I_{Z\max}$ (za bodem B) je Zenerova dioda přetížena a může se ohřátím zničit.

Má-li být Zenerova dioda užita ke stabilizaci napětí, musí být vždy zapojena v kombinaci s odporem R . Změna stejnosměrného napájecího napětí U o hodnotu $\pm \Delta U$ (obr. 6) se projeví změnou napětí na odporu R . Napětí U_Z na zatěžovacím odporu R_Z se přitom téměř nemění.

1.3. Základní zapojení usměrňovačů

1.3.1 Jednocestný usměrňovač

Velikost usměrněného napětí odebraného spotřebičem závisí především na velikosti střídavého napájecího napětí. Proto bývá obvykle zapotřebí napájecí napětí (nejčastěji síťové) transformovat na žádanou velikost. V některých případech je možno i transformátor vynechat a usměrňovač napájet přímo ze sítě.

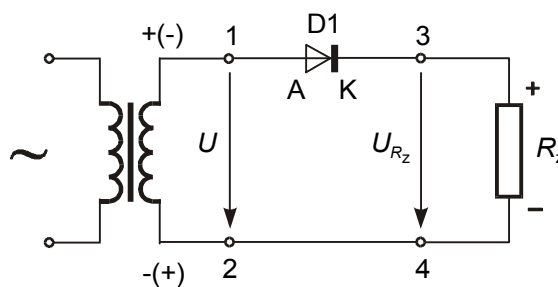
Primární vinutí (obr. 7) je připojeno na střídavé napětí sítě, ze sekundárního vinutí se odebírá napětí U usměrňované diodou D_1 . Spotřebič R_Z je ohmický odpor připojený na svorky 3, 4. Je-li v první půlperiodě (obr. 8a) střídavého napětí U svorka 1 sekundárního vinutí transformátoru kladnější než svorka 2, pak anoda A diody D_1 je kladná proti katodě a dioda je zapojena v propustném směru. Proud I_p poteče v obvodu: 1 - D_1 - 3 - R_Z - 4 - 2 - 1.

V druhé půlperiodě střídavého napětí U je svorka 1 zápornější než svorka 2. V tomto případě je anoda A diody D_1 záporná proti katodě a dioda je polarizována v nepropustném směru. Obvodem tudíž nepoteče proud (pokud ovšem zanedbáme nepatrný závěrný proud I_Z). Napětí U_{R_Z} na spotřebiči R_Z (obr. 8.b) má sice neměnnou polaritu, ale je značně pulsující, jelikož po dobu celé půlperiody je rovno nule.

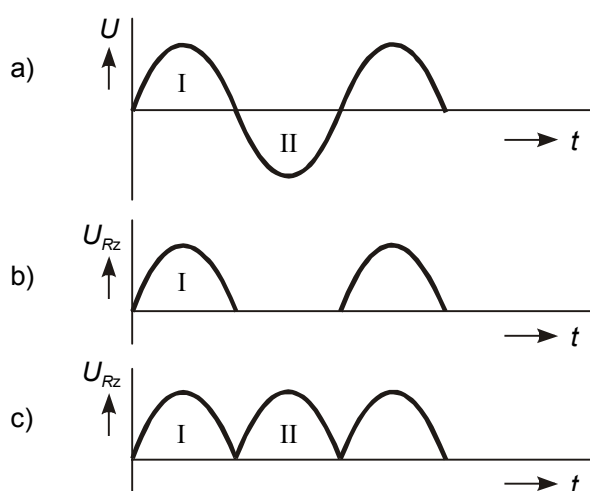
Polarita na spotřebiči R_Z je určena výhradně zapojením diody a je dána směrem průtoku proudu. V místě, kam proud I_p do spotřebiče vstupuje (svorka 3), je vždy polarita plus (+). Tam, kde ze spotřebiče vychází, je vždy polarita minus (-).

1.3.2 Dvoucestný usměrňovač

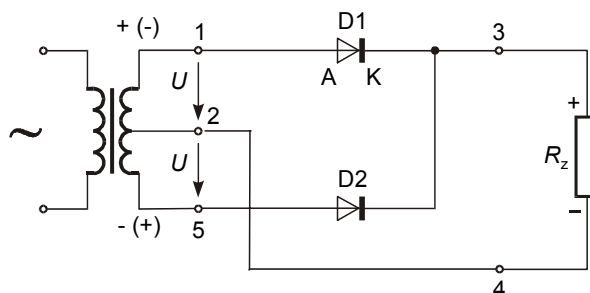
Aby se snížila tepavost usměrněného napětí jednocestného usměrňovače, je třeba umožnit proudu průtok v obou půlperiodách (obr. 8c). Toho dosáhneme zapojením dvou jednocestných usměrňovačů dle obr. 9. V periodě, kdy větví 1 - D_1 - 3 netekl proud, je svorka transformátoru 5 kladnější než svorka 2 a dioda D_2 je tedy pólována v propustném směru. Obvodem protéká proud ve směru 5 - D_2 - 3 - R_Z - 4 - 2 - 5.



Obr. 7 Schéma jednocestného usměrňovače



Obr. 8 Průběh napětí usměrněného jednocestně (8b) a dvoucestně (8c)



Obr. 9 Schéma dvoucestného usměrňovače se dvěma diodami

1.3.3 Můstkový (Grätzův) usměrňovač

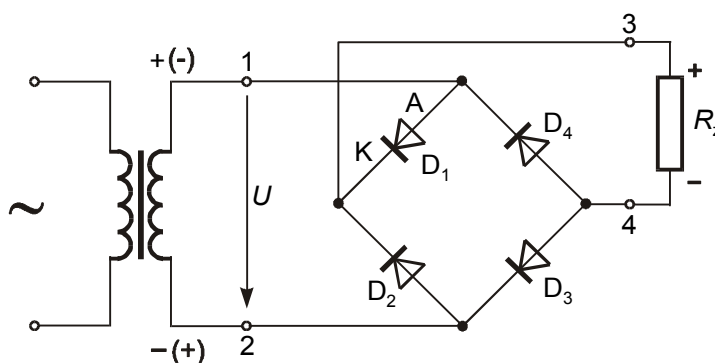
Nevýhodou předchozího dvoucestného usměrňovače je dělené sekundární vinutí transformátoru, dimenzované na napětí $2U$. Grätzovo zapojení usměrňovače tuto nevýhodu odstraňuje (obr. 10).

Je-li v první půlperiodě střídavého napětí U svorka 1 kladnější než svorka 2, proud poteče v obvodu:

1 - D_1 - 3 - R_Z - 4 - D_3 - 2 - 1.

V druhé půlperiodě při obrácené polaritě napětí U proud poteče v obvodu : 2 - D_2 - 3 - R_Z - 4 - D_4 - 1 - 2. Spotřebičem R_Z tudíž teče proud vždy stejným směrem, vstupní svorka 3 je proto kladná. Průběh napětí na spotřebiči je na obr. 8c.

V současné praxi dáváme přednost zapojení můstkovému před dvoucestným, protože cena 2 diod je mnohem menší, než zdvojeného vinutí transformátoru.



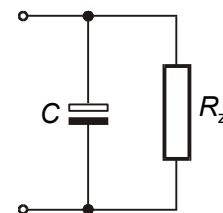
Obr. 10 Schéma můstkového usměrňovače

1.4 Filtrace usměrněného napětí

Dvoucestně a zejména jednocestně usměrněné napětí je značně pulsující a pro napájení elektronických zařízení tudíž nevhodné. Proto se mezi usměrňovací diodu a spotřebič zařazuje filtr, který napětí vyhladí.

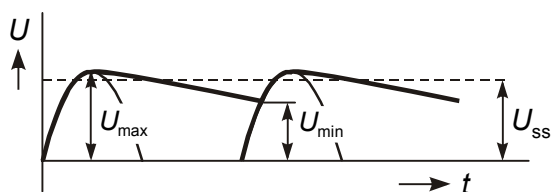
Filtr tvořený kondenzátorem C se připojuje na výstup usměrňovače paralelně k zatěžovacímu odporu R_Z (obr. 11).

V první čtvrtperiodě střídavého napětí U (obr. 12) se kondenzátor C nabije na maximální hodnotu napájecího napětí U_{max} . Bezstratový kondenzátor by si toto napětí podržel. Připojíme-li však paralelně ke kondenzátoru ještě navíc zatěžovací odpor R_Z , bude se v době poklesu napájecího napětí U z nabitého kondenzátoru odebírat do zátěže proud. Podle jeho velikosti se kondenzátor bude vybíjet až do minimálního napětí U_{min} , kdy jej zdroj v další periodě opět dobije na napětí U_{max} .

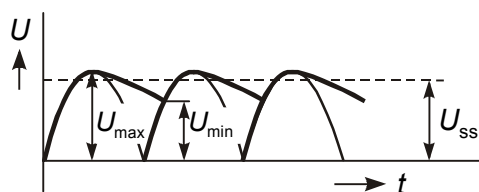


Obr. 11 Schéma filtru

Napětí na zátěži tedy kolísá mezi hodnotami U_{max} a U_{min} kolem průměrné hodnoty napětí U_{SS} , které určuje stejnosměrnou složku usměrněného napětí. Tu změří stejnosměrný voltmetr. Čím větší proud se odebírá, tím nižší je průměrná hodnota stejnosměrného napětí U_{SS} . Napětí U_{SS} dvoucestného usměrňovače je proto při stejném odběru proudu vždy vyšší než napětí U_{SS} jednocestného usměrňovače (viz obr. 13).



Obr. 12 Průběh jednocestně usměrněného napětí



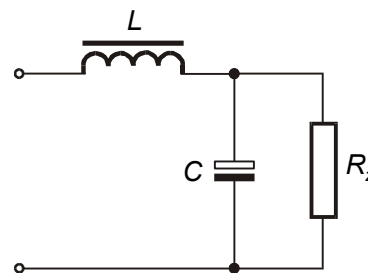
Obr. 13 Průběh dvoucestně usměrněného napětí

Střídavou složku usměrněného napětí $U_{stř}$, závislou na velikosti napětí U_{max} a U_{min} , můžeme přibližně změřit střídavým voltmetrem. Čím je rozdíl napětí $U_{max} - U_{min}$ menší, tím je filtrace dokonalejší. Stupeň filtrace charakterizuje činitel zvlnění k . Je to poměr střídavé složky usměrněného napětí $U_{stř}$ k stejnosměrnému napětí U_{SS} . Jeho hodnota má být co nejmenší.

$$k = \frac{U_{stř}}{U_{SS}} \cdot 100\% . \quad (1)$$

Usměrňovač s filtrem, tvořeným kondenzátorem C , se vyznačuje měkkou zatěžovací charakteristikou: napětí na spotřebiči R_Z se zvyšujícím se odběrem proudu poměrně rychle klesá.

Pro další zlepšení filtrace se kromě kapacity C , při velkých odebíraných proudech, zařazuje do série se spotřebičem R_Z tlumivka L , která představuje zásobník elektromagnetické energie (obr. 14). Působením tlumivky se prodlužuje doba nabíjecího proudu kondenzátoru, který proto nemá tak vysokou špičku jako při užití samotného kondenzátoru.



Obr. 14 Schéma filtru

Usměrňovač s filtrem LC se vyznačuje tvrdou zatěžovací charakteristikou: napětí na spotřebiči je málo závislé na velikosti odebíraného proudu.

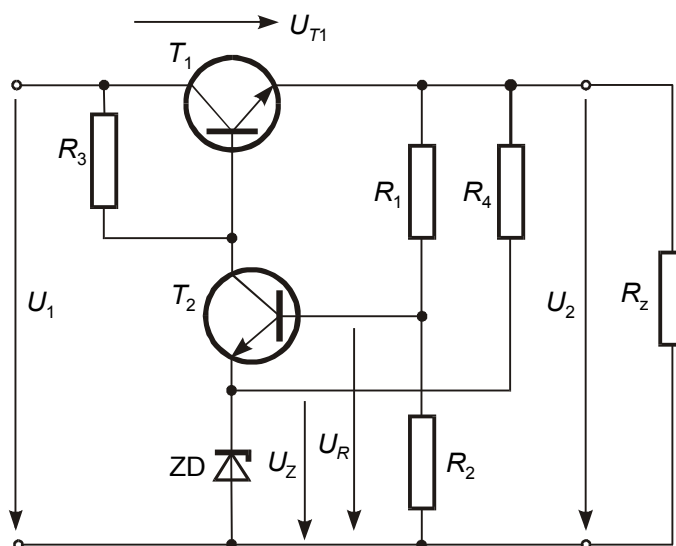
1.5 Stabilizace napětí

Kvalita činnosti elektronických přístrojů je ve značné míře závislá na stabilitě napětí napájecích zdrojů. Napájecí napětí přístroje musí zůstat neměnné při kolísání napětí sítě i při změnách proudu odebíraného zátěží. Ke splnění těchto požadavků se mezi zdroj a napájený přístroj zapojuje stabilizátor.

Nejjednodušší stabilizátor tvoří kombinace odporu se Zenerovou diodou dle obr. 6. Změny proudu v zatěžovacím odporu se smí pohybovat max. v rozmezí proudů I_{Zmax} a I_{Zmin} dle obr. 5. Přitom se ze zdroje odebírá stále proud odpovídající největší hodnotě odebíraného proudu a tím vznikají při větších proudech tepelné ztráty, které je nutné odvést pomocí chladičů.

Proto se dnes používá elektronických stabilizátorů, pracujících s nižšími ztrátami a vyšší kvalitou stabilizace.

V laboratoři se seznámíte s běžně používaným polovodičovým stabilizátorem, provedeným formou integrovaného obvodu. Funkci stabilizátoru si objasníme na základním zapojení na obr. 15.



Obr. 15 Schéma integrovaného stabilizátoru napětí

Princip napěťového stabilizátoru spočívá v porovnání a udržování shody velikostí konstantního referenčního napětí na Zenerově diodě U_Z a regulačního napětí U_R , odvozeného pomocí odporového děliče R_1, R_2 z výstupního napětí U_2 .

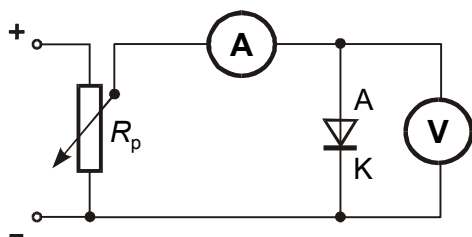
Při zvětšení výstupního proudu vlivem menšího odporu zátěže se sníží výstupní napětí U_2 . Tím se sníží i napětí na bázi tranzistoru T_2 , čímž poklesne jeho kolektorový proud a sníží se úbytek napětí na odporu R_3 . Dále vzroste napětí na bázi tranzistoru T_1 , sníží se jeho odpor a napětí U_2 se tím opět zvýší na téměř původní stav.

Integrované stabilizátory mají kromě stabilizačních obvodů též obvody pojistné, zajišťující ochranu obvodu proti zkratu na výstupu a přehřátí.

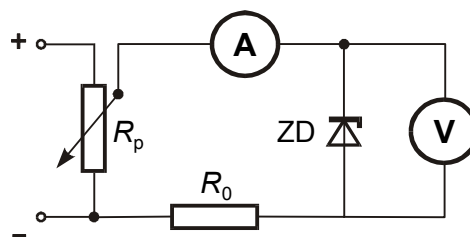
2. PRINCIP MĚŘENÍ

2.1 Měření charakteristiky diody v propustném směru

Diodu zapojíme přes potenciometr ke zdroji stejnosměrného napětí dle obr. 16. Proud diody měříme ampérmetrem a napětí voltmetrem, paralelně připojeným k diodě. Vliv proudu voltmetrem na údaj ampérmetru můžeme zanedbat.



Obr. 16 Zapojení pro měření VA charakteristiky diody



Obr. 17 Zapojení pro měření VA charakteristiky Zenerovy diody

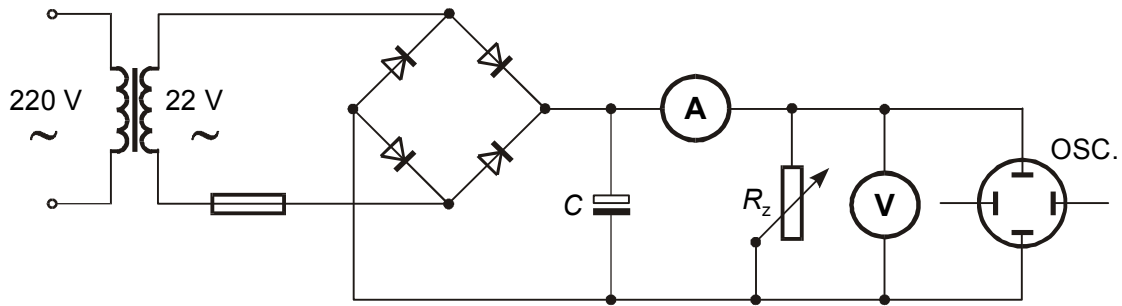
Pomocí potenciometru zvyšujeme napětí na diodě od nuly. První hodnotu napětí odečteme při počátku průtoku proudu. Volíme větší hustotu bodů z počátku, kdy se více mění napětí (viz obr. 4) s proudem.

2.2 Měření charakteristiky Zenerovy diody

Zapojení volíme obdobné, dle obr. 17. Z důvodu ochrany diody a měřicích přístrojů uijeme navíc ochranný odpor R_0 . Napájecí napětí potenciometru musíme volit větší než je Zenerovo napětí diody.

2.3 Zapojení můstkového usměrňovače

Vlastní zapojení je na obr. 18. Zapojení transformátoru a diod odpovídá obr. 10. Stejněsměrné napětí měříme voltmetrem a proud, odebíraný zatěžovacími odpory R_Z , měříme ampérmetrem.



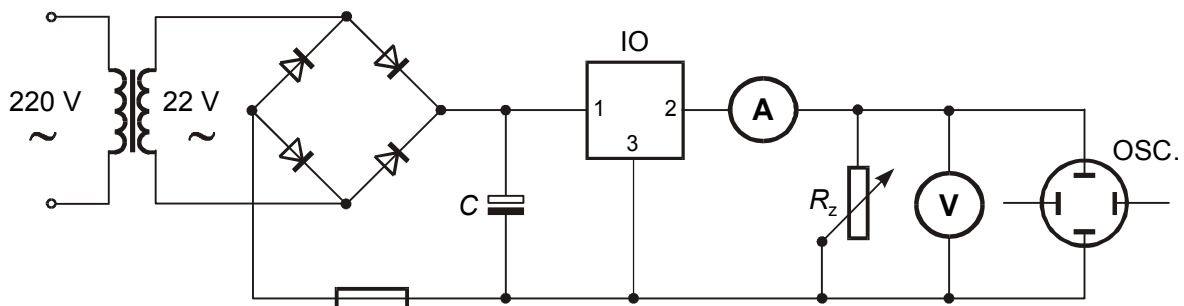
Obr. 18 Zapojení můstkového usměrňovače

2.4 Sledování průběhu napětí a jeho zvlnění

Zvlnění usměrněného napětí pozorujeme na osciloskopu, paralelně připojeném k zátěži R_z dle obr. 18. Popis práce s osciloskopem je uveden v obecné části (Měřicí přístroje).

2.5 Zapojení usměrňovače se stabilizátorem

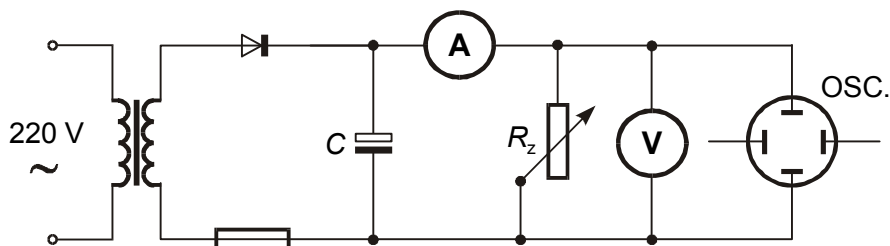
Do zapojení dle obr. 18 vložíme mezi kondenzátor C a ampérmetr integrovaný obvod dle obr. 19. Použitý integrovaný obvod je typu MA 7815 s výstupním stabilizovaným napětím 15 V a maximálním proudem 2 A. Umístěn je na chladiči.



Obr. 19 Zapojení můstkového usměrňovače se stabilizátorem

2.6 Zapojení jednocestného usměrňovače

Zapojení je na obr. 20. Zapojení získáme z můstkového změnou zapojení diod.



Obr. 20 Zapojení jednocestného usměrňovače

3. POSTUP MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ

3.1 Měření charakteristiky diody

Zapojte obvod podle obr. 16. Napájecí napětí potenciometru volte 5 V, před zapnutím zdroje nastavte jezdec potenciometru na nulové výstupní napětí. Do schématu si zakreslete polaritu měřicích přístrojů.

Posunem jezdce potenciometru měřte napětí na diodě a odečítejte hodnoty proudu až do maximálního dovoleného proudu.

Navrhněte tabulku naměřených hodnot; graficky zpracujte závislost $I = f(U)$.

3.2 Charakteristika Zenerovy diody

Zapojte obvod se Zenerovou diodou dle obr. 17 zapojenou v nepropustném směru a s ochranným odporem R_0 . Napájecí napětí 15 V.

Potenciometrem zvyšujte napětí na Zenerově diodě, měřte napětí a proud v obvodu. Měření ukončete při dosažení zadaného proudu $I_{Z\max}$.

Navrhněte tabulku naměřených hodnot; graficky zpracujte závislost $I_Z = f(U)$.

3.3 Zatěžovací charakteristika můstkového usměrňovače

- Zapojte můstkový usměrňovač dle obr. 18. Napájecí napětí diod 22 V, odpor R_Z složen z reostatů $1200\ \Omega + 250\ \Omega + 39\ \Omega + 13\ \Omega$. Poněvadž se k filtraci používají elektrolytické kondenzátory, je nutno při jejich zapojování dodržet správnou polaritu. Minus pól je umístěn na obalu a jeho vývod označen na svorce -, plus pól je v ose válcového tělesa kondenzátoru (izolovaný vývod) nebo vyveden letovacím očkem, označeným +. Při chybném pólování se kondenzátor zničí.
- Napětí měřte při zadaných hodnotách proudu.
- Graficky znázorněte závislost $U = f(I)$. Obě stupnice vynášejte od nuly.

3.4 Ověření průběhu zvlnění usměrněného napětí

Vertikální vstup osciloskopu připojte paralelně k voltmetru a při vhodně nastavené časové základně sledujte průběh střídavé složky usměrněného napětí. Porovnejte jeho velikost při stejných odebíraných proudech pro jednotlivá zapojení.

3.5 Zatěžovací charakteristika stabilizovaného usměrňovače

Do zapojení můstkového usměrňovače dle úkolu 4 vložte stabilizátor dle obr. 20 a změřte charakteristiku usměrňovače se stabilizátorem. Sledujte pokles zvlnění stabilizovaného napětí. Průběh vyneste do grafu společného s úkolem 4. Pozor na správné zapojení! Při záměně vývodů při připojení integrovaného obvodu dojde k jeho zničení.

3.6 Zatěžovací charakteristika jednocestného usměrňovače

Realizujte zapojení jednocestného usměrňovače dle obr. 20 a změřte jeho charakteristiku. Naměřené hodnoty zapište do tabulky dle bodu 3.5 a charakteristiku nakreslete do grafu společného s úkolem 3.

Tabulka naměřených hodnot pro úkol 3, 5, 6.
 Závislost výstupního napětí U_z (V) na odebíraném proudu I (A).

Proud (A)	0	0,05	0,1	0,2	0,5	1	1,2	1,5
Můstkový usměrňovač								
Můstkový usměrňovač stabilizovaný								
Jednocestný usměrňovač								