Martin Beránek, 2.F, X–11

Úloha 5 – Měření osciloskopem

Pracovní úkol:

1. Pomocí osciloskopu změřte špičkovou hodnotu napětí na sekundáru převodního transformátoru a porovnejte ji s hodnotou naměřenou voltmetrem.
2. Podle vlastní volby sledujte činnost jednocestného nebo dvoucestného usměrňovače s křemíkovými diodami KY711
   a. Při maximální hodnotě zatěžovacího odporu 10 kΩ sledujte závislost stejnosměrného napětí na filtrační kapacitě C v intervalu 0–10 μF. Hodnotu usměrněného napětí při $C = 0\,\mu\mathrm{F}$ srovnejte se špičkovou hodnotou pulzního průběhu.
   b. Změřte závislost filtrační kapacity C, potřebné k tomu, aby střídavá složka usměrněného napětí tvořila 10% špičkové hodnoty (tj. asi 1 V), na odebíraném proudu. U jednocestného usměrňovače měřte do proudu 0,6 mA, u dvoucestného do proudu 1 mA.
   c. Naměřené závislosti zpracujte graficky. Do grafu uvádějícího závislost filtrační kapacity C na proudu vyneste také závislost časové konstanty $\tau = R_z C$ na proudu.
3. Charakteristiku vakuové diody EZ81 a Zenerovy diody KZ703 zobrazte na osciloskopu podle schématu připojeného k úloze. Orientačně načrtněte pozorované charakteristiky a vyznačte měřítka na osách. Odhadněte napětí na diodách při proudu 20 mA v propustném směru. Určete Zenerovo napětí.

Teorie: Voltmetr nastavený na měření střídavého napětí udává efektivní hodnotu napětí. Ta se z průběhu okamžité hodnoty napětí určí vztahem (viz [1], str. 31)

$$U_{\mathrm{ef}}^2 = \frac{1}{T}\int_0^T u^2(t)\,\mathrm{d}t\,. \tag{1}$$

Na výstupu transformátoru by v ideálním případě mělo být harmonické napětí $u(t) = U_0 \sin(\omega t + \phi)$. Podle vztahu (1) pak vychází efektivní hodnota napětí

$$U_{\mathrm{ef}} = \frac{U_0}{\sqrt{2}}\,. \tag{2}$$

V dalších částech úlohy měřím napětí pomocí voltmetru nastavěného na stejnosměrné napětí (tj. bez usměrňovače). Pokud se hodnota okamžitého napětí mění dostatečně rychle, ukáže přístroj konstantní hodnotu i v případě, že $u(t)$ konstantní není. Pak je ukázaná hodnota střední hodnotou napětí ([1], str. 31) podle vztahu

$$U_{\mathrm{ss}} = \frac{1}{T}\int_0^T u(t)\,\mathrm{d}t\,. \tag{3}$$

Používám jednosměrné usměrnění (pomocí jedné diody), kdy průběh výstupního napětí odpovídá polovině sinusoidy, tedy v jedné půlperiodě platí $u(t) = U_0 \sin(\omega t)$ a v druhé $u(t) = 0$. Pak pro střední hodnotu napětí vyjde

$$U_{\mathrm{ss}} = \frac{U_0}{\pi}\,. \tag{4}$$

Stejné vztahy platí pro závislost maximální, efektivní a střední hodnoty protékajícího proudu.

Dále do obvodu usměrňovače zapojím paralelně kondenzátor. Ten se během náběhu napětí na svorkách zdroje nabije a když napětí zdroje poklesne, začne se vybíjet přes zatěžovací odpor R_z. Vybíjecí křivka kondenzátoru je dána vztahem

$$u(t) = U_{\max} \cdot \exp\left(-\frac{t}{R_z C}\right)\,, \tag{5}$$

kde $U_{\max}$ je maximální hodnota napětí, na kterou se kondenzátor nabije. Nabíjení kondenzátoru probíhá přes vnitřní odpor zdroje (a případný ochranný odpor) o celkové velikosti R. Teto odpor musí být menší než zatěžovací odpor R_z. Výpočet průběhu napětí na kondenzátoru se dá zjednodušit při jistých zanedbáních. Budu předpokládat, že doba nabíjení kondenzátoru je zanedbatelně malá a také že změna napětí mezi dvěma pulsy je dostatečně malá (tedy časová konstanta vybíjení je podstatně delší než perioda T). Pak bude platit $U_{\max} = U_0$ a následně bude po dobu T probíhat vybíjení podle vztahu (5). Ten mohu ještě zjednodušit tím, že exponenciálu nahradím prvními členy Taylorova rozvoje. Potom získám vztah pro napětí na kondenzátoru během jedné periody

$$u(t) = U_0 \left(1 - \frac{t}{R_z C}\right) . \tag{6}$$

Z pro střední hodnotu měřeného napětí při průběhu podle vztahu (6) platí

$$U_{ss} = U_0 \left(1 - \frac{T}{2R_z C}\right) . \tag{7}$$

Kvalitu filtrace mohu vyjádřit pomocí filtračního činitele k_f ([1], str. 34), pro který platí vztah

$$k_f = \frac{U_0}{\Delta U} , \tag{8}$$

kde ΔU je rozdíl maximální a minimální hodnoty okamžitého napětí po filtraci a U_0 maximální hodnota napětí. V případě zde probírané metody filtrace platí za výše zmíněných zanedbání

$$\Delta U = U_0 \frac{T}{R_z C} \qquad \text{a} \qquad k_f = \frac{R_z C}{T} . \tag{9) a (10}$$

Pokud je činitel filtrace řádově větší než jedna, mohu předpokládat, že po filtraci platí $U_{ss} = U_0$.

Hodnotu kapacity potřebnou k dosažení požadované kvality filtrace při daném odebíraném proudu mohu za předpokladu, že $k_f \gg 1$, spočítat ze vztahu (10), protože přibližně platí $R_z = U_0/I_{ss}$.

$$C = \frac{k_f I_{ss} T}{U_0} = \frac{T}{\Delta U} I_{ss} . \tag{11}$$

MĚŘENÍ: V prvním úkolu jsme měřil napětí na svorkách transformátoru. Chyba použitého voltmetru je ±0,5% naměřené hodnoty a ±0,1 V. Naměřená hodnota napětí

$$U_V = (6{,}2 \pm 0{,}1)\,\mathrm{V} .$$

Pomocí osciloskopu jsme zjistil špičkovou hodnotu napětí

$$U_0 = (8{,}5 \pm 0{,}3)\,\mathrm{V} .$$

Chybu odhaduji hlavně ze šířky stopy na osciloskopu a z přesnosti stupnic. Teoretický vztah mezi napětím určeným voltmetrem a osciloskopem (2) sice v rámci chyby vychází, ale průběh napětí na svorkách transformátoru nebyl harmonický (poblíž amplitudy dochází k magnetickému nasycení jádra cívky a křivka je více zploštělá než sinusoida), takže podmínky pro platnost vztahu (2) nebyly přesně splněny.

Perioda napětí

$$T = (20{,}0 \pm 0{,}5)\,\mathrm{ms}$$

podle stopy na osciloskopu.

Dále jsme sestavil jednocestný usměrňovač s diodou KY 711 a k zátěži paralelně zapojenou kapacitní dekádou s nastavitelnou hodnotou kapacity C. Zátěží byl odpor $R_z = 10\,\mathrm{k\Omega}$. Zjišťoval jsem hodnotu napětí ukázanou voltmetrem (střední hodnotu) při různých hodnotách C.

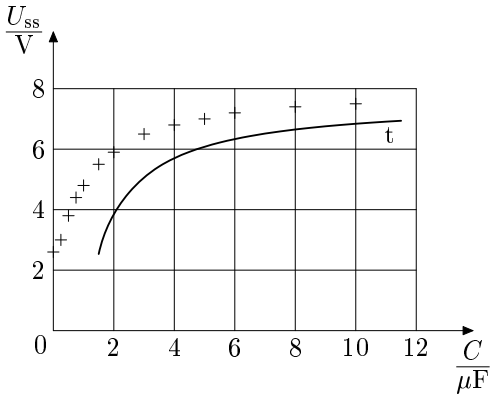
Vzhledem k zapojení diody byla v tomto případě amplituda napětí nižší

$$U_0 = (7{,}6 \pm 0{,}3)\,\mathrm{V} .$$

Napětí na zátěži U_{ss} v závislosti na kapacitě dekády C je v tabulce 1. Odchylka napětí je ±0,1 V a odchylka kapacity je vzhledem k přesnosti ostatních údajů zanedbatelná (na dekádě je uváděna přesnost ±0,5%).

C [μF]	0	0,25	0,5	0,75	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10
U_{ss} [V]	2,6	3,0	3,8	4,4	4,8	5,5	5,9	6,5	6,8	7,0	7,2	7,4	7,5

Tabulka 1



Graf 1

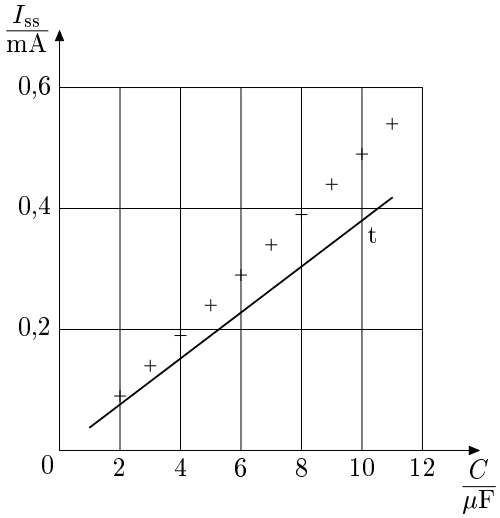
Hodnoty z tabulky jsou vyneseny do grafu 1 spolu s teoreticky odvozenou křivkou podle vztahu (7) – je označena „t“.

Dále jsem měřil závislost mezi filtrační kapacitou C na odebíraným proudu I_{ss} za podmínky, že $k_f = 10$. Obvod byl zapojen stejně jako v předchozím měření, takže $U_0 = (7{,}6 \pm 0{,}3)$ V. Podle požadované hodnoty k_f budu nastavovat parametry obvodu tak, aby hodnota ΔU odečítaná na osciloskopu byla 0,76 V. Pro nastavenou hodnotu C jsme pak odečítal proud tekoucí vzorkem. Naměřené hodnoty včetně použitého odporu zátěže jsou v tabulce 2.

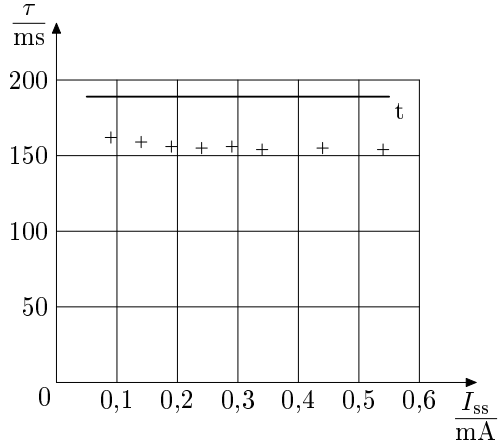
C [μF]	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
R_z [kΩ]	81,0	53,0	39,0	31,0	26,0	22,0	19,3	17,2	15,5	14,0
I_{ss} [mA]	0,09	0,14	0,19	0,24	0,29	0,34	0,39	0,44	0,49	0,54

Tabulka 2

V grafu 2 je zobrazena naměřená a teoretická (označena „t“) závislost mezi kapacitou a odebíraným proudem. V grafu 3 jsou naměřené hodnoty časové konstanty vybíjení kondenzátoru R_zC a teoretická hodnota (označená stejně jako u předchozího grafu).

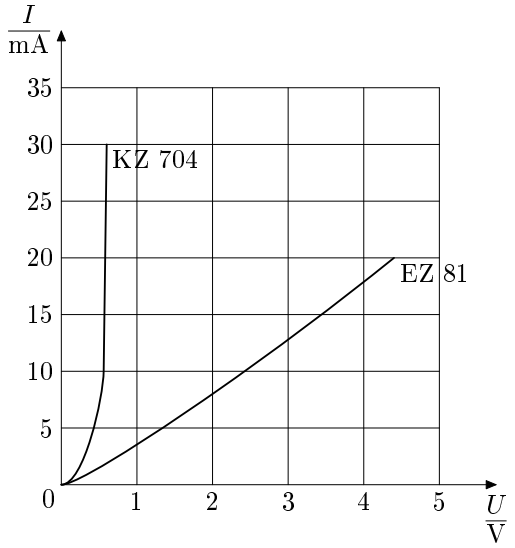


Graf 2

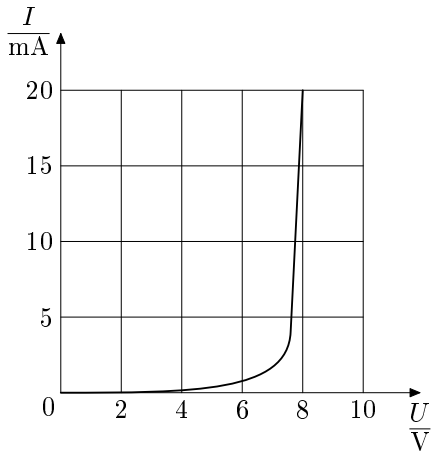


Graf 3

Jako poslední úlohu jsem měřil voltampérovou charakteristiku vakuové diody EZ 81 a Zenerovy diody KZ 704. Dioda byla připojeny na střídavé napětí v sérii spolu s referenčním odporem. Napětí na diodě a napětí na odporu jsem zobrazil na dvou osách osciloskopu. Vzhledem k tomu, že VA charakteristika odporu je lineární, zobrazovala jedna osa (po patřičném přepočítaní měřítka) proud tekoucí diodou a druhá napětí na diodě. Přibližné závislosti odečtené z osciloskopu jsou uvedeny v grafu 4 (charakteristika v propustném směru), proud tekoucí v závěrném směru byl v rámci přesnosti měření nulový a v grafu 5 je uvedena charakteristika Zenerovy diody v závěrném směru. Hledal jsem napětí, při kterém teče diodou proud $I = 20\,\mathrm{mA}$. Pro EZ 81 je to $U_1 = (4{,}4 \pm 0{,}2)\,\mathrm{V}$ a pro diodu KZ 704 $U_2 = (0{,}58 \pm 0{,}02)\,\mathrm{V}$. Přesnost určení tekoucího proudu byla v řádu $\pm 1\,\mathrm{mA}$. Zenerovo napětí je podle grafu $U_\mathrm{Z} = (7{,}5 \pm 0{,}3)\,\mathrm{V}$.



Graf 4



Graf 5

Diskuze: Napětí na svorkách transformátoru nemá přesně harmonický průběh. V okolí amplitudy roste kvůli magnetickému nasycení jádra cívky pomaleji, než by odpovídalo harmonickému průběhu. Pokud tedy budu brát zjištěnou amplitudu a počítat střední a efektivní hodnoty z předpokladu sinusového průběhu, dopustím se systematické chyby a vyjde mi nižší hodnota než jaká je ve skutečnosti. Ale protože nemám k dispozici žádný lepší model, použil jsem v teoretických odvození předpoklad harmonického průběhu napětí.

Tuto odchylku je vidět u výsledku prvního měření nebo při zapojení usměrňovače s nulovou kapacitou C. Údaj na voltmetru je vyšší než hodnota spočítaná z amplitudy podle vztahu (2), resp. (4).

Při měření střední hodnoty usměrněného napětí v závislosti na kapacitě v usměrňovači jsem získal vyšší hodnoty, než jaké plynou ze vztahu (7). Mimo vlivu výše popsaných skutečností se zde projeví i fakt, že vztah (7) je odvozen za předpokladu použití lineární aproximace vybíjecí křivky a za předpokladu, že se kondenzátor nabije v jednom okamžiku na maximální hodnotu a následně se už jen vybíjí. Tyto aproximace zde ale způsobí velkou odchylku, protože časová konstanta vybíjení kondenzátoru je srovnatelná s periodou. Hodnotu integrálu (a tedy i střední hodnoty napětí) dále zvýší to, že nabíjení probíhá postupně po delší dobu.

Při měření závislosti kapacity C a odebíraného proudu I_ss při daném $k_\mathrm{f} = 10$ jsem získal lineární závislost, která odpovídá teoretickému výsledku (11), ale změřená směrnice se od teoretické liší. Naměřená střední hodnota proudu je vyšší než teoreticky určená.

Voltampérová charakteristika vakuové diody jde aproximovat vztahem $I = kU^{3/2}$. Graf 4 tomu nijak znatelně neodporuje. Pro přesnější posouzení by tento graf musel být zaznamenán lépe než přibližným překreslením z obrazovky osciloskopu. Naměřená charakteristika polovodičové diody odpovídá tomu, jak by se měla chovat podle teoretických závěrů.

ZÁVĚR: Naměřené charakteristiky usměrňovače se liší od teoretických předpovědím hlavě proto, že aproximovaný model použitý v teoretických odvozeních nevystihuje dostatečně přesně měřený obvod. Rozdíly odpovídají zanedbaným skutečnostem.

Získané voltampérové charakteristiky diod odpovídají tomu, jak by se měly diody daného typu teoreticky chovat. Zjistil jsem Zenerovo napětí diody KZ 704 $U_Z = (7{,}5 \pm 0{,}3)$ V. Proud $I = 20$ mA teče diodou EZ 81 při napětí $U_1 = (4{,}4 \pm 0{,}2)$ V a diodu KZ 704 při $U_2 = (0{,}58 \pm 0{,}02)$ V. Chyby těchto údajů pouze odhaduji, protože neznám přesnost osciloskopu.

LITERATURA:

[1] R. Bakule, J. Šternberk: Fyzikální praktikum II. SPN, Praha 1989