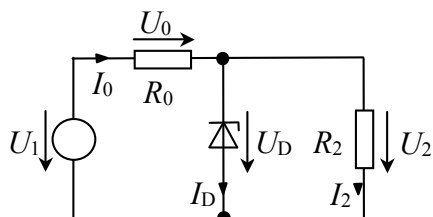


Nelineárne obvody v stacionárnom ustálenom stave – obvod s jedným nelineárnym prvkom

Úloha

1. Navrhnete parametre stabilizátora napätia so Zenerovou diódou podľa obr. 1.
2. Činnosť stabilizátora overte meraním. Zmerajte
 - a) VA charakteristiku Zenerovej diódy $I_D = f(U_D)$,
 - b) charakteristiku stabilizátora napätia $U_2 = f(U_1)$ pri $R_2 = \text{konšt.}$,
 - c) charakteristiku stabilizátora napätia $U_2 = f(R_2)$ pri $U_1 = \text{konšt.}$



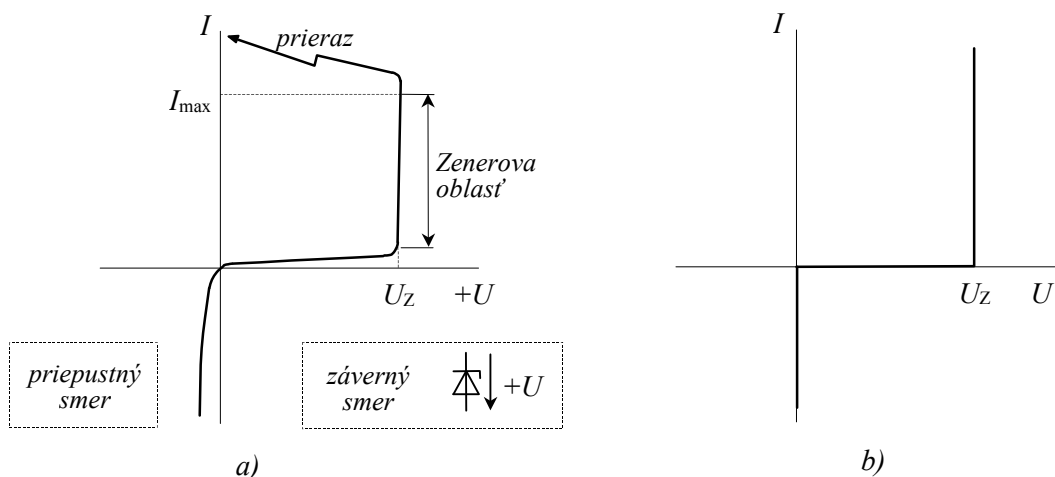
Obr. 1 Stabilizátor napätia so Zenerovou diódou

Teoretický úvod

Nelineárny obvod je každý obvod, ktorý obsahuje *aspoň jeden nelineárny prvok*. V tomto laboratórnom cvičení použijeme ako nelineárny prvok Zenerovu (stabilizačnú) diódu (ďalej len ZD), pričom sa však nebudeme bližšie zaoberať jej vnútornou štruktúrou, ale v skúmanom elektrickom obvode ju využijeme len ako prvok s príslušnou nelineárnou VA charakteristikou.

VA charakteristika Zenerovej diódy má tvar podľa obr. 2a (kladná orientácia napätia $+U$ na obr. 2 zodpovedá tzv. závernému smeru). V závernom smere, v oblasti $U < U_z$ má ZD veľmi veľký odpor, v tzv. Zenerovej oblasti je napätie na dióde prakticky konštantné (v tejto oblasti sa ZD využíva na stabilizáciu napätia vo vhodne navrhnutom obvode). Prúd v závernom smere nesmie prekročiť hodnotu I_{max} , aby nedošlo k poškodeniu diódy. V priepustnom smere sa ZD chová ako bežná dióda (v širokom rozsahu prúdov napätie na dióde je v rozmedzí 0,4 V – 0,8 V, dióda predstavuje rezistor s malým, obvykle zanedbateľným odporom).

Idealizovaná VA charakteristika ZD, ktorá sa niekedy využíva pri zjednodušenom riešení nelineárnych obvodov, má tvar podľa obr. 2b (v priepustnom smere je $R_D = 0$, $U_D = 0$, v Zenerovej oblasti je $U = U_z = \text{konšt.}$).



Obr. 2 VA charakteristika stabilizačnej diódy: a) skutočná, b) idealizovaná

Stabilizátor napätia

Najjednoduchšie zapojenie stabilizátora napätia so Zenerovou diódou je na obr. 1, v ktorom je ZD vzhľadom na zdroj s konštantným napätím U_1 zapojená v závernom smere. Napätie na záťaži, ktorou je rezistor R_2 , je v širokom rozsahu hodnôt odporu R_2 približne konštantné, $U_2 = U_Z \approx \text{konšt.}$ Predradený odpor R_0 má v obvode ochrannú funkciu – zaisťuje, aby prúd cez ZD neprekročil v pracovnej Zenerovej oblasti dovolenú hodnotu.

Pri návrhu obvodu s vybranou Zenerovou diódou s napätím U_Z a pre zvolené napätie zdroja U_1 treba dodržať určité podmienky. Konkrétne treba stanoviť:

- α) minimálnu hodnotu R_0 tak, aby prúd diódy neprekročil hodnotu I_{\max} ,
- β) rozsah hodnôt odporu záťaže R_2 , v ktorom pracovná oblasť ZD leží v Zenerovej oblasti.

α) Určenie R_0 :

V obvode na obr. 1 v Zenerovej oblasti (ak uvažujeme ideálnu VA charakteristiku ZD) platí:

$$U_0 = I_0 \cdot R_0 = U_1 - U_Z = U_1 - U_Z = \text{konšt.}$$

odtiaľ

$$I_0 = \frac{U_1 - U_Z}{R_0} = \text{konšt.}$$

nezávisle od R_2 . Pre $R_2 \rightarrow \infty$ je $I_2 = 0$, $I_0 = I_D$, pričom musí byť splnená požiadavka $I_D \leq I_{\max}$. Teda platí

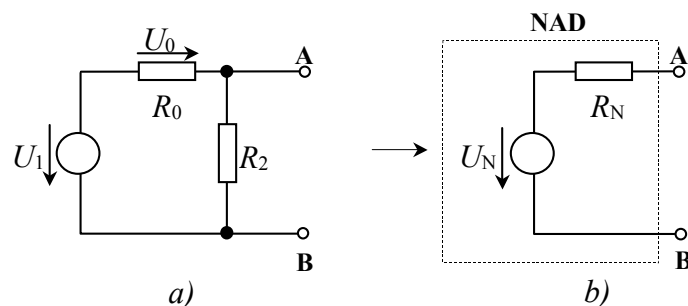
$$I_0 = \frac{U_1 - U_Z}{R_0} \leq I_{\max}$$

Tomu zodpovedá minimálna hodnota odporu $R_{0\min}$

$$R_{0\min} = \frac{U_1 - U_Z}{I_{\max}} \tag{1}$$

β) Určenie rozsahu R_2 :

Na túto časť úlohy využijeme poučku o náhradnom aktívnom dvojpóle (NAD), ktorá umožní zjednodušiť analýzu obvodu. Lineárnu časť obvodu na obr. 1 (časť obvodu bez ZD, pozri obr. 3a) nahradíme náhradným aktívnym dvojpólom podľa obr. 3b (ide o tzv. Théveninovú náhradu, NAD tvorí sériové spojenie ideálneho zdroja napätia U_N a rezistora s odporom R_N).



Obr. 3 Náhradný aktívny dvojpól: a) nahradzovaná časť obvodu, b) prvky NAD,

Napätie U_N je napätie medzi rozpojenými bodmi A-B, na obr. 3a sa určí ako napätie na rezistore R_2 . Obvod na obr. 3a je sériový delič napätia, teda

$$U_N = U_{R2} = U_1 \frac{R_2}{R_0 + R_2} = f_1(R_2)$$

Odpor R_N je odpor medzi bodmi A-B v obvode na obr. 3a, ak sa ideálny zdroj napätia U_1 nahradí bezodporovou spojkou (vnútorný odpor ideálneho zdroja napätia je nulový), teda

$$R_N = \frac{R_0 R_2}{R_0 + R_2} = f_2(R_2) \quad (2)$$

Obvod na obr. 1 možno použitím tohto náhradného aktívneho dvojpólu z hľadiska činnosti Zenerovej diódy nahradiť ekvivalentným sériovým obvodom podľa obr. 5. Pracovný bod tohto obvodu je daný priesečníkom nelineárnej VA charakteristiky diódy a VA zaťažovacej charakteristiky náhradného aktívneho dvojpólu. Pretože NAD je lineárny, lineárna je aj jeho VA charakteristika. Na jej určenie preto stačia dva body – obvykle je to tzv. bod nakrátko (body A-B na obr. 3a, resp. 3b sú spojené nakrátko bezodporovou spojkou, kedy je $U = 0, I = I_k$) a bod naprázdno (body A-B sú rozpojené, čiže $I = 0, U = U_N$).

Prúd nakrátko náhradného aktívneho dvojpólu je

$$I_k = \frac{U_N}{R_N} = U_1 \frac{R_2}{R_0 + R_2} \frac{R_0 + R_2}{R_0 \cdot R_2} = \frac{U_1}{R_0} = \text{konšt.} \quad (3)$$

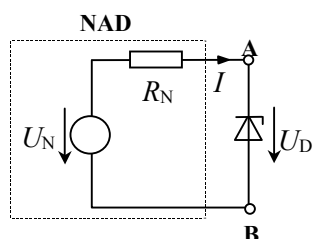
čiže nezávisí od hodnoty odporu R_2 (je to pochopiteľné, keďže v obvode podľa obr. 3a sa v stave nakrátko uvažuje bezodporová spojka zapojená paralelne k odporu R_2 , teda celý prúd zo zdroja tečie touto spojkou, bez ohľadu na hodnotu R_2).

Napätie naprázdno NAD (pre všeobecnú hodnotu R_2) je

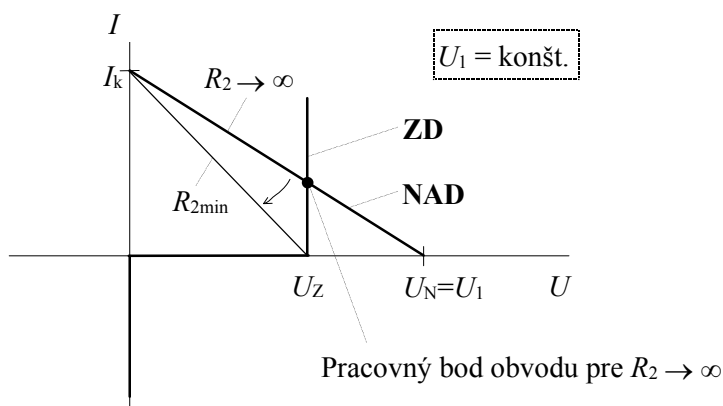
$$U_N = U_1 \frac{R_2}{R_0 + R_2} \leq U_1 \quad (4)$$

Napätie U_N závisí od napätia zdroja U_1 aj od odporov R_0 a R_2 . Pre $R_2 \rightarrow \infty$ je $U_N = U_1$.

VA charakteristiky diódy a náhradného aktívneho dvojpólu pre $R_2 \rightarrow \infty$ sú na obr. 6 vyznačené tučnou čiarou. Pri konštantných hodnotách U_1 a R_0 a pri znižovaní hodnoty R_2 znižuje sa hodnota U_N [pozri vzťah (4)], avšak hodnota I_k sa nemení [pozri vzťah (3)]. Znamená to, že so znižujúcim sa R_2 mení sa sklon zaťažovacej charakteristiky NAD (charakteristika sa otáča okolo bodu I_k na osi I v smere hodinových ručičiek).



Obr. 5 Náhradný obvod



Obr. 6 VA charakteristiky Zenerovej diódy a NAD

Z obrázka 6 vidno, že ak má byť v závislosti od R_2 napätie $U_D = U_Z = \text{konšt.}$ (pri daných hodnotách U_1 a R_0), musí byť $U_N \geq U_Z$.

Ak zvolíme určitú hodnotu napätia zdroja U_1^* , hraničnú – minimálnu hodnotu R_2 , pre ktorú ešte obvod stabilizuje, stanovíme z podmienky $U_{N\min} = U_Z$ zo vzťahu (4) (na obr. 6 ju charakterizuje priamka vymedzená bodmi $[0, I_k], [U_Z, 0]$):

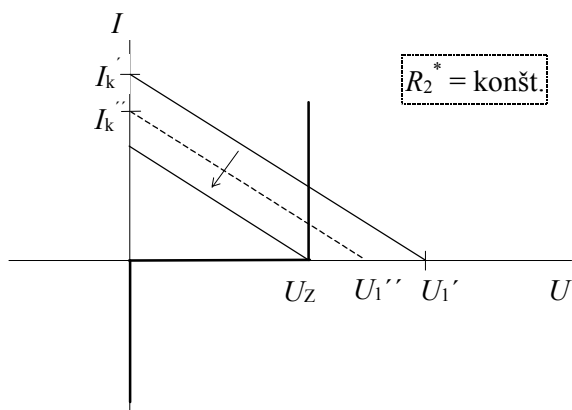
$$U_{N\min} = U_1^* \frac{R_{2\min}}{R_0 + R_{2\min}} = U_Z$$

a odtiaľ

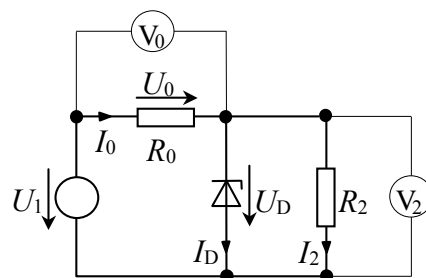
$$R_{2\min} = R_0 \frac{U_Z}{U_1^* - U_Z} \quad (5)$$

V analyzovanom prípade ide o stabilizáciu napätia U_2 pri konštantných hodnotách U_1^* a R_0 a pri premenlivom odpore R_2 .

Obvod na obr. 1 možno využiť na stabilizáciu napätia U_2 aj v inom režime: pri konštantných hodnotách R_0 a $R_2 = R_2^*$ a pri premenlivom (napr. kolísajúcom) napätí zdroja U_1 . Pri k -násobnom poklese U_1 klesne k -násobne aj prúd I_k [pozri vzťah (3)]. Znamená to, že zaťažovací charakteristika NAD sa pri poklese U_1 posúva rovnobežne nadol (obr. 7). Je zrejmé, že aj v tomto prípade, ak má obvod na obr. 1 stabilizovať napätie U_2 , musí byť $U_1 \geq U_Z$.



Obr. 7 VA charakteristiky NAD pri konštantnom odpore R_2 a premenlivom napätí zdroja U_1



Obr. 8 Merací obvod

V tomto laboratórnom cvičení overíme meraním obidva režimy stabilizátora napätia: $U_2 = f(U_1)$ pri $R_2 = \text{konšt.}$ (úloha 2b) a $U_2 = f(R_2)$ pri $U_1 = \text{konšt.}$ (úloha 2c).

Použité prístroje a zariadenia

- Zenerova dióda (napr. dióda KZ260/5V1 s katalógovými hodnotami: $U_Z = 4,8 - 5,4 \text{ V}$, $I_{\max} = 215 \text{ mA}$),
- regulovateľný zdroj jednosmerného napätia (0 – 25 V, 0 – 0,5 A),
- dva voltmetre s veľkým vnútorným odporom (napr. digitálne voltmetre),
- ohmmeter,
- súprava rezistorov.

Postup pri riešení úloh

Úloha 1

Hodnotu napätia zdroja U_1^* zvolíte z intervalu (1,5 až 2) U_Z a pre túto hodnotu určíte vpredu opísaným postupom hodnoty $R_{0\min}$ a $R_{2\min}$.

Úlohy 2a, 2b

Hoci z obsahového hľadiska sú úlohy 2a, resp. 2b dve samostatné úlohy, kvôli úspore času možno urobiť meranie oboch úloh súčasne, v zapojení podľa obrázka 8. Hodnotu R_0 zvolíte z rozsahu (1,2 až 1,5) $R_{0\min}$. Ako záťaž budete používať vhodné rezistory, napr. z radu hodnôt $R_2 = 10, 56, 100, 220, 330$,

470, 560, 680, 820 a 1000 Ω (presnejšie hodnoty použitých odporov je vhodné určiť meraním pomocou ohmmetra). V tomto obvode urobíte všetky požadované merania.

VA charakteristiku diódy (úloha 2a) a charakteristiku obvodu $U_2 = f(U_1)$ pri $R_2^* = \text{konšt.}$ (úloha 2b) budete merať súčasne (napr. pri konštantnej záťaži $R_2^* = 1\,000\ \Omega$). Napätie zdroja U_1 budete meniť v rozsahu asi od $-U_1^*$ po hodnotu $1,2 \cdot U_1^*$. Pri každej nastavenej hodnote U_1 odmeriate napätia U_0 a U_2 .

Napätie zdroja U_1 sa rovná súčtu nameraných napätí $U_0 + U_2$, napätie na dióde je $U_D = U_2$. Prúd záťaže I_2 sa určí pomocou Ohmovho zákona z nameraného napätia U_2 (pri $R_2^* = 1\,000\ \Omega$ prúd I_2 v mA sa číselne rovná údaju voltmetra V_2 vo V). Prúd I_0 sa určí pomocou Ohmovho zákona z údajov voltmetra V_0 . Prúd diódy I_D sa určí ako rozdiel prúdov $I_0 - I_2$.

Tabuľka nameraných hodnôt (prvé dva stĺpce) a vypočítaných hodnôt (posledné štyri stĺpce):

$$R_2^* = 1\,000\ \Omega$$

U_0 (V)	U_2 (V)	U_1 (V)	I_0 (A)	I_2 (A)	I_D (A)

Spracovanie a zhodnotenie výsledkov

Z údajov v tabuľke zostrojíte VA charakteristiku diódy $I_D = f(U_D)$ v priepustnom aj závernom smere a charakteristiku obvodu $U_2 = f(U_1)$ pre kladné hodnoty U_1 . Z charakteristiky obvodu $U_2 = f(U_1)$ zistíte, že obvod stabilizuje napätie na záťaži len v oblasti $U_1 > U_Z$.

Úloha 2c

V obvode na obr. 8 nastavte napätie zdroja na hodnotu U_1^* . Pri postupnej zmene hodnôt odporu R_2 od 0 do ∞ sa analogickým spôsobom ako v predchádzajúcich meraniach určia hodnoty U_2 .

Tabuľka nameraných hodnôt

$$U_1^* = \dots\dots\dots \text{ V}$$

R_2 (Ω)	U_2 (V)

Spracovanie a zhodnotenie výsledkov

Z údajov v tabuľke zostrojíte charakteristiku $U_2 = f(R_2)$ pri $U_1^* = \text{konšt.}$ Z charakteristiky zistíte, že pri znižovaní odporu R_2 (pri hodnotách blížiacich sa k $R_{2\text{min}}$) obvod prestáva plniť funkciu stabilizátora napätia.

Poznámky

1. Hodnoty odporov $R_2 < R_{2\text{min}}$ (vrátane skratu, t. j. $R_2 = 0$) nie sú nebezpečné ani pre zdroj U_1 (prúd zdroja I_0 je obmedzený odporom R_0), ani pre ZD (pri $R_2 = 0$ je $U_D = 0$, a teda aj $I_D = 0$).
2. Keďže skutočná VA charakteristika ZD nie je ideálna (napätie U_D v Zenerovej oblasti nie je konštantné, ale mení sa v určitom malom rozsahu ΔU_Z), nie je presne konštantné ani napätie $U_2 = U_D$ stabilizátora napätia.

Literatúra

[1] ŠUMICHRASŤ E. A KOL.: Teoretická elektrotechnika. Návody na laboratórne cvičenia z Teórie obvodov. Bratislava, Alfa, 2003, s. 5 – 12

[2] BENDA, O., HANAĽKOVÁ, D., HEGYI, S.: Základy elektrotechniky. Bratislava, Alfa, 1990