

Měření voltampérových charakteristik diod s použitím časovaného zdroje

1. Úvod

Při měření voltampérových charakteristik diod potřebujeme současně stanovit napětí na diodě a proud, který jí protéká. Nejjednodušší možnost je použití regulovaného zdroje, který ovládáme ručně, a dvou multimetrů měřících napětí resp. proud. Kvůli časové náročnosti lze takto ovšem změřit voltampérovou charakteristiku nepříliš důkladně. Plně automatizované a rychlé měření vyžaduje programovatelný zdroj napětí a nejméně dvoukanalový analogově-digitální převodník, oba ovládané počítačem. V našem měření zvolíme obdobný přístup využívající časovaného zdroje napětí, který pozvolna zvyšuje napětí na diodě. Napětí a proud jsou pak dostatečně rychle zaznamenávány stolním multimetrem firmy Agilent. Takto získáme podrobnou voltampérovou charakteristiku diody v poměrně krátkém čase.

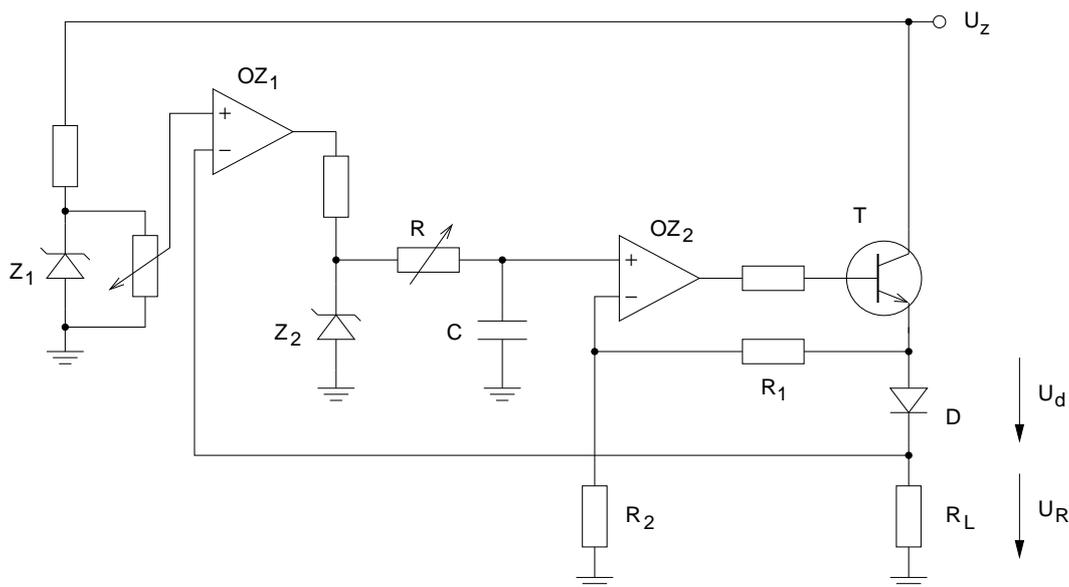
2. Časovaný zdroj JB02

Časovaný zdroj JB02 je zdrojem napětí přibližně lineárně rostoucího s časem nastavitelnou rychlostí v rozsahu $1/200 \text{ Vs}^{-1}$ až $1/20 \text{ Vs}^{-1}$. Maximální proud dodávaný zdrojem je přibližně 1 A. Popíšeme nejprve vnitřní uspořádání a funkci tohoto zdroje pomocí zjednodušeného schématu uvedeného na obrázku 1.

Měřená dioda D je zapojena v sérii s malým odporem R_L (o velikosti přibližně 1Ω). Operační zesilovač OZ_1 slouží jako napěťový komparátor. Porovnává referenční napětí odvozené z napěťové reference Z_1 a napětí na odporu R_L , které je přímo úměrné proudu protékajícímu diodou. Je-li napětí na rezistoru R_L nižší než referenční napětí $U_{\text{ref}} = R_L I_{\text{max}}$, kde I_{max} je nastavená maximální hodnota proudu protékajícího diodou, je na výstupu operačního zesilovače OZ_1 napětí jen o málo nižší než napětí zdroje U_z a stabilizované napětí získané pomocí napěťové reference Z_2 nabíjí kondenzátor C přes rezistor o velkém odporu R . Napětí na kondenzátoru C je sledováno operačním zesilovačem OZ_2 , který řídí proud bázi výkonového tranzistoru T tak, aby bylo napětí na dvojici dioda + rezistor R_L (napětí na emitoru tranzistoru) a napětí na kondenzátoru C v poměru daném odporovým děličem R_1 - R_2 . Jakmile napětí na R_L dosáhne hodnoty odpovídající maximálnímu proudu, klesne napětí na výstupu OZ_1 na hodnotu, která udržuje konstantní proud diodou.

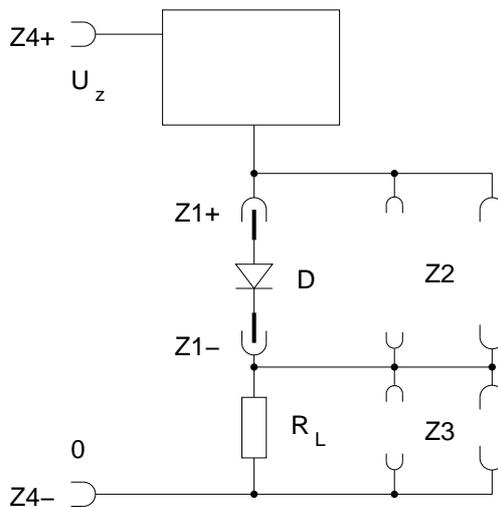
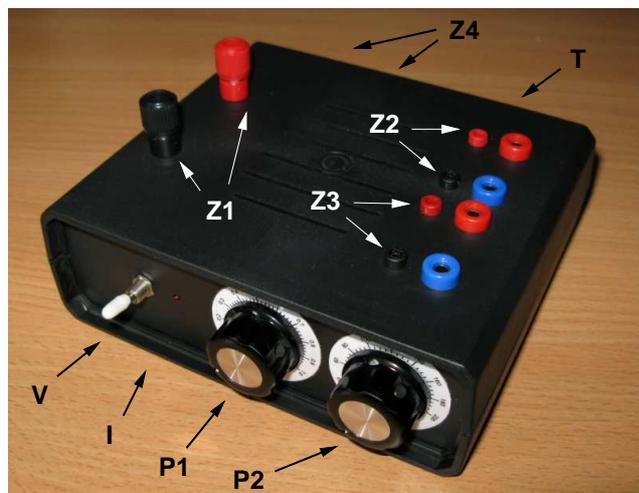
Na počátku měření je kondenzátor vybitý a na dvojici dioda + rezistor R_L je tak nulové napětí. Po zahájení nabíjení roste napětí na kondenzátoru C a je přibližně rovno

$$U_C(t) = U_{Z_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \right].$$



Obrázek 1: Zjednodušené schéma zapojení zdroje JB02

Předpokládáme přitom, že díky vysokému vstupnímu odporu operační zesilovač OZ_2 neovlivňuje významně průběh nabíjení kondenzátoru C . Zdroj pracuje v režimu $t \ll RC$ a výstupní napětí tak má poměrně dobře lineární časový průběh, jehož strmost lze nastavit změnou odporu R . Nominální kapacita C kondenzátoru použitého ve zdroji JB02 je 4.7 mF a hodnotu odporu R lze měnit v rozsahu přibližně 100 k Ω až 1.1 M Ω .



Obrázek 2: Ovládací prvky a zdířky zdroje JB02 (vlevo), zapojení zdířek (vpravo)

Na obrázku 2 jsou označeny ovládací prvky a zdířky zdroje JB02. Na předním panelu jsou umístěny knoflíky, kterými lze nastavovat maximální proud (knoflík P1) a rychlost nárůstu napětí (knoflík P2). Stupnice u těchto knoflíků jsou pouze orientační. Minimální hodnota I_{\max} (levý doraz knoflíku P1) je asi 12.5 mA a je určena k měření VA charakteristik vysoce svítivých LED. V horní poloze vypínače V dává zdroj nulové napětí. Přepneme-li vypínač do spodní polohy, začne narůstat napětí na měřené diodě, dokud není dosaženo nastaveného maximálního proudu I_{\max} . Poté zdroj udržuje konstantní proud I_{\max} diodou. Po dobu nárůstu napětí svítí červená dioda (indikátor I).

Zdířky na horní straně zdroje slouží k připojení měřené diody a přístrojů měřících napětí U_d a $U_R = R_L I$. Propojení těchto zdířek je zachyceno v pravé části obrázku 2. Zdířky určené k měření napětí jsou pro pohodlí při zapojování ve dvou velikostech. Označení polaritu je obvyklé: červená barva značí +, černá/modrá barva –.

Na zadní straně zdroje se nacházejí zdířky Z4 pro připojení napájecího napětí a BNC konektor trigu T (využije se při měření s multimetrem Agilent 34401A). Napájecí napětí U_z musí být dostatečně veliké, aby mohlo být dosaženo potřebné napětí na měření diodě. Při nastavování napájecího napětí je třeba ovšem také vzít v úvahu zahřívání výkonového tranzistoru, který je opatřen pouze pasivním chladičem. Ztrátový výkon na tranzistoru je při dosažení maximálního proudu roven

$$P_{\max} = (U_z - U_{d,\max} - R_L I_{\max}) I_{\max} .$$

Jeho hodnota by neměla přesáhnout 10 W případně se pohybovat v řádu několika wattů po delší dobu (desítky minut). Přílišné zatížení zdroje poznáme podle zápachu z něj vycházejícího. Vhodná hodnota napájecího napětí k měření diod v praxi je asi 10 V.

3. Měření s použitím vícekanalového multimetru Agilent 34970A

Měření VA charakteristiky s vícekanalovým přístrojem Agilent 34970A je prakticky jednodušší, protože můžeme současně sledovat napětí na diodě (U_d) i na rezistoru (U_R). Z těchto hodnot můžeme konstruovat VA charakteristiku, tedy závislost proudu protékajícího diodou $I = U_R / R_L$ na napětí U_d na diodě. Velikost odporu je v našem případě

$$R_L = 1.025 \Omega .$$

Měření při velkých hodnotách proudu není vhodné příliš protahovat, dioda i rezistor R_L se mohou značně zahřát a tím se změní jejich charakteristiky (není vyloučeno, že i trvale).

Měření napětí probíhá na kanálech 105 (U_d) a 115 (U_R). Přepínání kanálů zajišťují relé, vznikající zpoždění je kompenzováno softwarově. Multimetr je při měření ovládán programem `U_measure_34970A_man.py`, který komunikuje s multimetrem přes sériový port. Po spuštění tohoto programu jsme dotázáni na následující údaje:

- `total number of scans` – celkový počet skenů, který bude proveden
- `output file name` – jméno souboru, do něž budou uloženy výsledky

Jednotlivá měření napětí mají časový odstup 1 s a jsou prováděna s přesností na pět platných míst. Vlastní měření začne přibližně 2 s po odetřetí položky `output file`. Po skončení měření obsahuje výstupní soubor čtyři sloupce, první z nich je číslo datového bodu následuje čas a dvě napětí – U_d na kanálu 105 a U_R na kanálu 115.

Posloupnost úkonů při měření je následující:

1. nastavit vhodný maximální proud a časovou konstantu zdroje
2. spustit program `U_measure_34970A_man.py` a zadat přiměřený počet skenů
3. vzápětí po odetřetí jména souboru spustit nárůst napětí zdroje vypínačem V
4. po ukončení posledního skenu uvést vypínač V do horní polohy, aby se zdroj ani měřená dioda nepřehřála

Př.: Měříme výkonovou křemíkovou diodu 1N540, na které je při proudu 1 A napětí asi 1 V. Na rezistoru R_L bude v tomto případě také napětí přibližně 1 V. Maximálního proudu chceme dosáhnout za dvě minuty. Na zdroji tedy nastavíme časovou konstantu $2 \text{ min} / 2 \text{ V} = 60 \text{ sV}^{-1}$ a programu `U_measure_34970A_man.py` uložíme provést o něco více než 120 skenů.

4. Měření s použitím jednokanálového multimetru Agilent 34401A

Měření VA charakteristiky s jednokanálovým multimetrem Agilent 34401A je možné díky dobře reprodukovatelnému časovému průběhu napětí na zdroji. V prvním kroku měříme proud protékající diodou, v druhém kroku napětí na ní. Mezi těmito dvěma měřeními nesmí být manipulováno s knoflíkem časové konstanty zdroje. K zahájení měření přesně v okamžiku spuštění časovaného zdroje vypínačem V slouží zabudovaný trigr. Je zapotřebí propojit příslušné BNC konektory na zadní straně zdroje a multimetru.

Multimetr Agilent 34401A je při měření ovládán programem `U_measure_34401A_trig.py`, který si vyžádá zadání následujících údajů:

- `number of measurements` – počet měřených časových závislostí napětí, obvykle chceme změřit dvě
- `resolution digits (4/5/6)` – počet platných míst, na který budou měřeny hodnoty napětí. Čím více platných míst požadujeme, tím déle trvá jeden sken, což omezuje určuje minimální možnou prodlevu mezi skeny (pro daný počet míst $0.02 \text{ s} / 0.1 \text{ s} / 0.5 \text{ s}$)
- `delay between scans [s]` – prodleva mezi zahájením jednotlivých skenů
- `total number of scans` – celkový počet skenů, který bude proveden
- `ouput file name` – jméno souboru, do něž budou uloženy výsledky

Po skončení měření obsahuje výstupní soubor několik sloupců, první z nich je číslo datového bodu, následují sloupce s hodnotami napětí jednotlivých časových závislostí.

Posloupnost úkonů při měření VA charakteristiky je následující:

1. nastavit vhodný maximální proud a časovou konstantu zdroje, multimetr připojit na zdířky s napětím U_R
2. spustit program `U_measure_34401A_trig.py` a zadat přiměřené hodnoty vstupních údajů
3. po odetřetí vyčkat, až se na displeji multimetru rozsvítí indikátory `Rmt` a `Man`
4. spustit nárůst napětí zdroje vypínačem V , tím se automaticky spustí měření časové závislosti napětí
5. po ukončení posledního skenu uvést vypínač V do horní polohy, aby se zdroj ani měřená dioda nepřehřála
6. multimetr připojit na zdířky s napětím U_d
7. je-li to nutné, počkat na vychladnutí diody, poté zmáčknout `Enter`
8. přejít na bod 3 a provést druhé měření