

OSTRAVSKÁ UNIVERZITA V OSTRAVĚ
Přírodovědecká fakulta

FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM 2

František Karlický – Daniel Hrivňák
Vladimír Lysenko



Ostrava 2010

Název: **Fyzikální praktikum 2**
Autoři: **Mgr. František Karlický, Ph.D.,
Mgr. Daniel Hrivňák, Ph.D.,
Doc. Ing. Vladimír Lysenko, CSc.**
Recenzent: **Mgr. Petr Jandačka, Ph.D.**
Vydání: První, 2010
Počet stran: 53
Vydavatel: Ostravská univerzita v Ostravě

© **Mgr. František Karlický, Ph.D., Mgr. Daniel Hrivňák, Ph.D.,
Doc. Ing. Vladimír Lysenko, CSc.**
© Ostravská univerzita v Ostravě

ISBN 978-80-7368-720-5

Obsah

Obsah.....	3
Úvod	5
1. Měření průběhu pole v elektrolytické vaně	7
2. Měření vlastností reálných zdrojů a rezistorů	11
3. Měření V-A charakteristik jednobranů	15
4. Přejchodové jevy v obvodech s kapacitoy	19
5. Přejchodové jevy v obvodech s induktory	23
6. Tlumené kmity v RLC obvodu	29
7. Základní osciloskopická měření	33
8. Měření kapacit a indukčností.....	37
9. Usměrnění a vyhlazení střídavého proudu	41
10. Vyšetření magnetického pole v okolí magnetů	45
11. Měření na jednofázovém transformátoru.....	47
12. Měření magnetického momentu a magnetizace.....	51
Literatura	53

Úvod

Toto skriptum je určeno studentům fyzikálních oborů přírodovědeckých fakult. Obsahuje 12 inovovaných praktických úloh, které autoři skripta v posledních asi 15 letech postupně navrhli, sestavili a používali pro praktikum z elektřiny a magnetizmu vyučovaného pod názvem Fyzikální praktikum 2 na Katedře fyziky Přírodovědecké fakulty Ostravské Univerzity v Ostravě. Jsou zahrnuty úlohy, které čtenáři umožní prakticky ověřit si znalosti získané z přednášek a upevňované semináři, a to v oblastech elektrostatiky, stacionárního elektrického pole, vedení proudu v látkách, nestacionárních obvodů, střídavého proudu a magnetismu. Každá kapitola má pro snadnou orientaci strukturovaný obsah rozdělený na Úkoly, Pojmy k zapamatování, Uspořádání pracoviště, Pomůcky, Teorie, Postup práce, Výstupy a Kontrolní otázky. V pěti úlohách je pro názornost využito měřicích systémů ISES a IP Coach a vyhodnocení je provedeno na počítači.

Červen 2010, Ostrava

Autoři

1. Měření průběhu pole v elektrolytické vaně

Úkoly

- 1) Připravte elektrolytickou vanu pro měření a zapojte obvod dle schématu.
- 2) Prověřte, zda mezi elektrodami je přibližně homogenní pole.
- 3) Vkládejte do prostoru mezi elektrodami vybrané předměty. Nalezněte pro každé uspořádání několik ekvipotenciál o dané hodnotě potenciálu.
- 4) Na základě naměřených ekvipotenciál nakreslete přibližný průběh vybraných siločar pole vektoru elektrické intenzity.
- 5) Na každém náčrtu průběhu pole nalezněte takové dva uzlové body sítě ekvipotenciál a siločar, mezi kterými je intenzita pole a) maximální a b) minimální.
- 6) Vysvětlete kvalitativně pozorované průběhy a zobecněte získané poznatky.

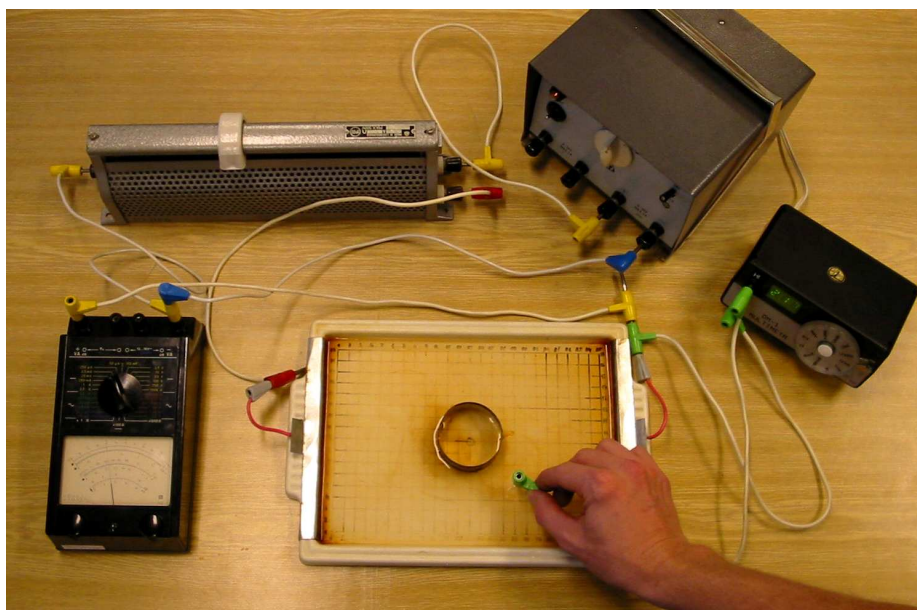


Pojmy k zapamatování

Elektrolytická vana, elektroda, elektrické pole, siločára, ekvipotenciála.



Uspořádání pracoviště



Pomůcky

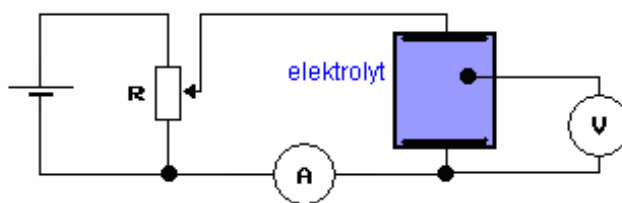
Regulovatelný zdroj stejnosměrného napětí, reostat $100 \Omega / 1 A$, digitální voltmetr, ampérmetr, elektrolytická vana, voda (elektrolyt), vodivá tělesa, čtverečkový papír.

Teorie

Schéma zapojení elektrolytické vany pro měření průběhu elektrického pole v ní ukazuje obrázek 1.1.



Ekvipotenciála je křivka spojující místa stejného potenciálu. Siločára je křivka, jejíž tečna v každém bodě je rovnoběžná se směrem vektoru elektrické intenzity. Siločáry jsou ve stacionárním poli kolmé k ekvipotenciálám.

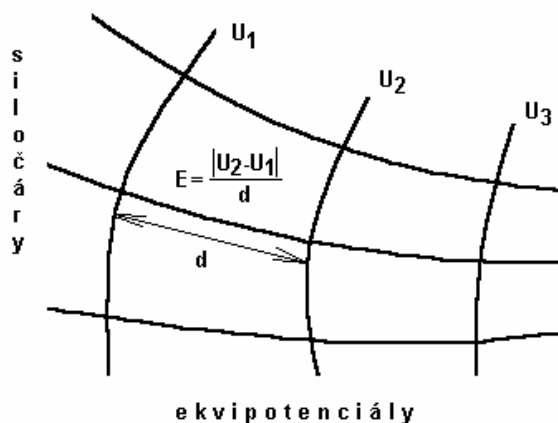


Obr. 1.1

K výpočtu velikosti intenzity elektrického pole je možné použít přibližný vztah

$$|\vec{E}| \sim \frac{|U|}{d},$$

kde d je vzdálenost dvou bodů a U elektrické napětí mezi nimi (předpokládá se přibližně homogenní pole mezi zmíněnými body).



Obr. 1.2

Postup práce



- 1) Nalijte do vaničky přiměřené množství vody (hloubka 5 až 8 mm) a zapojte elektrický obvod podle schématu. Zdroj, popř. reostat nastavte tak, aby napětí přiváděné na elektrody vany bylo cca 5 V (napětí zkontrolujte volnou sondou voltmetru, kterou přiložíte na druhou elektrodu vany) a proud procházející obvodem by měl být přibližně v jednotkách mA. Vypočítejte ohmický odpor elektrolytu.
- 2) Měření napětí v daném bodě elektrolytické vany se provede zapíchnutím měřicí sondy kolmo do elektrolytu a odečtením příslušného napětí. Ekvipotenciálu, příslušnou určitému napětí U , nalezněte tak, že náhodnými pokusy nejprve získejte bod o zvoleném napětí a pak hledejte v jeho okolí další body se stejnou hodnotou napětí. Všechny nalezené body zakreslujte do náčrtku na čtverečkový papír s vyznačením příslušné hodnoty napětí a poté body se stejným napětím spojte křivkou (ekvipotenciálou). Počet ekvipotenciál a jejich napětí volte vhodně podle potřeby, aby výsledek dával dobrou představu o průběhu pole. Pro ověření homogenity pole je vhodné volit ekvipotenciály o hodnotách 1 V, 2 V,

3 V a 4 V, pomocí souřadnicových os na dně vany (s jednotkou 1 cm) zjistit vzdálenosti jednotlivých ekvipotenciál a vypočítat intenzitu pole.

- 3) Ponořte do elektrolytu postupně vybraná vodivá tělesa. Zakreslete pečlivě jejich polohu do náčrtku, neboť jejich profil představuje jednu z hledaných ekvipotenciál. Změřením napětí na těchto vodičích dostanete napětí této ekvipotenciály. Další ekvipotenciály hledejte nejlépe v pořadí od nejbližších k vodiči ke vzdálenějším, přičemž napěťový rozstup volte dle potřeby. Nezapomeňte proměřit také oblast uvnitř vodičů.
- 4) Nakreslete do náčrtku elektrické siločáry. Siločáry jsou kolmé k ekvipotenciálám, volte jejich počet a polohu tak, aby výsledný obrázek byl přehledný (nejlépe aby síť siločar a ekvipotenciál byla přibližně "čtverečková"). Postup je zřejmý z obrázku 1.2.
- 5) Na každém náčrtu vyznačte oblast maximální a minimální intenzity elektrického pole.

Výstupy

- 1) Náčrt průběhu ekvipotenciál a siločar přibližně homogenního pole mezi elektrodami.
- 2) Náčrt průběhu ekvipotenciál a siločar pro každé zkoumané vodivé těleso.
- 3) Písemná odpověď na následující otázky: Mají siločáry tendenci „vyhýbat“ se vloženému vodivému tělesu nebo se naopak k němu stáčíjí? Jaká je intenzita pole uvnitř vodičů v porovnání s intenzitou pole vně vodičů?



Kontrolní otázky

- 1) Popište zařízení zvané elektrolytická vana.
- 2) Vysvětlete pojem siločáry elektrického pole.
- 3) Vysvětlete pojem ekvipotenciály elektrického pole.
- 4) Jaký je vztah mezi siločárou a ekvipotenciálou stacionárního elektrického pole?
- 5) Jaký přibližný vztah použijete pro výpočet velikosti intenzity elektrického pole, znáte-li průběh ekvipotenciál?
- 6) Co se děje s volně pohyblivými náboji ponořeného vodiče? Kde se hromadí jaký náboj?



2. Měření vlastností reálných zdrojů a rezistorů

Úkoly

A. Měření vlastností zdrojů.

- 1) Sestavte obvod pro měření zatěžovací charakteristiky napěťového zdroje.
- 2) Změřte zatěžovací charakteristiky vybraných zdrojů. Získané průběhy vykreslete do grafů.
- 3) Z naměřených výsledků určete elektromotorická napětí, vnitřní odpory vybraných zdrojů a chyby měření.
- 4) Stanovte pořadí jednotlivých zdrojů podle jejich "tvrdosti".



B. Měření vlastností rezistorů.

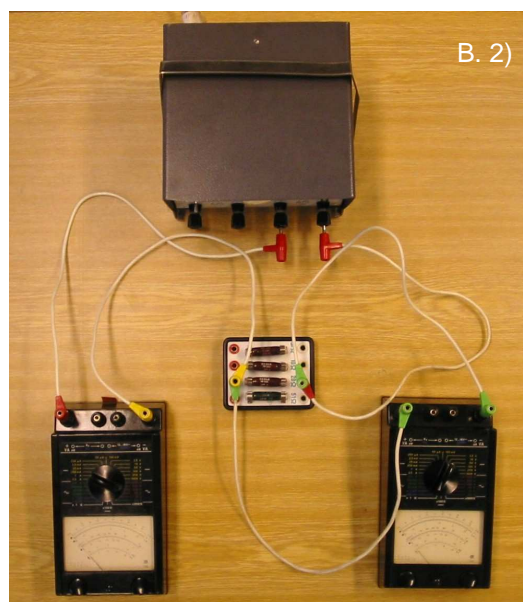
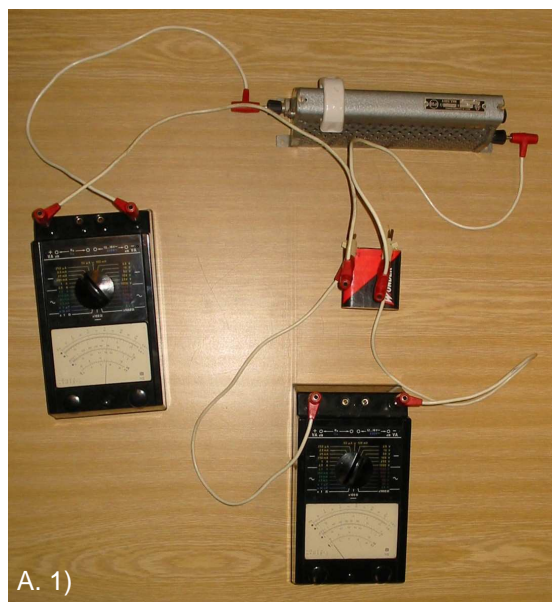
- 1) Změřte rezistanci (ohmický odpor) vybraných rezistorů ohmmetrem.
- 2) Změřte rezistanci vybraných rezistorů nepřímou metodou (pomocí voltmetru a ampérmetru). Diskutujte možné způsoby zapojení voltmetru a ampérmetru do obvodu.
- 3) Výsledky zapište přehledně do tabulky a vyhodnoťte chyby měření.

Pojmy k zapamatování

Napěťový zdroj, charakteristika napěťového zdroje, elektromotorické napětí, vnitřní odpor zdroje, tvrdost zdroje, rezistor, rezistance (ohmický odpor), ampérmetr, voltmetr, multimetr.



Uspořádání pracoviště



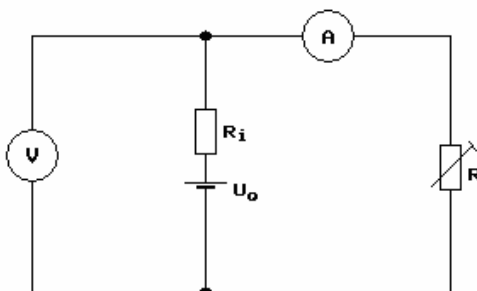
Pomůcky

Zdroj stejnosměrného napětí/proudu, reostat $200 \Omega / 0,6 \text{ A}$, 2x multimetr, 4 baterie (1,5 V, 3 V, 4,5 V, 9 V), 3 proměřované rezistory (5,1 Ω , 51 Ω , 82 k Ω).

Teorie

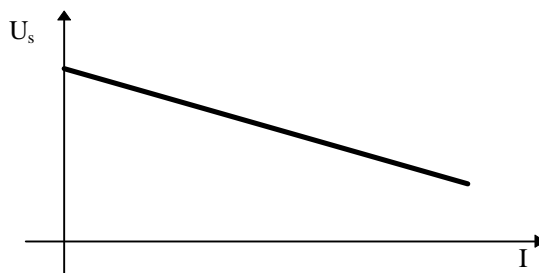


A. Schéma zapojení pro měření zatěžovacích charakteristik zdrojů je na obrázku 2.1. Volbou odporu R ovlivňujeme odebíraný proud.



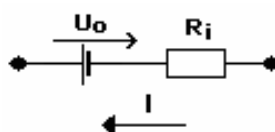
Obr. 2.1

Zatěžovací charakteristikou napěťového zdroje rozumíme závislost napětí na svorkách zdroje (tzv. svorkového napětí) U_s na odebíraném proudu I . Typický průběh je na obrázku 2.2.



Obr. 2.2

Reálný zdroj napětí modelujeme tzv. náhradním schématem, tvořeným sériovým zapojením ideálního napěťového zdroje o napětí U_0 , tzv. elektromotorickém napětí, a rezistoru o odporu R_i , tzv. vnitřního odporu zdroje, jak ukazuje obrázek 2.3.



Obr. 2.3

Zatěžovací charakteristikou je pak přímka, daná rovnicí

$$U_s = U_0 - R_i I.$$

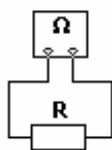
Napětí U_0 určíme jako *napětí naprázdno*, tzn. nezatíženého zdroje ($I = 0$). Vnitřní odpor R_i vypočteme nejlépe ze dvou bodů zatěžovací charakteristiky jako poměr

$$R_i = -\frac{U_{s2} - U_{s1}}{I_2 - I_1}.$$

Chybu měření vyhodnotíme jako chybu nepřímého měření z chyb přímo měřených napětí a proudů. Chyby přístrojů, kterými jsme napětí a proudy měřili, zjistíme z návodů k nim nebo z jejich třídy přesnosti.

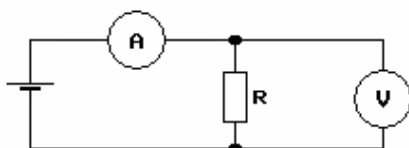
Tvrdým zdrojem napětí nazýváme zdroj s malým vnitřním odporem (řádově jednotky Ω), *měkkým zdrojem* napětí zdroj s velkým vnitřním odporem (řádově stovky Ω).

B. Schéma zapojení pro přímé měření rezistance ohmmetrem je na obrázku 2.4.



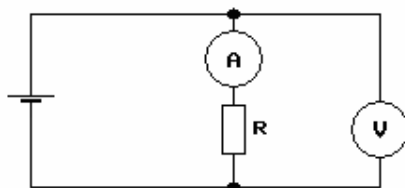
Obr. 2.4

Schéma zapojení pro nepřímé měření rezistance v případě “malé” hodnoty R , která je mnohem menší než vnitřní odpor voltmetru je na obrázku 2.5.



Obr. 2.5

V případě “velké” hodnoty odporu R , tzn. mnohem větší než vnitřní odpor ampérmetru, je nutno obvod zapojit podle odlišného schématu (obrázek 2.6).



Obr. 2.6

Je nutné pečlivě uvážit (a ověřit chováním obvodu - jak?), které schéma je pro daný rezistor správné. Jinak se můžeme dopustit velké chyby metody.

Známe-li proud I , tekoucí ohmickým odporem a napětí U na něm, pak jeho rezistanci vypočteme podle vztahu

$$R = \frac{U}{I}.$$

Chybu měření vyhodnotíme podobně jako v případě měření vlastností zdrojů.

Postup práce

A) Měření vlastností zdrojů.

- 1) Sestavte obvod pro měření zatěžovací charakteristiky napěťového zdroje podle obrázku 2.1.
- 2) Změřte zatěžovací charakteristiky připravených zdrojů (baterií). Každou charakteristiku zkonstruujte minimálně z pěti bodů. Získané průběhy vynesete do grafu a body proložte přímkou.



- 3) Z naměřených výsledků určete elektromotorická napětí, vnitřní odpory vybraných zdrojů a chyby měření uvedených veličin.
- 4) Stanovte pořadí jednotlivých zdrojů podle jejich "tvrdosti".

B) Měření vlastností rezistorů.

- 1) Změřte rezistanci vybraných rezistorů ohmmetrem podle schématu na obrázku 2.4.
- 2) Zapojte obvod podle schématu na obrázku 2.5, resp. 2.6. Změřte rezistanci připravených rezistorů nepřímou metodou (pomocí voltmetru a ampérmetru). Diskutujte možné způsoby zapojení voltmetru a ampérmetru do obvodu.
- 3) Výsledky запиšte přehledně do tabulky a vyhodnoťte chyby měření.
- 4) Vypracujte protokol o měření splňující všechny náležitosti dané vedoucím praktika.

Výstupy



- 1) Tabulky naměřených hodnot.
- 2) Grafy zatěžovacích charakteristik proměřených napěťových zdrojů (baterií).
- 3) Tabulka vypočtených hodnot elektromotorických napětí a vnitřních odporů proměřených napěťových zdrojů včetně chyb jednotlivých údajů. Minimálně jeden podrobný příklad výpočtu uvedených veličin.
- 4) Tabulka naměřených a vypočtených hodnot rezistancí proměřených rezistorů včetně chyb jednotlivých údajů. Minimálně jeden podrobný příklad výpočtu uvedených veličin.

Kontrolní otázky



- 1) Co je to zatěžovací charakteristika napěťového zdroje?
- 2) Jak vypadá náhradní schéma reálného napěťového zdroje?
- 3) Co znamenají pojmy tvrdý a měkký zdroj?
- 4) Jak se dá měřit rezistance pomocí voltmetru a ampérmetru? Proč je schéma tohoto měření odlišné pro malé a velké hodnoty měřené rezistance?

3. Měření V-A charakteristik jednobranů

Úkoly

- 1) Sestavte obvod pro měření voltampérové charakteristiky jednobranů.
- 2) Změřte voltampérovou charakteristiku žárovky, odporu, termistoru, křemíkové diody, LED diody a Zenerovy diody v propustném i závěrném směru.
- 3) Získané průběhy vykreslete do grafu. U obou diod určete hodnoty prahových napětí a diferenciálních odporů v propustném i závěrném směru.

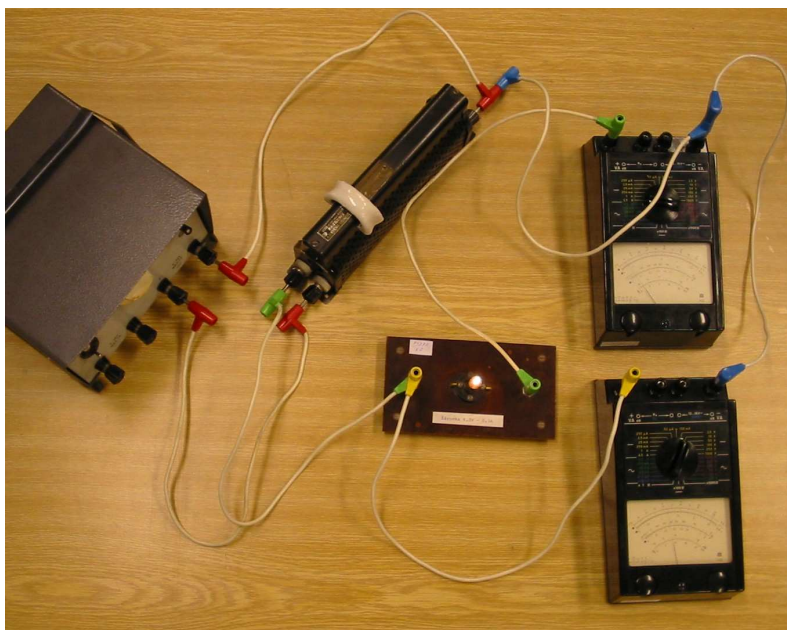


Pojmy k zapamatování

Jednobran, voltampérová charakteristika, dioda, Zenerova dioda, propustný a závěrný směr, prahové napětí, diferenciální odpor.



Uspořádání pracoviště



Pomůcky

Zdroj stejnosměrného napětí, 2x multimetr, 2x reostat $40\ \Omega / 1,5\ \text{A}$ (jednou použitý jako předřadný odpor), žárovka, rezistor, termistorem, křemíková dioda, LED dioda, Zenerova dioda.

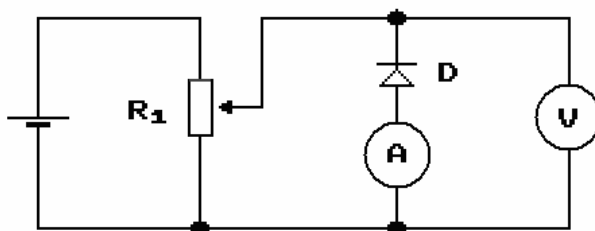
Teorie

Voltampérovou (V-A) charakteristikou jednobranu rozumíme vztah mezi napětím U na tomto jednobranu a proudem I , který jím protéká. Manuální měření V-A charakteristiky probíhá tak, že měníme jednu z těchto veličin a odečítáme hodnotu druhé veličiny. Schéma zapojení pro měření V-A charakteristiky obecného jednobranu má dvě alternativy.

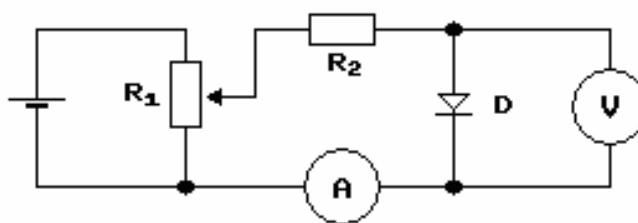


Pro velké odpory, mnohokrát větší než vnitřní odpor ampérmetru, musíme použít schéma obrázku 3.1. V případě malého ohmického odporu měřeného prvku v porovnání s vnitřním

odporem voltmetru použijeme odlišné schéma (např. pro diodu zapojenou v propustném směru; obrázek 3.2).



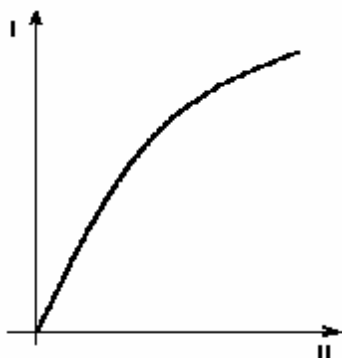
Obr. 3.1



Obr. 3.2

Nesprávnou volbou schématu můžeme způsobit velkou chybu metody. V obou případech je odpor R_1 zapojen jako potenciometr (dělič napětí) a slouží k plynulé regulaci odebíraného napětí. Odpor R_2 je tzv. *předřadný odpor* a slouží jako ochrana obvodu proti proudovému přetížení.

Typická V-A charakteristika žárovky je na obrázku 3.3. S rostoucím proudem se wolframové vlákno žárovky zahřívá a jeho odpor se zvyšuje, proto se křivka stáčí k ose napětí. Termistor má podobné chování jako žárovka.



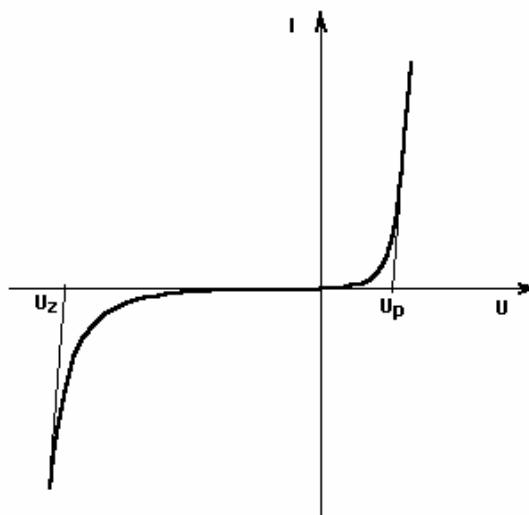
Obr. 3.3

Typická V-A charakteristika polovodičové diody má následující průběh (viz též obrázek 3.4). V propustném směru roste proud zpočátku velmi pomalu, ale od hodnoty tzv. *prahového napětí* U_p (kolem 1 V) dochází k prudkému nárůstu proudu, dioda se "otevře". V závěrném směru je chování podobné, zpočátku je proud nepatrný (řádově μA), ale po dosažení tzv. *průrazného napětí* (typická hodnota 10 V) dojde k prudkému vzrůstu vodivosti a následně proudu protékajícího diodou, který ji zničí. U Zenerovy diody se jedná o vratný děj, dioda funguje i po průrazu a průrazné napětí se značí U_z (Zenerovo). Hodnoty prahových napětí a

diferenciálních odporů diod se dají zjistit proložením asymptoty k V-A charakteristice v oblasti po průrazu (obrázek 3.4). Prahovou hodnotou napětí je napětí dané průsečíkem této přímky s osou napětí, diferenciálním odporem pak její směrnice. Matematicky je diferenciální odpor určen vztahem

$$R_d = \frac{dU}{dI}$$

a je funkcí napětí (proudu).



Obr. 3.4

Postup práce

- 1) Sestavte obvod pro měření voltampérové charakteristiky jednobranů podle schématu na obrázku 1 proměřte voltampérovou charakteristiku žárovky.
- 2) Postupně proměřte voltampérové charakteristiky odporu, termistoru, křemíkové diody, LED diody a Zenerovy diody (diody proměřte v propustném i závěrném směru) s použitím obvodu sestaveného podle obrázku 1 nebo 2 (správně zvolte pro dané měření).
- 3) Voltampérové charakteristiky měřte tak, že postupně volte pomocí potenciometru vhodné hodnoty napětí (nejlépe ekvidistantně, cca deset hodnot) na měřeném jednobranu a zapisujte je do tabulky společně s příslušnou hodnotou proudu protékajícího jednobranem.
- 4) Získané průběhy vykreslete do grafu. U všech diod určete hodnoty prahových napětí a diferenciálních odporů v propustném i závěrném směru.



Výstupy

- 1) Tabulky naměřených hodnot napětí a proudů.
- 2) Grafy – voltampérové charakteristiky proměřených jednobranů.
- 3) Hodnoty prahových napětí a diferenciálních odporů proměřených diod.



Kontrolní otázky

- 1) Co je to jednobran?
- 2) Vysvětlete pojem voltampérové charakteristiky jednobranu.
- 3) Vysvětlete postup měření voltampérové charakteristiky pomocí voltmetru a ampérmetru. Proč je třeba obecně používat dvě různá schémata zapojení?
- 4) Čím se vyznačují diody? Jaké jsou jejich typické voltampérové charakteristiky? Co je to prahové napětí diody?
- 5) Definujte matematicky veličinu zvanou diferenciální odpor.

4. Přechodové jevy v obvodech s kapacitoy

Úkoly

- 1) Sestavte obvod pro demonstraci jevu nabíjení a vybíjení kondenzátoru.
- 2) Naměřte průběhy napětí a proudů na vybraných prvcích obvodu.
- 3) Vysvětlete kvalitativně i kvantitativně pozorované jevy.
- 4) Proveďte rozbor nabíjení kondenzátoru z ideálního zdroje napětí z hlediska zákona zachování energie.

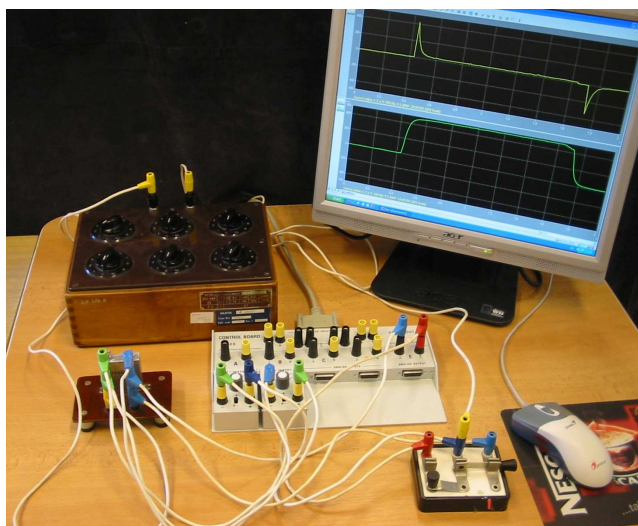


Pojmy k zapamatování

Kapacitor, kondenzátor, přechodový jev, časová konstanta.



Uspořádání pracoviště

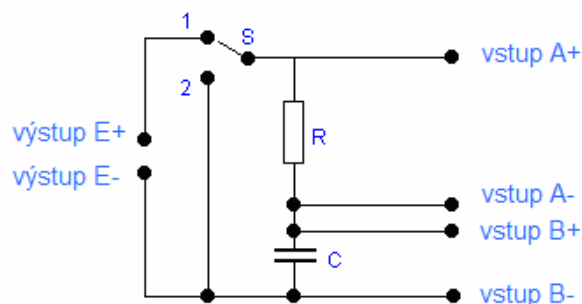


Pomůcky

Počítač s měřícím systémem ISES, 2x modul voltmetr, odporová dekáda, kondenzátor $2\mu\text{F}$, spínač.

Teorie

Schéma zapojení obvodu pro demonstraci jevu nabíjení a vybíjení kondenzátoru je na obrázku 4.1.



Obr. 4.1

Je-li přepínač v poloze 1, dochází k nabíjení kondenzátoru C přes odpor R. Po přepnutí přepínače S do polohy 2 se kondenzátor C začne přes odpor R vybíjet. Vstupním kanálem A měřicího systému ISES snímáme napětí na odporu R a nepřímo také proud tekoucí kondenzátorem C, vstupním kanálem B pak napětí na kondenzátoru C.

Po sepnutí přepínače S do polohy 1 se uzavře vodivé spojení mezi deskami kondenzátoru C a zdroj napětí Z začne "pumpovat" elektrony z jedné desky (na schématu horní) na druhou a tím jej nabíjet. Tím vzniká mezi oběma deskami elektrické napětí U_C , které je přímo úměrné přesunutému náboji Q ($Q = C \cdot U_C$). V okamžiku těsně po zapnutí (v čase $t = 0$) je náboj $Q(0) = 0$, proto i $U_C(0) = 0$. Veškeré napětí U_0 zdroje Z je tudíž na odporu R (2. Kirchhoffův zákon) a okamžitá hodnota proudu je $I(0) = U_0/R$ (Ohmův zákon). Proud se tedy změní skokem z nuly na hodnotu U_0/R . S postupným nabíjením kondenzátoru C se napětí na něm zvětšuje a napětí na odporu R musí proto adekvátně klesat. To ovšem znamená, že také proud obvodem klesá. Ustálený stav nastane tehdy, když se napětí na kondenzátoru vyrovná napětí zdroje. Pak bude proud roven nule.

Vybíjení je obdobný proces. Nechť kondenzátor C byl nabit na napětí U_0 . Přepneme-li v čase $t = 0$ přepínač S do polohy 2, začne se nahromaděný volný náboj na deskách kondenzátoru vlivem přitažlivých sil přes vzniklou vodivou dráhu přesouvat a tím postupně zmenšovat až na nulovou hodnotu. Proto také napětí na kondenzátoru bude klesat k nule ($U_C = Q/C$) a stejně tak proud, tekoucí obvodem ($I = U_C/R$). Maximální hodnotu má tedy proud na počátku ($I(0) = U_0/R$).

Vydeme z 2. Kirchhoffova zákona pro napětí v uzavřené smyčce. Označíme-li U_0 napětí zdroje Z, U_R napětí na rezistoru R a U_C napětí na kondenzátoru C, dostaneme rovnici pro okamžité hodnoty

$$U_R + U_C = U_0. \quad (4.1)$$

Vyjádříme veličiny na levé straně pomocí proudu I

$$RI(t) + U_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t I(t') dt' = U_0.$$

Člen $U_C(0)$ udává napětí na kondenzátoru C v okamžiku $t = 0$. Vzniklou integrální rovnici převedeme zderivováním na lineární diferenciální rovnici s konstantními koeficienty tvaru

$$R \frac{dI(t)}{dt} + \frac{I(t)}{C} = 0,$$

přičemž podle původní rovnice musí platit počáteční podmínka $I(0) = \frac{U_0 - U_C(0)}{R}$. Řešením je exponenciální funkce

$$I(t) = \frac{U_0 - U_C(0)}{R} e^{-t/\tau}, \quad (4.2)$$

kde $\tau = R \cdot C$ je tzv. časová konstanta přechodového děje.

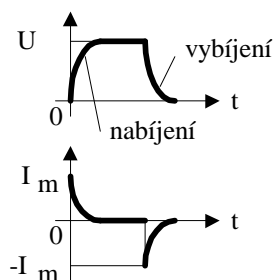
Při nabíjení vybitého kondenzátoru, tzn. $U_C(0) = 0$, zdrojem o napětí U_0 tedy vychází průběh nabíjecího proudu

$$I(t) = \frac{U_0}{R} e^{-t/\tau}.$$

Při vybíjení kondenzátoru nabitého na napětí U_0 je nutno dosadit do vztahu (4.2) místo $U_C(0)$ U_0 a místo U_0 nulu, protože v obvodu není přítomen zdroj napětí. Dostaneme vztah

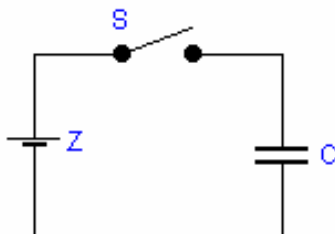
$$I(t) = -\frac{U_0}{R} e^{-t/\tau},$$

který je až na znaménko totožný se vztahem pro nabíjení. Vypočítejte, nejlépe ze vztahu (4.1), průběh napětí $U_C(t)$ pro oba případy.




Obr. 4.2

Uvažujme nabíjení kondenzátoru C zdrojem Z podle obrázku 4.3. Na počátku je kondenzátor bez náboje. Po sepnutí spínače S se začne nabíjet a v ustáleném stavu na něm bude napětí U_0 zdroje Z. Absolutní hodnota náboje akumulovaného na každé z jeho desek je dána jeho kapacitou $Q = C \cdot U_0$. Energie elektrostatického pole kondenzátoru se vypočte podle známého teoretického vztahu $W_e = \frac{1}{2} Q \cdot U_0$. Ale z definice potenciálu elektrostatického pole plyne, že zdroj přenesením náboje Q přes potenciálový rozdíl U_0 vykoná dvakrát větší práci $A = Q \cdot U_0$. Otázkou je, kam se poděla polovina této práce. Odpovězte v protokolu.







Obr. 4.3

Postup práce

- 1) Ke kanálu A a B panelu ISES připojte moduly voltmetr, nastavte jejich rozsah na 1 V s nulou uprostřed, sestavte obvod pro měření podle obrázku 4.1 (odpor dekády R volte 1 k Ω .) a nechte si jej zkontrolovat.
- 2) Spustíte program ISESWIN32i, založte nový experiment (zvolte Experiment/Nový nebo ikonu ) a otevře se Vám panel Konfigurace měření, kde nastavíte jeho parametry (zvolte typ měření Časový úsek, dobu měření 2 s, vzorkování 100 Hz, zatrhněte vstupní kanál A, vstupní kanál B a výstupní kanál E – na něj poklepejte a nastavte výstupní signál Ruční řízení a parametr Počáteční hodnota na 0,5 V). Vše potvrďte volbou OK.
- 3) Vybijte kondenzátor C zkratem a pak přepněte spínač S do polohy 1. Na monitoru sledujte průběh nabíjení kondenzátoru přes sériově zařazený odpor dekády. Podobně sledujte vybíjení kondenzátoru (spínač S v poloze 2) po nabití, případně opakujte měření



(Měření/Opakovat měření nebo ikona ). Vybraný „hezký“ průběh si uložte jako textový soubor (Nástroje/Export zobrazení) pro pozdější zpracování. Nástrojem pro odečet dat (Zpracování/Odečet hodnot nebo ikona ) získejte maximální hodnotu napětí a запиšte si ji (můžete použít zoom ).

- 4) Zvětšete si zoomem nabíjecí křivku kondenzátoru, nástrojem pro odečet dat na ni umístěte asi 6 bodů a body aproximujte exponenciální funkcí (zvolte Zpracování/Aproximace nebo ikonu , vyberte exponenciálu a potvrďte OK). Pokud proložená křivka příliš nesouhlasí s naměřeným grafem, vymažte body a zvolte nové, až se shoda zlepšší. Zapište si hodnotu parametru v exponentu a z ní určete časovou konstantu přechodového děje. Podobně určete časovou konstantu z vybíjecí křivky kondenzátoru.
- 5) Bod 3 a 4 postupu práce opakujte pro jinou hodnotu odporu R (zhruba třetinovou).
- 6) Vysvětlete kvalitativně (bez výpočtů) pozorované jevy.
- 7) Zjistěte z teorie matematické vztahy pro průběhy sledovaného napětí a proudu, zjistěte parametry použitých prvků (C , R , U_0), spočítejte časovou konstantu přechodového děje a sestrojte grafy teoretických průběhů. Pro přesnější výpočet můžete parametry použitých prvků změřit (ohmmetrem a měřičem kapacit). Ohodnoťte míru shody naměřených a teoretických hodnot (konstant i grafů) a vysvětlete případné odchylky.
- 8) Provedte rozbor nabíjení kondenzátoru z ideálního zdroje napětí z hlediska zákona zachování energie.

Výstupy



- 1) Grafy naměřených průběhů napětí a proudů.
- 2) Tabulka jmenovitých (a popř. i naměřených) hodnot jednotlivých prvků zapojených v obvodu.
- 3) Tabulka teoretických a experimentálních časových konstant přechodového děje.
- 4) Grafy teoretických průběhů (nejlépe vždy společně s příslušným naměřeným průběhem v jednom obrázku).
- 5) Řešení problému s výpočtem energie kondenzátoru – viz poslední odstavec v teorii.

Kontrolní otázky



- 1) Definujte pojem kapacitor a kondenzátor. Jaký je mezi nimi rozdíl?
- 2) Popište jev nabíjení, resp. vybíjení kondenzátoru. Proč tyto jevy neprobíhají okamžitě (skokem)?
- 3) Co je to časová konstanta přechodového děje? Jaký je její praktický význam? Jak se vypočte v nejjednodušším případě?
- 4) Obsahuje nabitý kondenzátor energii? Jak se tato energie nazývá a jak se vypočte?

5. Přejchodové jevy v obvodech s induktory

Úkoly

- 1) Sestavte obvod pro demonstraci přechodových jevů způsobených samoindukcí (vlastní indukčností obvodu).
- 2) Naměřte průběhy napětí, resp. proudů na vybraných prvcích obvodu.
- 3) Vysvětlete kvalitativně a kvantitativně pozorované jevy.

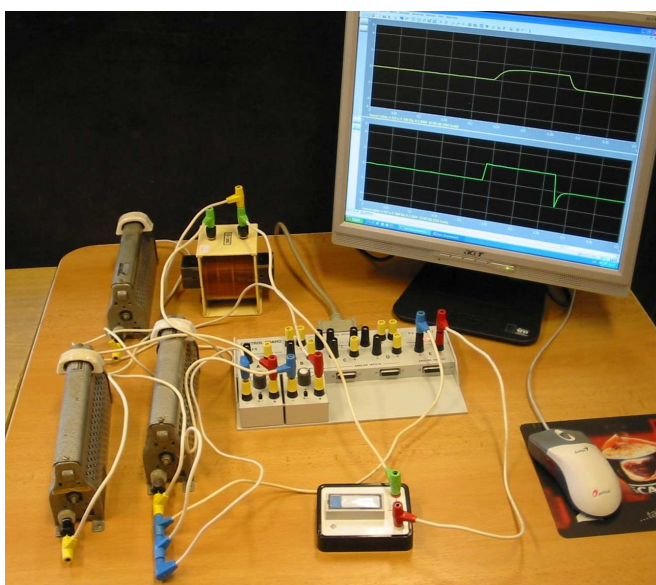


Pojmy k zapamatování

Induktor, cívka, indukčnost, přechodový jev, časová konstanta.



Uspořádání pracoviště

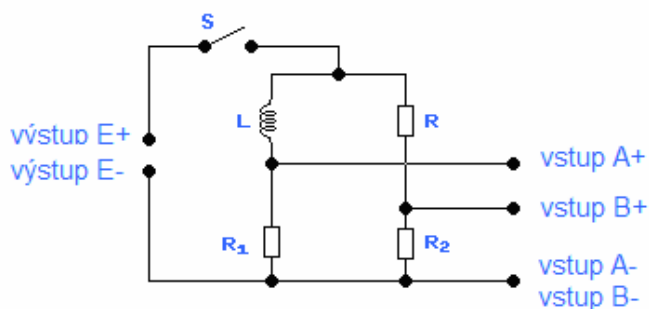


Pomůcky

Počítač s měřícím systémem ISES, 2x modul voltmetr, 2x reostat 1850 Ω , reostat 850 Ω , cívka (12000 z / 0,1 A) s železným jádrem, spínač, ohmmetr, měřič indukčnosti.

Teorie

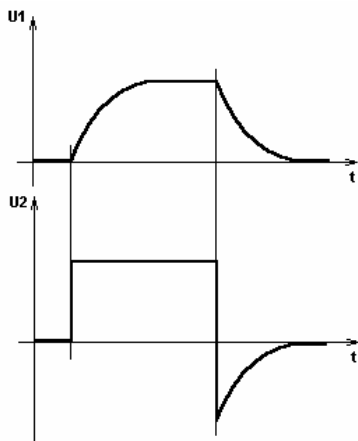
Schéma zapojení obvodu pro demonstraci přechodových jevů způsobených samoindukcí je na obrázku 5.1.



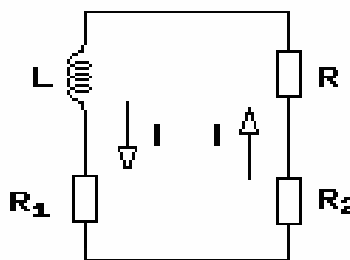
Obr. 5.1

Napětí na reostatu R_1 , který je sériově spojen s induktorem (cívkou) L , přivádíme na vstupní kanál A měřícího systému ISES, napětí na reostatu R_2 , sériově spojeném s reostatem R přivádíme na vstupní kanál B. Jako zdroj použijeme výstupní kanál E měřícího systému ISES.

Typické průběhy napětí U_1 , U_2 na rezistorech R_1 , R_2 při zapnutí a vypnutí spínače S jsou na obrázku 5.2.



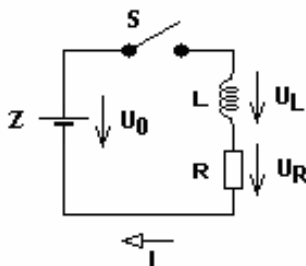
Obr. 5.2



Obr. 5.3

Indukčnost je vlastnost analogická mechanické setrvačnosti; snaží se zachovat proud protékající cívku. Proto proud protékající cívku musí být v čase spojitý, nemůže se měnit skokem. Na počátku je proud cívku nulový. Po sepnutí spínače S se na odporu R_2 okamžitě objeví plné napětí, tzn. že proud v této větvi obvodu se mění skokem. Ve větvi s cívku je zřejmý plynulý (exponenciální) náběh napětí na odporu R_1 , a tedy i proudu touto větví. Proud ve větvi s cívku tedy nabíhá pomaleji než ve větvi s odporem. Rovněž při vypnutí spínače S se proud ve větvi s cívku zmenšuje exponenciálně. Proud ve větvi s odporem se opět mění skokem, nikoli ale na nulovou hodnotu, ale dokonce na opačnou hodnotu než před vypnutím. Vysvětlení je patrné z obrázku 5.3.

Po vypnutí spínače S je odpor větve se zdrojem Z teoreticky nekonečně velký a nemusíme ji uvažovat. Proud větvi s odporem R nemá setrvačnost, okamžitě klesne na nulu. Avšak cívka drží i po vypnutí spínače S po infinitezimálně krátkou dobu stejný proud jaký jí protékal v okamžiku vypnutí. Tento proud se však již nemůže uzavírat přes zdroj Z , musí tedy téci větví s odporem R "nazpátek". Proto se změní polarita napětí na odporu R_2 . Protože hodnoty proudů v obou větvích před vypnutím jsou přibližně stejné, je také absolutní hodnota napětí na odporu R_2 před vypnutím a po vypnutí zhruba stejná.



Obr. 5.4

Uvažujme nejprve jednoduchý obvod podle obrázku 5.4. V hodnotě odporu R jsou započteny také vnitřní odpory cívky L , spínače S a zdroje Z . Zajímá nás nyní průběh proudu tímto obvodem po sepnutí spínače S . Pro napětí platí 2. Kirchhoffův zákon

$$U_L + U_R = U_0.$$

Vyjádříme-li obě napětí na levé straně pomocí proudu I , dostaneme lineární diferenciální rovnici s konstantními koeficienty pro proud

$$L \frac{dI}{dt} + RI = U_0.$$

Řešením této rovnice za počáteční podmínky $I(0) = 0$ je exponenciála

$$I(t) = \frac{U_0}{R} (1 - e^{-t/\tau}),$$

kde hodnota $\tau = L/R$ je tzv. *časová konstanta* přechodového děje.

V případě rozpojení obvodu dochází ke skokové změně hodnoty odporu R na mnohem větší hodnotu $R + R'$, kde R' je dán odporem elektrického oblouku, který se vytvoří mezi kontakty spínače S . Platí obdobná diferenciální rovnice jako pro sepnutí obvodu, ovšem s hodnotou $R + R'$ místo R a s počáteční podmínkou pro proud $I(0) = U_0/R$. Řešením je také exponenciální funkce

$$I(t) = U_0 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R + R'} \right) e^{-t/\tau} + \frac{U_0}{R + R'} \approx \frac{U_0}{R} e^{-t/\tau} + \frac{U_0}{R + R'},$$

přičemž nyní je $\tau = \frac{L}{R + R'}$.

Všimněme si ještě napětí na jednotlivých prvcích obvodu v okamžiku rozepnutí obvodu. Na cívce se vlivem samoindukce indukuje napětí, které se snaží udržet původní proud a jeho velikost je dána vztahem

$$U_L(t) = L \frac{dI(t)}{dt} = LU_0 \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R + R'} \right) \frac{d(e^{-t/\tau})}{dt} = L \frac{U_0}{-\tau} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R + R'} \right) e^{-t/\tau} = -U_0 \frac{R'}{R} e^{-t/\tau}.$$

Znaménko mínus znamená, že orientace indukovaného napětí je opačná než je u pasivních spotřebičů běžné, cívka se v tomto případě chová jako zdroj. Indukované napětí se snaží udržet původní směr proudu. V čase $t = 0$ má napětí na cívce hodnotu $U_0 R'/R$, tzn. R'/R -krát větší než napětí zdroje Z . Vzhledem k tomu, že R' je značně větší než R , dosahuje toto indukované napětí hodnot řádově stovek voltů a může při nesprávném zapojení provést značnou škodu v obvodu (zničení polovodičových součástek a měřáků, proražení kondenzátorů apod.). Hlavní část indukovaného napětí se "spotřebuje" na velkém odporu R' spínače S , což lze pro okamžik $t = 0$ lehce ověřit

$$U_S(0) = R'I(0) = R' \frac{U_0}{R} = U_0 \frac{R'}{R} = -U_L(0).$$

Na rezistoru R bude v čase $t = 0$ napětí rovné napětí zdroje U_0 , což se dá opět lehce ověřit aplikací Ohmova zákona.






Na závěr se vraťme k původnímu schématu, kdy k větvi s induktorem L a rezistorem R_1 je paralelně připojena větev s rezistory R, R_2 . Aplikujeme-li zde výše uvedenou teorii a úvahy z bodu ad 3), zjistíme, že se (při vypnutí) jedná o děj, charakterizovaný počátečním proudem $I(0) = \frac{U_0}{R_L + R}$, kde R_L je vnitřní odpor reálné cívky, a odporem proudové dráhy rovným součtu všech odporů, tzn. $R_L + R_1 + R + R_2$, přičemž v obvodu není zapojen zdroj napětí. Obdobným postupem jako výše dojdeme k obdobným výsledkům (provedte). Za zmínku stojí, že maximální indukované napětí na cívce L má hodnotu

$$U = U_0 \frac{R_L + R_1 + R + R_2}{R_L + R}.$$

Pokud se tedy hodnoty odporů obou větví přibližně rovnají, je toto napětí "pouze" asi dvojnásobkem napětí zdroje Z.

Postup práce



- 1) Ke kanálu A a B panelu ISES připojte moduly voltmetr, nastavte jejich rozsah na 10 V s nulou uprostřed, sestavte obvod pro měření podle obrázku 5.1 (hodnoty ohmických odporů reostatů nastavte $R_1 \cong 850 \Omega$, $R_2 \cong 1850 \Omega$, $R \cong 1850 \Omega$.) a nechte si jej zkontrolovat.
- 2) Spusťte program ISESWIN32i, založte nový experiment (zvolte Experiment/Nový nebo ikonu ) a otevře se Vám panel Konfigurace měření, kde nastavíte jeho parametry (zvolte typ měření Časový úsek, dobu měření 2 s, vzorkování 100 Hz, zatrhněte vstupní kanál A, vstupní kanál B a výstupní kanál E – na něj poklepejte a nastavte výstupní signál Ruční řízení a parametr Počáteční hodnota na 5 V). Vše potvrďte volbou OK.
- 3) Střídavě zapínejte a vypínejte spínač S a sledujte snímaný průběh napětí U_1 , U_2 (na rezistorech R_1 , R_2) na monitoru, případně opakujte měření (Měření/Opakovat měření nebo ikona ). Vybraný „hezký“ průběh si uložte jako textový soubor (Nástroje/Export zobrazení) pro pozdější zpracování. Nástrojem pro odečet dat (Zpracování/Odečet hodnot nebo ikona ) získejte maximální hodnotu napětí a запиšte si ji (můžete použít funkci zoom )
- 4) Zvětšete si zoomem náběh napětí na odporu R_1 (odpovídající proudu ve větvi), nástrojem pro odečet dat na ni umístěte asi 6 bodů a body aproximujte exponenciální funkcí (zvolte Zpracování/Aproximace nebo ikonu , vyberte exponenciálu a potvrďte OK). Pokud proložená křivka příliš nesouhlasí s naměřeným grafem, vymažte body a zvolte nové, až se shoda zlepší. Zapište si hodnotu parametru v exponentu a z ní určete časovou konstantu přechodového děje. Podobně určete časovou konstantu z křivky odpovídající zmenšujícímu se proudu ve větvi s cívkou.
- 5) Vysvětlete kvalitativně pozorované průběhy.
- 6) Vysvětlete pozorované jevy také kvantitativně, tzn. propočítejte obecně teoretický průběh napětí na rezistorech R_1 , R_2 jako funkci času od okamžiku sepnutí, resp. vypnutí obvodu.

Pro získání přesných hodnot odporů a indukčnosti proveďte přímé měření těchto parametrů (ohmmetrem a měřičem indukčností). Odvodte vztah pro časovou konstantu přechodových dějů a spočítejte ji.

Výstupy

- 1) Grafy naměřených napětí.
- 2) Tabulka naměřených a jmenovitých hodnot jednotlivých prvků zapojených v obvodu.
- 3) Grafy teoretických průběhů (nejlépe vždy společně s příslušným naměřeným průběhem v jednom obrázku).
- 4) Tabulka teoretických a experimentálních časových konstant přechodového děje.
- 5) Kvalitativní vysvětlení pozorovaných průběhů.



Kontrolní otázky

- 1) Definujte pojmy induktor a cívka. Jaký je mezi nimi rozdíl?
- 2) Popište přechodový děj v obvodu, tvořeném sériovým spojením cívky a rezistoru, po jeho připojení ke zdroji napětí.
- 3) Co je to časová konstanta přechodového děje? Jaký je její praktický význam? Jak se vypočte v případě sériového zapojení cívky a rezistoru?
- 4) Může se proud rezistorem měnit skokem? Odůvodněte svou odpověď.



6. Tlumené kmity v RLC obvodu

Úkoly

- 1) *Demonstrujte průběh tlumených kmitů v RLC obvodu.*
- 2) *Vysvětlete pozorované jevy.*
- 3) *Vypočítejte hodnoty hlavních parametrů popisujících přechodové děje.*

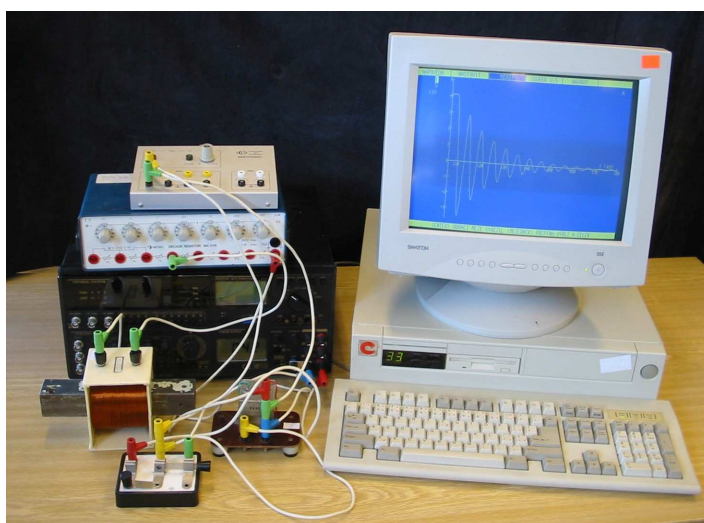


Pojmy k zapamatování

Kapacitor, kondenzátor, cívka, induktor, přechodový jev, časová konstanta, tlumené kmity, faktor útlumu, logaritmický dekrement útlumu, konstanta útlumu, kritický odpor.



Uspořádání pracoviště

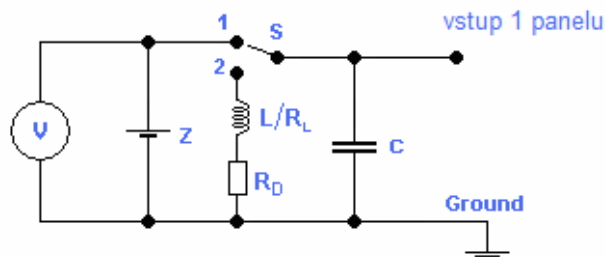


Pomůcky

Počítač s měřícím systémem IP COACH, měřicí systém MS-9150 (použije se zdroj stejnosměrného napětí a voltmetr), odporová dekáda, cívka 600 Ω , kondenzátor 8 μF a 16 μF , rovné jádro, přepínač.

Teorie

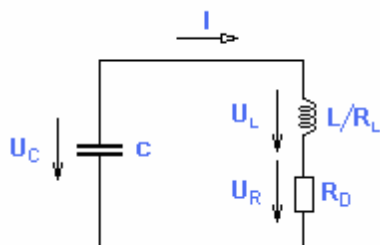
Schéma obvodu pro demonstraci tlumených kmitů ukazuje obrázek 6.1.



Obr. 6.1

Je-li spínač S v poloze 1, dochází k nabíjení kondenzátoru C. Po přepnutí spínače S do polohy 2 se kondenzátor C začne přes cívku a dekádu vybíjet. Bod "Ground" označuje zemnicí svorku převodníku systému IP COACH, bod "vstup 1 panelu" je 1. kanál téhož převodníku. To znamená, že 1. kanálem snímáme napětí na kondenzátoru. Napětí zdroje měříme voltmetrem V.

Po přepnutí spínače S do polohy 2 dojde k vybíjení kondenzátoru přes cívku a dekádu. Elektrická energie, akumulovaná v kondenzátoru, se mění na magnetickou energii pole cívky, část energie se mění v Joulovo teplo na odporové dekádě a vnitřním odporu cívky. Pokud je ohmický odpor obvodu dostatečně malý (viz níže), dojde ke vzniku tlumených kmitů. I při nulové hodnotě napětí na kondenzátoru totiž cívku stále teče nenulový proud, který způsobí nabití kondenzátoru na napětí opačné polarity. Jev je obdobný kmitání kyvadla v odporujícím prostředí (elektrická energie kondenzátoru odpovídá potenciální energii, magnetická energie cívky kinetické energii, indukčnost je analogická setrvačnosti). Náhradní schéma potřebné k řešení obvodu je na obrázku 6.2.



Obr. 6.2

Vydeme z 2. Kirchhoffova zákona pro napětí v uzavřené smyčce. Označíme-li U_C napětí na kapacitě C, U_L napětí na indukčnosti L, U_R součet napětí na rezistorech R a R_L (přičemž zavedeme celkový odpor obvodu vztahem $R = R_D + R_L$), dostaneme rovnici pro *okamžité hodnoty*

$$U_C = U_R + U_L.$$

Vyjádříme všechny veličiny nejlépe pomocí náboje na kondenzátoru, který je přímo úměrný měřenému napětí ($Q = C \cdot U_C$)

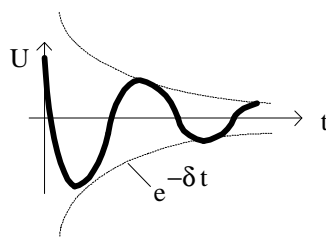
$$\frac{d^2 Q(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dQ(t)}{dt} + \frac{1}{LC} Q(t) = 0.$$

Řešení vzniklé diferenciální rovnice 2. řádu s konstantními koeficienty má 3 případy:

a) $R^2 - \frac{4L}{C} < 0$: tlumení obvodu je dostatečně malé, vznikají *tlumené kmity*. Časový průběh náboje na kondenzátoru je popsán rovnicí

$$Q(t) = \frac{f_0}{f} Q_0 e^{-\frac{R}{2L}t} \cos(2\pi f t - \phi),$$

kde $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$ je frekvence vzniklých kmitů v obvodu, $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$ je frekvence stejného obvodu bez tlumení ($R = 0$), Q_0 je náboj na kapacitě C v čase $t = 0$ a člen ϕ je definován vztahem $\cos \phi = f/f_0$. Mimochodem, vidíme, že tlumení prodlužuje dobu kmitu;



Obr. 6.3

b) $R^2 - \frac{4L}{C} = 0$, tzn. $R = R_k = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, tzv. *kritické tlumení*, R_k se nazývá kritický odpor, frekvence kmitání f vychází nulová, tzn. jedná se o aperiodický děj;

c) $R^2 - \frac{4L}{C} > 0$: tlumení je tak velké, že nevznikají kmity, proud ani napětí nemění své znaménko, jedná se o *aperiodický děj*, který je vždy pomalejší než v případě kritického tlumení.

Faktorem útlumu nazýváme podíl dvou amplitud, vzdálených o jednu periodu

$$\frac{A_1}{A_2} = e^{\frac{RT}{2L}}$$

a *logaritmický dekrement útlumu* je definován jako přirozený logaritmus faktoru útlumu

$$\ln \frac{A_1}{A_2} = \frac{RT}{2L} = \pi R \sqrt{\frac{C}{L}}.$$

Dále se zavádí *konstanta útlumu* $\delta = R/2L$ (viz též obrázek 6.3); její převrácená hodnota je *časová konstanta* $\tau = 2L/R$. τ označuje čas, za který amplituda kmitů klesne na $1/e$ původní hodnoty.

Postup práce

- Podle obrázku 6.1 sestavte obvod pro demonstraci tlumených kmitů (odpor dekády volte zatím nulový, zařaďte kondenzátor $8 \mu\text{F}$) a nechte si jej zkontrolovat.
- Spusťte program Multiskop systému IP COACH (spusťte soubor go.bat v adresáři IP_COACH a vyberte Programy/Multiskop) a nastavte rozsahy čidel a grafů (Vyberte Nastavit. Pro volbu Měření nastavte Celková doba: 2 s, Spouštěcí kanál: 1, Předspoušť: 0,0 s, Spouštěcí hrana: Nahoru, Spouštěcí úroveň: Ručně. Pro volbu Čidla nastavte (volba kanálů šipkou) Kanál: 1, Veličina: V, Jednotka: V, Maximum: 5, Minimum: -5. Pro volbu Grafy nastavte (volba grafů šipkou) Graf: A, Osa-x: t, Maximum: 2, Minimum: 0, Osa-y: V(1), Maximum: 5, Minimum: -5. Pro volbu Zobrazování nastavte Barva: žlutá, Graf A: Zap., Graf B, C, D: Vyp.).
- Pro vlastní měření vyberte Měřit/Start a poté spusťte mezerníkem. Nabijte kondenzátor C přepnutím spínače S do polohy 1. Pak přepněte spínač S do polohy 2 a sledujte na monitoru vznik tlumených kmitů. Případně opakujte měření (na dekádě můžete zvolit malou hodnotu odporu) a vybraný „hezký“ průběh tlumených kmitů si uložte jako textový soubor (ukončete program Multiskop, vyberte Podpora/



Konverze/Export/Formát *.txt, napište jméno souboru a uložte) pro pozdější zpracování.

- 4) Pro danou hodnotu C a L volte stále větší činný odpor R a najděte takovou jeho nejmenší hodnotu, při které již nedochází ke vzniku kmitů (tzv. kritický odpor). Získanou hodnotu porovnejte s vypočtenou dle teorie. Vybraný průběh si uložte jako textový soubor pro pozdější zpracování.
- 5) Provedte bod 3 postupu práce pro jinou hodnotu kapacity C při stejných hodnotách L a R. Jaký vliv má zvýšení kapacity C na průběh děje? Poté hledejte kritický odpor podle bodu 4 postupu práce.
- 6) Vysvětlíte pozorované jevy a odvodíte obecně teoretický časový průběh některé veličiny (proudu obvodem, napětí nebo náboje na kapacitě apod.). Z parametrů R, L, C a R_L vypočtete frekvenci, periodu, faktor útlumu, logaritmický dekrement útlumu, konstantu útlumu a časovou konstantu.
- 7) Pro oba průběhy tlumeného kmitání získaných v bodě 3 a 5 postupu práce zjistíte všechny parametry počítané v bodu 6 postupu práce a srovnáte je s nimi. Provedte to následujícím způsobem v MS Excel. Načtete příslušný textový soubor a vykreslete jej do xy bodového grafu. Frekvenci kmitů určete odečtením z grafu a periodu dopočítejte. Nyní vytvořte novou tabulku, do které nakopírujete prvních pět maxim. Body vykreslete do grafu. Pravým tlačítkem myši klikněte na body grafu, zvolte Přidat spojnicí trendu ..., vyberte exponenciální průběh, v možnostech zatrhněte „zobrazit rovnici regrese“ a potvrďte OK. Ze získané rovnice regrese si запиšte hodnotu parametru v exponentu a z ní určete konstantu útlumu (viz obrázek 3). Dopočtete časovou konstantu přechodového děje, faktor útlumu a logaritmický dekrement útlumu.

Výstupy



- 1) Čtyři grafy naměřených průběhů napětí.
- 2) Tabulka naměřených nebo jmenovitých hodnot jednotlivých prvků zapojených v obvodu.
- 3) Výpočet časový průběh některé veličiny – viz bod 6 postupu práce.
- 4) Tabulka vypočtených a zjištěných parametrů popisujících tlumené kmitání – viz bod 7 postupu práce.
- 5) Teoretická i zjištěná hodnota kritického odporu.

Kontrolní otázky



- 1) Jaké prvky musí obsahovat elektrický obvod, aby mohly vzniknout tlumené kmity?
- 2) Popište tlumené kmity v RLC obvodu z hlediska přeměn různých druhů energie.
- 3) Jaké hlavní parametry popisují kmitání obvodu?
- 4) Musí v RLC obvodu při sepnutí nebo vypnutí zdroje vždy dojít ke vzniku tlumených kmitů? Odůvodněte svou odpověď.

7. Základní osciloskopická měření

Úkoly

- 1) Seznamte se s přístrojem zvaným osciloskop a proveďte základní osciloskopická měření: kalibraci časové základny pomocí funkčního generátoru a proměření frekvenčních charakteristik RC a LC obvodů.
- 2) Pro oba obvody zvolte vhodně jednu frekvenci a nakreslete příslušný fázorový diagram napětí. Vypočtete velikost fázového posunu mezi napětím a proudem.

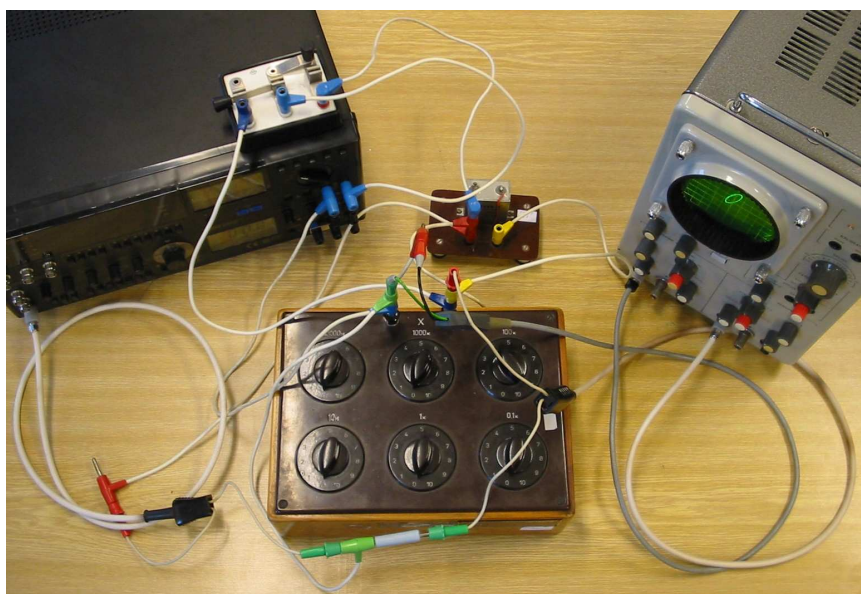


Pojmy k zapamatování

Osciloskop, časová základna, funkční generátor, frekvenční charakteristika, fázorový diagram, fázový posun, Lissajousovy obrazce.



Uspořádání pracoviště



Pomůcky

Měřicí systém MS-9150 (použije se funkční generátor a milivoltmetr), osciloskop, kondenzátor $4 \mu\text{F}$, cívka 600Ω , odporová dekáda, přepínač, vodivé spojky.

Teorie

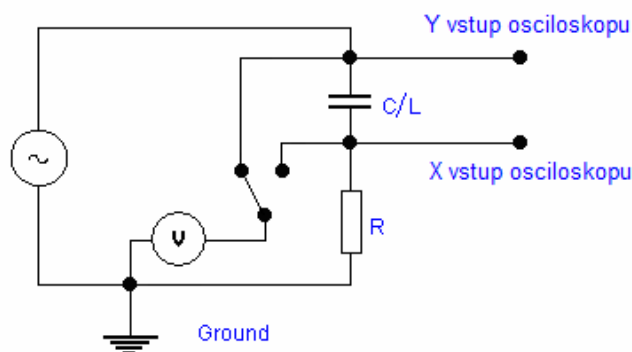
Osciloskop slouží zejména ke zjišťování průběhu periodických signálů. Skládá se zpravidla z těchto částí: obrazovky, horizontálního zesilovače (pro vstup X), vertikálního zesilovače (pro vstup Y), časové základny (což je generátor pilovitých kmitů měnitelné frekvence) a zdrojů. Neznámý průběh přivádíme na vertikální zesilovač (vstup Y), na horizontální zesilovač přivádíme buď další externí průběh (vstup X) nebo častěji průběh z časové základny (přepnutím příslušného ovládacího prvku). Výsledný obrazec na stínítku vznikne složením obou těchto navzájem kolmých periodických průběhů.



Zapojení pro kalibraci časové základny, resp. pozorování tvaru kmitů tvořených funkčním generátorem je jednoduché. Výstup z funkčního generátoru je přímo veden na Y-ový vstup

osciloskopu. Pozor na uzemnění všech přístrojů. Zemní vodiče jsou označeny většinou zeleně a nesmí být připojeny k uzlům obvodu o různém napětí.

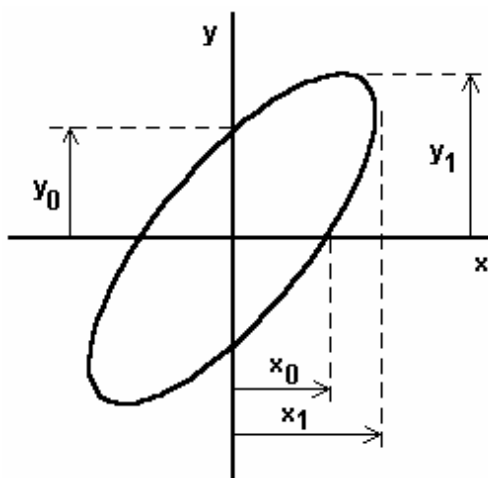
Schéma zapojení pro zjištění fázového posunu mezi proudem a napětím na sériovém zapojení rezistoru a kapacitoru, resp. induktoru, je na obrázku 7.1. Na vstup X osciloskopu se přivádí napětí z rezistoru R, které je ve fázi s proudem, protékajícím obvodem. Na vstup Y se přivádí napětí na celé sérii RC nebo RL, které je fázorovým součtem napětí na obou prvcích a není obecně ve fázi s proudem.



Obr. 7.1

Frekvenční charakteristikou (jednobranu) nazýváme závislost modulu impedance $|\vec{Z}|$ na frekvenci. Měření probíhá tak, že se pro vybrané frekvence změří napětí na daném jednobranu a proud jím protékající. Modul impedance je pak podílem těchto veličin, tzn. $|\vec{Z}| = U/I$. Proud měříme nepřímou přes napětí na známém ohmickém odporu R, který je zařazen v obvodu (obě měřená napětí jsou na obrázku 7.1 přiváděna na voltmetr pomocí přepínače).

Vhodná frekvence pro zjištění fázového posunu je taková, kdy napětí na odporu je asi 0,25 až 0,75 násobek napětí na celém obvodu RC resp. LC (neboli napětí na obou dílčích prvcích jsou zhruba srovnatelná). Na osciloskopu se objeví skloněná elipsa (*Lissajousův obrazec*) jako důsledek složení dvou kmitů stejné frekvence, ale různé amplitudy a fáze.



Obr. 7.2

Fázový posun φ je dán vztahem $\sin \varphi = \frac{x_0}{x_1} = \frac{y_0}{y_1}$, kde veličiny x_0, x_1, y_0, y_1 jsou definovány na obrázku 7.2.

Postup práce

- 1) Propojte generátor se vstupem Y osciloskopu (např. pomocí válečkovitých spojek) a seznamte se s ovládáním generátoru a osciloskopu (popř. s pomocí vedoucího praktika). Na osciloskopu naleznete a proveďte funkci těchto ovládacích prvků: změna horizontálního a vertikálního rozsahu zobrazení osciloskopu (projeví se zvětšením obrazu v daném směru), horizontální a vertikální posuv obrazu, přepínač časová základna/vstup X apod. Pozorujte průběhy signálů různých tvarů, amplitud a frekvencí, které volíte na generátoru.
- 2) Kalibrujte časovou základnu následujícím způsobem. Zapojte obvod. Zapněte časovou základnu a nastavujte měřítko časové osy (čas/díl) na několik menších hodnot. Ke každé z těchto hodnot měřítka nastavte na funkčním generátoru takovou frekvenci, abyste pozorovali stojící obraz aspoň jednoho kmitu. Odečtěte, kolik dílků osy X na obrazovce odpovídá kmitu a ověřte, zda perioda kmitu odpovídá frekvenci nastavené na generátoru.
- 3) Zapojte sériový RC obvod podle obrázku 7.1, na dekádě nastavte odpor zhruba 400Ω . Pro různé frekvence na vstupu zaznamenávejte dvojice napětí (pomocí přepínače na obrázku 2) a podle teorie z nich dopočtete modul impedance. Vykreslením závislosti modulu impedance na frekvenci získáte frekvenční charakteristiku RC obvodu.
- 4) Na generátoru zvolte vhodně jednu frekvenci a nakreslete příslušný fázorový diagram napětí. Na osciloskopu pozorujte Lissajousův obrazec – elipsu. Vysvětlete tento jev. Obraz na osciloskopu nastavte co nejostřeji a z parametrů pozorované elipsy (veličiny x_0, x_1, y_0, y_1 jsou popsány na obrázku 7.2) vypočtete velikost fázového posunu mezi napětím a proudem.
- 5) Zopakujte body 5 a 6 postupu práce pro sériový RL obvod.



Výstupy

- 1) Tabulka hodnot užitých frekvencí, napětí na prvcích R, C resp. R, L, vypočtených proudů na prvku C resp. L a modulů impedancí.
- 2) Grafy frekvenčních charakteristik daných RC a RL obvodů.
- 3) Fázorové diagramy napětí pro daný RC a RL obvod při vhodné frekvenci.
- 4) Náčrty elips pozorovaných na osciloskopu.
- 5) Vypočtené fázové posuny na základě parametrů odečtených z pozorovaných elips.



Kontrolní otázky

- 1) K čemu slouží osciloskop?
- 2) Jaké základní části a ovládací prvky má osciloskop? Co je to časová základna?
- 3) K čemu slouží funkční generátor?
- 4) Definujte frekvenční charakteristiku jednobranu. Porovnejte kvalitativně frekvenční charakteristiku prvku sériového RC a RL obvodu.
- 5) Definujte fázorový diagram napětí, resp. proudů.



-
- 6) Definujte obecně fázový posun. Jaký je zásadní rozdíl mezi fázovým posunem napětí vůči proudu pro sériový RC a RL obvod?

8. Měření kapacit a indukčnosti

Úkoly

- 1) Změřte kapacity a indukčnosti vybraných kondenzátorů a cívek přímou metodou (přístrojem).
- 2) Změřte kapacity a indukčnosti vybraných kondenzátorů a cívek pomocí voltmetru a ampérmetru.
- 3) Změřte kapacity a indukčnosti vybraných kondenzátorů a cívek rezonanční metodou.

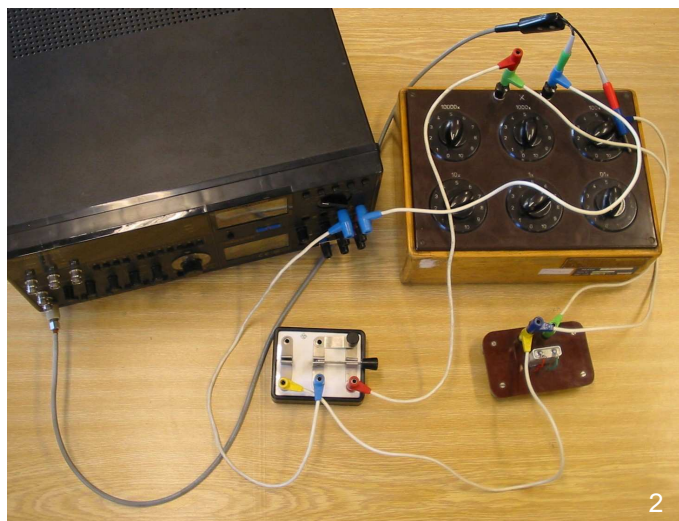


Pojmy k zapamatování

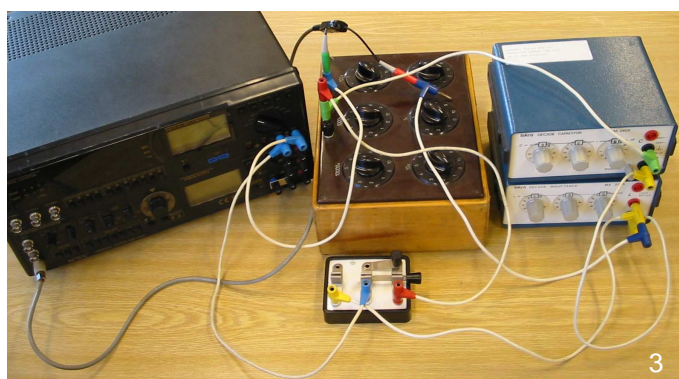
Kondenzátor, cívka, kapacita, indukčnost, impedance, admitance, kapacitance, induktance, přímá a nepřímá metoda měření, rezonanční metoda, střídavý proud, úhlová frekvence, rezonanční frekvence, Thompsonův vztah, rezonanční křivka.



Uspořádání pracoviště



2



3

Pomůcky

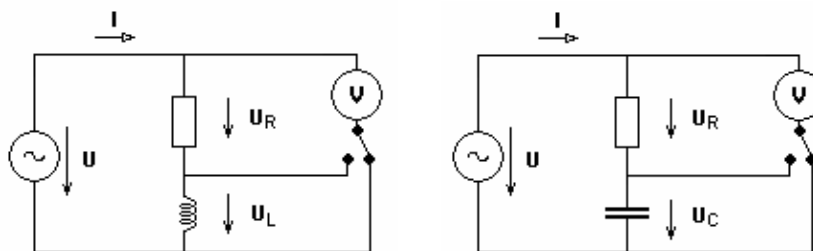
Měřicí systém MS-9150 (použije se funkční generátor a milivoltmetr), odporová dekáda, kapacitní dekáda, indukčnostní dekáda, proměřované kondenzátory ($1 \mu\text{F}$, $0,5 \mu\text{F}$), proměřované cívky ($300 \text{ z} / 5 \text{ A}$, $600 \text{ z} / 2 \text{ A}$), digitální LCR měřič.

Teorie



Měření přímou metodou (přístrojem) probíhá tak, že propojíme příslušné zdířky na měřicím přístroji s vývody měřeného jednobranu. Na měřicím přístroji nastavíme správný rozsah, u multimetru také typ měřené veličiny.

Schéma zapojení pro měření pomocí voltmetru a ampérmetru je na obrázku 8.1. Voltmetr připojujeme přepínačem paralelně k tomu prvku, na kterém měříme napětí. Tj. jednak měříme napětí na sérii RL resp. RC, jednak napětí U_R na známém odporu R dekády za účelem dopočtení proudu v obvodu podle vztahu $I = U_R / R$ (místo tohoto nepřímého měření bychom však mohli proud měřit i přímo ampérmetrem). Frekvenci zdroje volíme vhodně tak, aby obě napětí byla pohodlně měřitelná, tzn. nepříliš malá.



Obr. 8.1

Známe-li napětí na (ideálním) kondenzátoru a proud, který jím protéká, spočítáme kapacitu ze vztahu

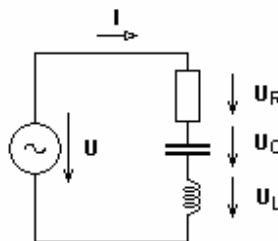
$$\frac{U_C}{I} = |Z| = \frac{1}{\omega C}.$$

Podobně pro cívku, kde přistupuje ještě její ohmický odpor R_L

$$\frac{U_L}{I} = |Z| = \sqrt{R_L^2 + (\omega L)^2}.$$

Ohmický odpor R_L cívky změříme také nepřímo přes napětí a proudy. Použijeme stejnosměrný zdroj a k výpočtu použijeme stejný vztah jen s úhlovou frekvencí $\omega = 0$.

Schéma zapojení pro měření rezonanční metodou je na obrázku 8.2. Jedná se o jednoduchý sériový RLC obvod.



Obr. 8.2

Rezonanci v elektrotechnice nazýváme jev, kdy se obvod s kapacitami a induktory nebo jeho část chová jako činný odpor, tzn. imaginární složka jeho impedance je nulová. Tento případ nastává tehdy, jestliže zdroj má určitou, tzv. *rezonanční frekvenci* $\omega_r = 2\pi f_r$. Hodnota této frekvence závisí na parametrech prvků v obvodu a na jeho zapojení. Dá se odvodit

z podmínky uvedené výše, t.j. $\text{Im}(Z(\omega_r)) = 0$. Pro rezonanční frekvenci sériového RLC obvodu (a také paralelního, nikoli však obecně každého) platí tzv. *Thompsonův vztah*

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}.$$

Známe-li tedy přesně např. kapacitu C (použijeme-li kapacitní normál), můžeme ze znalosti rezonanční frekvence vypočítat neznámou indukčnost L a naopak.

Při rezonanci v sériovém RLC obvodu zdroj kryje pouze ohmické ztráty v obvodu, elektrická energie v kondenzátoru se střídavě mění na magnetickou energii cívky a naopak.

Rezonanční křivkou daného obvodu rozumíme obecně graf, vyjadřující závislost proudu nebo napětí na frekvenci, příp. některém parametru obvodu (L , C , ...). Ostatní veličiny udržujeme konstantní. Nejčastěji se používá proudová rezonanční křivka, což je závislost proudu na frekvenci při konstantním napětí a daných parametrech obvodu. V našem případě je tato křivka až na multiplikativní faktor totožná s průběhem modulu admitance $Y(\omega) = 1/Z(\omega)$, neboť platí $I(\omega) = Y(\omega) \cdot U$. Resonanční frekvence odpovídá lokálnímu maximu na proudové rezonanční křivce.

Postup práce

- 1) Seznamte se s měřícím přístrojem pro přímé měření kapacit a indukčností a proměřte kapacity připravených kondenzátorů, indukčností a ohmické odpory připravených cívek přímou metodou (měřícím přístrojem). Na základě dokumentace k přístroji stanovte chyby měření jednotlivých výsledků.
- 2) Sestavte obvod pro měření kapacity a indukčnosti pomocí voltmetru a ampérmetru podle obrázku 8.1 a nechte si jej zkontrolovat.
- 3) Změřte kapacity vybraných kondenzátorů. Kondenzátory považujte za ideální.
- 4) Změřte stejnou metodou indukčnosti a ohmické odpory vybraných cívek. Nakreslete orientační fázorový diagram napětí pro reálnou cívku.
- 5) Sestavte sériový RLC obvod podle obrázku 8.2 a nechte si jej zkontrolovat.
- 6) Použijte kapacitní, resp. indukční dekádu a proměřte rezonanční metodou vybrané cívky, resp. kondenzátory. Nakreslete orientační fázorový diagram napětí pro daný obvod a fázorový diagram pro případ rezonance.
- 7) Výsledky všech měření uveďte přehledně do tabulek.



Výstupy

- 1) Tabulka naměřených hodnot kapacit, indukčností a ohmických odporů (rezistancí) vybraných prvků přímou metodou včetně určení chyby měření.
- 2) Tabulka naměřených hodnot kapacit, indukčností a ohmických odporů (rezistancí) vybraných prvků metodou měření napětí a proudů (dodejte do tabulky také).
- 3) Obrázky – orientační fázorové diagramy napětí pro reálnou cívku a pro sériový RLC obvod mimo rezonanci a v rezonanci.
- 4) Resonanční křivky získané při měření vybraných kondenzátorů a cívek rezonanční metodou včetně určení rezonančních frekvencí.



- 5) Tabulka hodnot kapacit a indukčností vybraných prvků vypočtených na základě naměřených rezonančních frekvencí včetně příkladu jejich výpočtů.

Kontrolní otázky



- 1) Co je to impedance, admitance, rezistance, kapacitance, induktance? Jak se vypočtou tyto veličiny pro ideální kondenzátor, ideální cívku a reálnou cívku?
- 2) Vysvětlete princip měření impedance dvojbranů metodou měření napětí a proudů.
- 3) Nakreslete schéma sériového RLC obvodu.
- 4) Definujte pojem rezonanční křivky.
- 5) Definujte obecně rezonanční frekvenci. Jak se jmenuje a jakou má podobu výpočetní vztah pro rezonanční frekvenci sériového RLC obvodu?
- 6) Vysvětlete princip měření kapacit a indukčností rezonanční metodou.

9. Usměrnění a vyhlazení střídavého proudu

Úkoly

Ověřte experimentálně jednocestné a dvoucestné usměrnění střídavého proudu a vyhlazení stejnosměrného pulzujícího proudu.

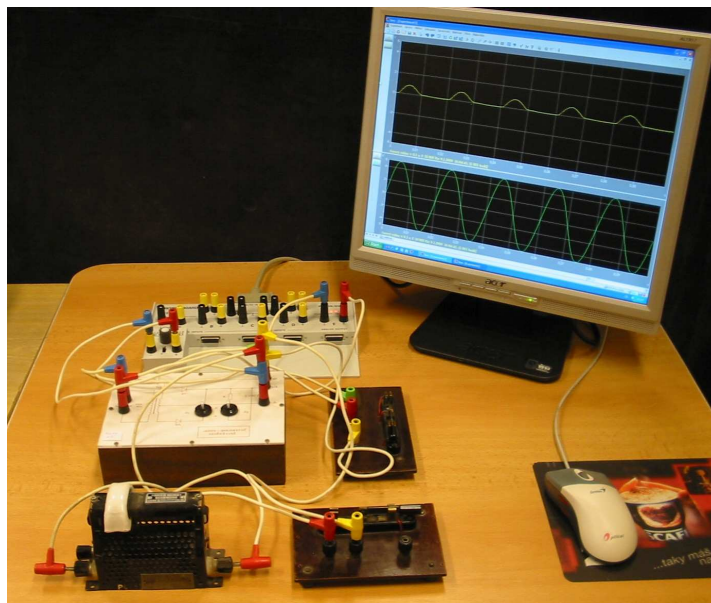


Pojmy k zapamatování

Jednocestné a dvoucestné usměrnění, střídavý, stejnosměrný a pulzující proud, filtrace, vyhlazení.



Uspořádání pracoviště

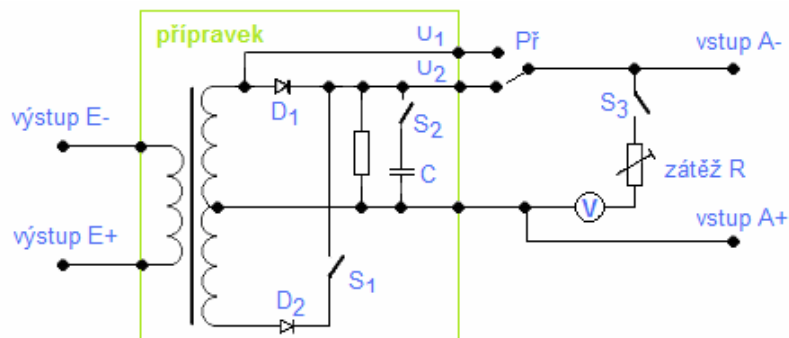


Pomůcky

Počítač s měřícím systémem ISES, modul voltmetr, přípravek pro jednocestné a dvoucestné usměrnění, reostat $47\ \Omega$ (jako zátěž), přepínač, spínač.

Teorie

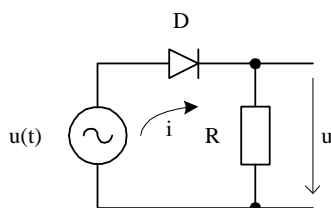
Schéma zapojení obvodu pro jednocestné a dvoucestné usměrnění střídavého proudu je na obrázku 9.1.



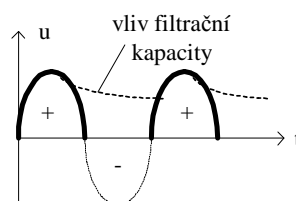
Obr. 9.1

V technické praxi se využívá schopnosti diod vést proud pouze jedním směrem ke konstrukci usměrňovačů síťových, nízkofrekvenčních i vysokofrekvenčních kmitočtů. Nejjednodušším je *jednocestný usměrňovač* s jednou diodou zapojenou do série (nebo paralelně) se spotřebičem.

Sériové zapojení jednocestného usměrňovače a příslušný časový průběh napětí jsou na obrázcích 9.2, resp. 9.3.



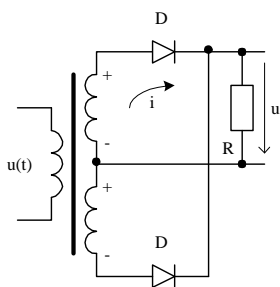
Obr. 9.2



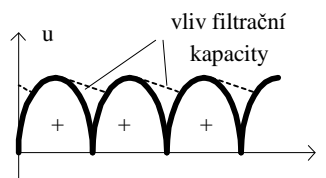
Obr. 9.3

Dnes častěji používané zapojení *dvoucestného usměrňovače* je zapojení můstkové. Tomu postačí pouze jeden signál, ale vyžaduje čtyři usměrňovací diody.

Sériové zapojení dvoucestného usměrňovače a příslušný časový průběh napětí jsou na obrázcích 9.4, resp. 9.5.






Obr. 9.4





Obr. 9.5

Postup práce



- 1) Ke kanálu A panelu ISES připojte modul voltmetr, nastavte jeho rozsah na 10 V s nulou uprostřed, sestavte obvod pro měření podle obrázku 9.1 (přepínačem připojte k vstupu A napětí U_1 , rozepnutím spínačem odpojte zátěž) a nechte si jej zkontrolovat.
- 2) Spustíte program ISESWIN32i, založte nový experiment (zvolte Experiment/Nový nebo pomocí ) a otevře se Vám panel Konfigurace měření, kde nastavíte jeho parametry (zvolte typ měření Časový úsek, dobu měření 0,1 s, vzorkování 2000 Hz, zatrhněte vstupní kanál A a výstupní kanál E – na něj poklepejte a nastavte výstupní signál Sinus pulsy, s amplitudou 5 V a frekvencí 50 Hz). Vše potvrďte volbou OK.
- 3) Průběh neusměrněného signálu si uložte jako textový soubor (Nástroje/Export zobrazení) pro pozdější zpracování. Nástrojem pro odečet dat (Zpracování/Odečet hodnot nebo ikona ) získáte amplitudu a zapište si ji (můžete použít zoom )
- 4) Přepínačem připojte k vstupu A napětí U_2 , spínače S_1 a S_2 nastavte do polohy „0“ a získáte průběh jednocestně usměrněného signálu (Měření/Opakovat měření nebo

ikona ). Získaná data si uložte do textového souboru. Odečtěte maximální hodnotu napětí.

- 5) Spínač S_2 přepněte do polohy „I“, tím připojíte k výstupu *filtrační kapacitor* C. Opakujte měření, uložte průběh, odečtěte maximální hodnotu napětí, velikost zvlnění tj. rozdíl maximálního a minimálního napětí (zvolte Zpracování/Odečet rozdílu nebo ikonu , umístěte myš na první bod, stiskněte levé tlačítko myši, přesuňte myš na polohu druhého bodu., uvolněte tlačítko) a spočítejte relativní velikost zvlnění (velikost zvlnění dělené maximálním napětím).
- 6) Zapnutím spínače S_3 přidejte do obvodu zátěž. Opakujte měření, uložte průběh, odečtěte maximální hodnotu výstupního napětí zmenšeného vlivem *zatížení odporem* reostatu R, odečtěte velikost zvlnění a dopočtěte relativní velikost zvlnění.
- 7) Spínačem S_2 odepněte filtrační kapacitor C (poloha „0“), spínačem S_3 odpojte z obvodu zátěž, spínačem S_1 zapojte dvojcestný usměrňovač (poloha „I“) a opakujte měření. Naměřený průběh uložte a odečtěte maximální hodnotu výstupního napětí.
- 8) Spínačem S_2 zapněte filtrační kapacitor C (poloha „I“) a opakujte měření. Naměřený průběh dvojcestně usměrněného signálu s filtrací uložte, odečtěte maximální hodnotu výstupního napětí, velikost zvlnění a dopočtěte relativní velikost zvlnění.
- 9) Zapnutím spínače S_3 přidejte do obvodu zátěž a opakováním měření sledujte dvojcestně usměrněného signálu s filtrací a zátěží. Uložte průběh, odečtěte maximální hodnotu výstupního napětí zmenšeného vlivem zatížení, odečtěte velikost zvlnění a spočítejte relativní velikost zvlnění.

Výstupy

- 1) Celkem 7 grafů, viz body 3 – 9 postupu práce (vhodně vybrané grafy mohou být názornější v jednom obrázku).
- 2) Tabulka maximálních hodnot napětí odečtenými pomocí software ISESWIN32i pro jednotlivé případy, v případě usměrněného signálu s filtrací také hodnoty zvlnění.



Kontrolní otázky

- 1) Vysvětlete funkci jednocestného a dvoucestného usměrňovače.
- 2) Zdůvodněte tvar výstupních signálů obou typů usměrňovačů.
- 3) Proč při připojení filtrační kapacitě a výstupu naprázdno je výstupní signál bez viditelného zvlnění?
- 4) Jak ovlivní průběh výstupního filtrovaného napětí připojení zátěže? Proč?
- 5) Porovnejte z hlediska kvality výstupního signálu jednocestný a dvoucestný usměrňovač.



10. Vyšetření magnetického pole v okolí magnetů

Úkoly

Změřte rozložení indukce magnetického pole v okolí permanentních magnetů Hallovou sondou napojenou na PC.

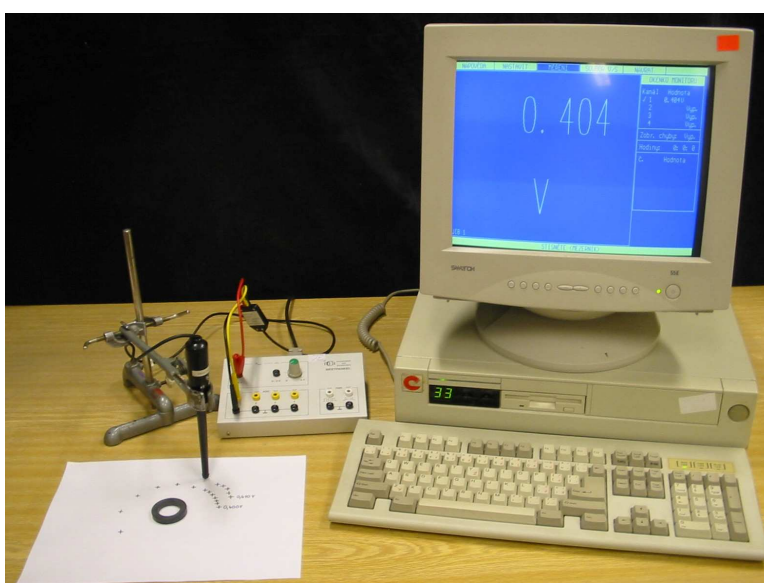


Pojmy k zapamatování

Magnetická indukce, siločára, permanentní magnet, Hallova sonda.



Uspořádání pracoviště

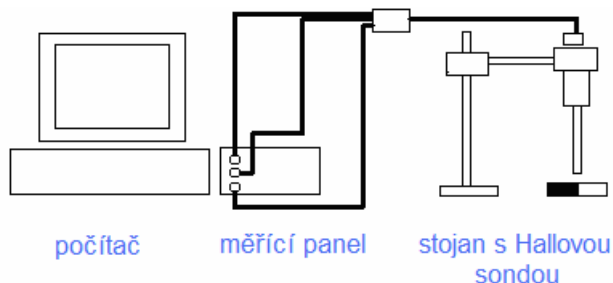


Pomůcky

PC s panelem IP Coach, stojan s Hallovou sondou, plexisklo s rastrem, magnety.

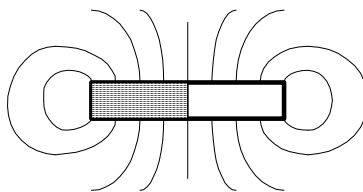
Teorie

Schéma zapojení Hallové sondy je na obrázku 10.1.



Obr. 10.1

Rozložení magnetického pole v okolí magnetů se většinou zjišťuje pomocí kovových pilin. V této úloze se nejprve proměří v okolí magnetu hodnoty B velikosti magnetické indukce a magnetické siločáry se sestrojují jako kolmice k naměřeným křivkám $B = konst.$



Obr. 10.2

Na obrázku 10.2 jsou zakresleny křivky $B = konst.$ v okolí tyčového magnetu. Najde o magnetické siločáry.

Výhodou této metody je, že ke zjištění rozložení magnetického pole není zapotřebí kovových pilin.

Postup práce



- 1) Zkontrolujte uspořádání měřicího pracoviště a na počítači spusťte program Číslicový panel systému IP COACH (spusťte soubor go.bat v adresáři IP_COACH a vyberte Programy / Číslicový panel / Panely / A-D měření / Měření).
- 2) Na volný list papíru si obkreslete tužkou obrys magnetu, které budete proměřovat. Na monitoru budete postupně odečítat hodnoty úměrné velikosti magnetické indukce v jednotkách voltů. Vyberte sondou u magnetu určitou hodnotu napětí a vyhledejte v rastru nejbližší místo o stejné hodnotě napětí. Takto pokračujte okolo magnetu dokola, až se dostanete opět k magnetu, ale z druhé strany.
- 3) Výsledkem měření jsou listy papíru s označenými body a se zapsanými hodnotami napětí úměrného magnetické indukci v daných bodech. Propojte body se stejnými hodnotami magnetické indukce, čímž získáte křivky $B = konst.$
- 4) Do rastru zakreslete několik vhodně zvolených siločar magnetického pole (kolmých na křivky $B = konst.$).
- 5) Proměřte výše uvedeným způsobem jednotlivé typy permanentních magnetů.

Výstupy



Pro každý proměřený magnet list papíru se zakreslenými křivkami $B = konst.$ a magnetickými siločarami.

Kontrolní otázky



- 1) Definujte veličinu magnetická indukce.
- 2) Definujte magnetickou siločáru.
- 3) Jaký je vztah mezi magnetickou siločárou a křivkou $B = konst.$?
- 4) K čemu se používá a jak funguje Hallova sonda?
- 5) Jakou jinou metodu pro zjištění průběhu magnetických siločar znáte?

11. Měření na jednofázovém transformátoru

Úkoly

Sestavte jednoduchý magnetický obvod – transformátor a proveďte na něm základní měření:

- 1) Ověřte, že poměr primárního napětí ku sekundárnímu napětí transformátoru je dán poměrem počtu závitů primární a sekundární cívky.
- 2) Proměřte závislost indukovaného napětí na sekundární cívce vzhledem k šířce vzduchové mezery mezi segmenty magnetického obvodu.
- 3) Proměřte geometrické parametry magnetického obvodu, načrtněte průběh indukčních čar a vypočtěte přibližnou hodnotu velikosti vektoru magnetické indukce v jádře.



Pojmy k zapamatování

Magnetický obvod, transformátor, primární obvod, sekundární obvod, magnetická indukce, měření naprázdno.



Uspořádání pracoviště



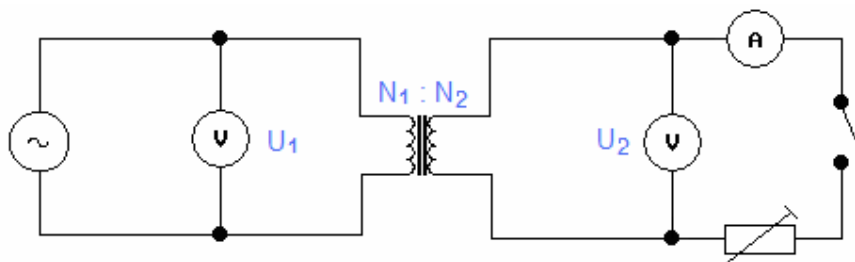
Pomůcky

Regulační transformátor 0-30 V, 2x multimetr (zapojený jako voltmetr), cívky (300 z, 600 z, 600 z a 1200 z), železné segmenty, ze kterých je možné sestavit uzavřené jádro, dva segmenty na měření se vzduchovou mezerou, plechy z Fe, Cu, Al, Zn, Pb, mikrometrické měřítko, reostat 18 Ω (jako zátěž), spínač.

Teorie

Schéma měření je na obrázku 11.1. Pokud v sekundárním obvodu není zapojen spotřebič (spínač je rozepnut), jedná se o tzv. *zapojení naprázdno*. Magnetický tok, buzený zejména primárním proudem (proud v sekundárním obvodu je proud protékající voltmetrem, a tedy zanedbatelně malý) se uzavírá železným jádrem (neuvažujeme rozptyl).





Obr. 11.1

Velikost magnetické indukce B spočítáme lehce z Faradayova indukčního zákona. Protože napětí U_2 je napětí indukované na cívice s N_2 závitů a ploše závitů S , musí podle uvedeného zákona platit

$$U_2(t) = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(B(t)N_2S)}{dt} = -N_2S \frac{dB(t)}{dt}.$$

Protože B je harmonickou funkcí času (napájíme střídavým proudem, magnetickou nelinearitu nyní zanedbáme), dostaneme pro derivaci vztah

$$\frac{dB(t)}{dt} = \frac{d(B_m \cos(\omega t))}{dt} = -\omega B_m \sin(\omega t),$$

kde jsme označili amplitudu jako B_m . Po dosazení do vztahu pro U_2 dostáváme

$$U_2(t) = N_2 S \omega B_m \sin(\omega t).$$

Vidíme, že $U_2(t)$ je harmonickou funkcí s amplitudou $N_2 S \omega B_m$, a tedy pro efektivní hodnoty (z voltmetru odečítáme právě efektivní hodnotu U_2) platí rovnice

$$U_2 = N_2 S \omega B,$$

ze které konečně dostáváme vztah pro výpočet efektivní hodnoty velikosti magnetické indukce

$$B = \frac{U_2}{N_2 S \omega}.$$

Postup práce



- 1) Ověřte, že poměr primárního napětí ku sekundárnímu napětí transformátoru je dán poměrem počtu závitů primární a sekundární cívky. Ověření proveďte tak, že zvolte pět různých kombinací cívek a pro každou kombinaci změřte požadovaná napětí, vše v zapojení naprázdno. Výsledky zpracujte do tabulky.
- 2) Speciálně proměřte napětí indukované na jednom závitě vodiče obtočeného kolem sekundární cívky a ověřte, zda je v patřičném poměru k napětí indukovanému na celé sekundární cívice.
- 3) Pro volbu cívek $N_1 = 300$ z, $N_2 = 600$ z v zapojení naprázdno proveďte závislost převodního poměru na materiálu jádra následujícím způsobem. Na část jádra ve tvaru U přikládejte postupně segment ze skládaných plechů (průřez 30×30 mm), plechy z Fe, Cu, Al, Zn, Pb a jako poslední možnost uvažujte vzduch (nepřikládejte nic) a měřte napětí v primárním a sekundárním obvodu.

- 4) Pro volbu cívek $N_1 = 300$ z, $N_2 = 600$ z v zapojení naprázdno proměřte závislost indukovaného napětí na sekundární cívce vzhledem k šířce vzduchové mezery mezi segmenty magnetického obvodu. Začněte maximální šířkou mezery a postupně ubírejte až k nule. Každý segment má 5 poloh, celkem tedy budete mít 11 hodnot. Zapište do tabulky a vynesete do grafu.
- 5) Spínačem zapojte zátěž v sekundárním obvodu a pro různá uzavření jader (podle bodu 3) zaznamenejte závislost sekundárního napětí a proudu na primárním napětí.
- 6) Proměřte geometrické parametry magnetického obvodu, načrtněte průběh indukčních čar a vypočtete přibližnou hodnotu velikosti vektoru B v jádře pro všechna měření z bodu 1) a uveďte je do téže tabulky.

Výstupy

- 1) Tabulka naměřených hodnot napětí na primární a sekundární cívce a porovnání jejich poměru s poměrem počtu závitů primární a sekundární cívky. Do příslušných řádků tabulky jsou doplněny i naměřené a vypočtené hodnoty z bodu 6 postupu práce.
- 2) Tabulka naměřených hodnot a příslušný graf závislosti indukovaného napětí na sekundární cívce na šířce vzduchové mezery v magnetickém obvodu.
- 3) Tabulka převodních poměrů pro různá uzavření jader (podle bodu 3 postupu práce).
- 4) Tabulka měření při zátěži, grafy závislosti sekundárního napětí na primárním napětí pro různá uzavření jader (v jednom obrázku) a graf závislosti sekundárního proudu na primárním napětí pro různá uzavření jader (v jednom obrázku).
- 5) Náčrtek průběhu magnetických siločar v obvodu.



Kontrolní otázky

- 1) Vysvětlete termín magnetický obvod.
- 2) K čemu se používá transformátor? Na jakém principu je založen?
- 3) Definujte magnetickou siločáru.
- 4) Formulujte Faradayův indukční zákon.



12. Měření magnetického momentu a magnetizace

Úkoly

Změřte magnetický moment a magnetizaci různých typů permanentních magnetů.

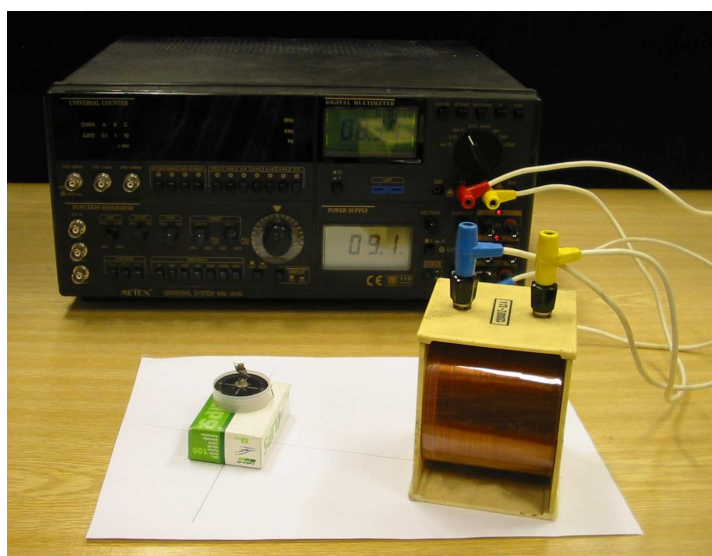


Pojmy k zapamatování

Permanentní magnet, magnetický moment, magnetizace, princip shodného účinku.



Uspořádání pracoviště

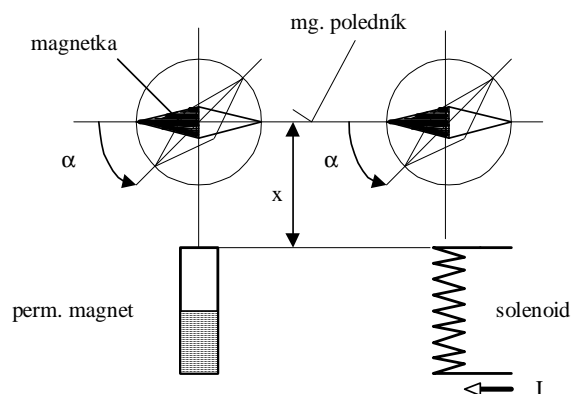


Pomůcky

Měřicí systém MS-9150 (použit zdroj stejnosměrného napětí a voltmetr), cívka 12000 z, magnety různých tvarů, kompas, pravítko.

Teorie

Schéma postupu měření ukazuje obrázek 12.1.



Obr. 12.1

Magnetický moment solenoidu je vektor definovaný vztahem

$$\vec{m} = N \cdot I \cdot \vec{S}, \quad (12.1)$$

kde I je proud protékající solenoidem, N je počet závitů, S je střední plocha solenoidu kolmá k jeho ose. Magnetický moment charakterizuje zdroj magnetického pole.

Magnetizace je vektor, definovaný vztahem

$$\vec{M} = \frac{\vec{m}}{V}, \quad (12.2)$$

kde V je objem magnetu. Magnetizace udává objemovou hustotu magnetického momentu.

Princip shodného účinku umožňuje stanovit magnetické momenty permanentních magnetů. Podle tohoto principu stejné pootočení stříelky busoly (kompasu) znamená za předpokladu stejné vzdálenosti od magnetu, resp. solenoidu stejnou velikost budící veličiny – magnetického momentu busoly (kompasu) a solenoidu.

Postup práce



- 1) Ke zdroji stejnosměrného napětí (zatím je vypnutý) připojte solenoid. K měření použijte busolu nebo magnetku s úhloměrem a nastavte ji na nulu, na tzv. magnetický poledník.
- 2) Ve vzdálenosti x umístěte permanentní magnet tak, aby jeho magnetická osa byla kolmá k magnetickému poledníku a ležela v rovině otáčení busoly (viz obrázek 1). Vzdálenost x zvolte takovou, aby výchylka busoly byla např. 45 stupňů.
- 3) Permanentní magnet nahraďte solenoidem o známé ploše S a počtem závitů N . Solenoid umístěte ve stejné vzdálenosti jako permanentní magnet. Velikostí proudu I nastavte shodnou výchylku busoly. Pak lze prohlásit, že velikost magnetického momentu permanentního magnetu je podle vztahu (12.1) roven $m = N \cdot I \cdot S$.
- 4) Postup opakujte pro jednotlivé typy permanentních magnetů.
- 5) Hodnoty magnetizací M stanovte podle vztahu (12.2), zapište do tabulky a proveďte srovnání.

Výstupy



- 1) Tabulka, ve které jsou pro každý proměřený magnet příslušné naměřené a vypočtené veličiny včetně velikosti magnetického momentu a magnetizace.
- 2) Porovnání magnetů dle velikosti magnetizace.

Kontrolní otázky



- 1) Vysvětlíte vliv magnetického pole na magnetku busoly (kompasu).
- 2) Zformulujte vlastními slovy princip shodného účinku.
- 3) Definujte veličinu zvanou magnetický moment.
- 4) Definujte veličinu zvanou magnetizace.
- 5) Jak se vypočte magnetický moment solenoidu? Na jakých veličinách závisí?
- 6) Jakým způsobem by se dal zvětšit magnetický moment solenoidu bez zvětšování počtu závitů?

Literatura



Teorie

- 1) LIAO, S., DOURMASHKIN, P., BELCHER, J. W., *Elektřina a magnetismus (kurz MIT Physics 8.02)*. <http://www.aldebaran.cz/>, 2006.
- 2) HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J., *Fyzika, část 3*. 1. vydání Brno: VUTIUM, 2000.
- 3) MECHLOVÁ, E. A KOL., *Výkladový slovník fyziky pro základní vysokoškolský kurz fyziky*. 1. vydání Praha: Prometheus, 1999.

Měření

- 4) BROŽ, J. A KOL., *Základy fyzikálních měření I*. 2. vydání Praha: SPN, 1983.
- 5) BROŽ, J. A KOL., *Základy fyzikálních měření II*. 1. vydání Praha: SPN, 1974.
- 6) MÁDR, V., KNEJZLÍK, J., KOPEČNÝ, J. *Fyzikální měření*. Praha: SNTL, 1991.
- 7) HAJKO, V. A KOL., *Fyzika v experimentoch*. 1. vydání Bratislava: Veda, 1988.
- 8) SMÉKAL, P., *Fyzikální praktikum II*. 1. vydání Ostrava: PdF OU, 1981.
- 9) LYSENKO, V., *Fyzikální praktikum II*. 1. vydání Ostrava: PŘF OU, 2003.