



Atomfizika és elektromosságban laboratóriumi gyakorlatok

A gyakorlatokat összeállította: **Dr. BOHUS JÁNOS**
egyetemi adjunktus

Dr. FÜLE MIKLÓS
egyetemi docens

Lektorálta: **Dr. HEVESI IMRE**
professzor emeritus
a fizikai tudomány doktora (az MTA doktora)

Szeged 2014



TÁMOP-4.1.1.C-12/1/KONV-2012-0005 projekt



„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

Atomfizika és elektromosságtan laboratóriumi gyakorlat

1.

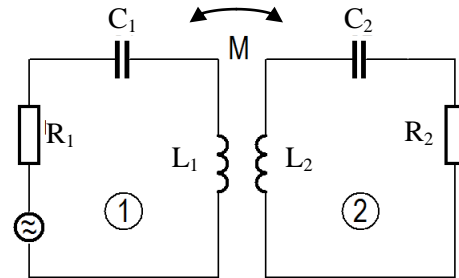
CSATOLT REZGŐKÖRÖK VIZSGÁLATA

- Célkitűzés:**
- induktív csatolású rezgőkörök *kényszerített csatolt rezgéseinek* vizsgálata a csatolási és jósági tényező különböző értékei mellett,
 - induktív csatolású rezgőkörök *szabad csatolt rezgéseinek* tanulmányozása energiaátadás szempontjából.

A gyakorlatot összeállította: *dr. Bohus János* egyetemi adjunktus
SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék

I. Az 1. gyakorlathoz kapcsolódó fizikai alapismeretek

- **Csatolt rezgések.** Csatolt rezgőkörökről, ill. csatolt rezgésekről beszélünk akkor, ha két (vagy) több rezgőkör olyan kapcsolatban van egymással, hogy energiaátadás folytán egymás rezgéseit befolyásolhatják. Az 1. ábrán két rezgőkör (az ① primer kör és a ② szekunder kör) közti csatolás *induktív alaptípusa* valósul meg. Annak megfelelően, hogy az egyik kör (az 1. ábrán az ① gerjesztő kör) – a rezgések állandó fenntartása céljából – tartalmaz egy $U = U_m \sin \omega t$ feszültségű



1. ábra

áramforrást vagy sem, *kényszerített* vagy *szabad csatolt rezgések* különböztethetők meg. Az induktív csatolás erősségét az M kölcsönös induktivitás és az L_1, L_2 induktivitások szabják meg. Két tekercs közötti legszorosabb csatolásnak megfelelő M_{max} kölcsönös induktivitás az L_1 és L_2 geometriai középárányosa: $M_{max} = \sqrt{L_1 L_2}$ (l. javasolt irodalom). A tekercsek közötti induktív csatolás szoros vagy laza aszerint, hogy M viszonylag nagy vagy kis értékű. Az M/M_{max} hányadost csatolási tényezőnek (k) nevezzük:

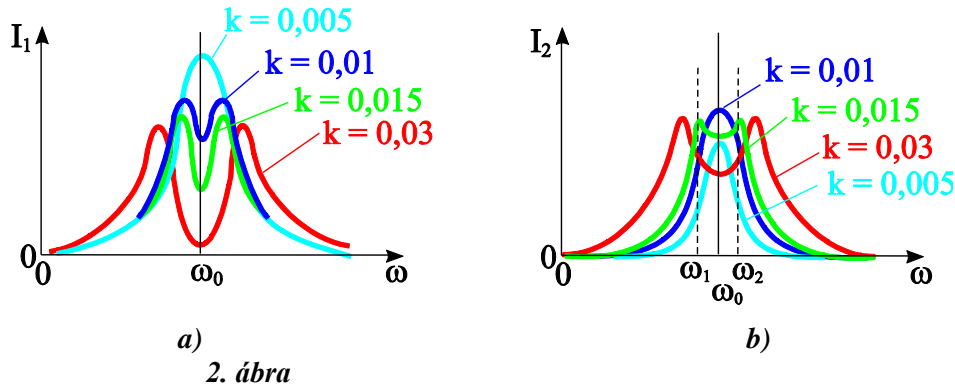
$$k = \frac{M}{M_{max}} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (0 \leq k \leq 1).$$

Az ① és ② rezgőkörben folyó I_1 és I_2 áram meghatározása céljából mindkét körre a *Kirchhoff*-féle huroktörvényt kellene felírunk, figyelembe véve azt, hogy a kölcsönös indukció folytán az ①, ill. a ② körben a $-M \frac{dI_2}{dt}$, ill. $-M \frac{dI_1}{dt}$ elektromotoros erő is fellép.

Az ily módon nyert két másodrendű differenciálegyenletből álló rendszer megoldása adja az I_1, I_2 áramokat, mint az idő függvényét (l. javasolt irodalom).

- **Kényszerített csatolt rezgések esetében az I_1 és I_2 áramok a két rezgőkör $R_1, L_1, C_1, R_2, L_2, C_2$ paraméterein és a k csatolási tényezőkön kívül nagymértékben függenek az $U_m \sin \omega t$ gerjesztő feszültség körfrekvenciájától is. Az ω -tól való függést feltüntetve $I_1 = I_1(\omega)$ és $I_2 = I_2(\omega)$ *csatolási rezonanciagörbék* – amelyek a már említett differenciálegyenletek megoldása útján állapíthatók meg – $R_1, L_1, C_1, R_2, L_2, C_2$ és k értékei szerint igen különbözők lehetnek.**

Két teljesen egyforma rezgőkör esetében ($R_1 = R_2 = R, L_1 = L_2 = L, C_1 = C_2 = C$), a 2a. ábrán az $I_1 = I_1(\omega)$ görbék, a 2b. ábrán az $I_2 = I_2(\omega)$ görbék láthatók, k különböző értékei mellett. Látható, hogy pl. az $I_2 = I_2(\omega)$ görbe igen *laza csatolásnál egy maximummal bír*, az egyes körök közös $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ saját körfrekvenciájánál. Viszont *szorosabb csatolásnál a görbének két maximuma van* az $\omega_1 = \omega_0 / \sqrt{1+k}$ és az $\omega_2 = \omega_0 / \sqrt{1-k}$ csatolási körfrekvenciáknál. A csatolás szorosságának növelésével a két maximum egyre jobban szétválik egymástól.



Azonos frekvenciára hangolt rezgőkörök esetén az eredetileg egyetlen ω_0 „frekvenciavonal” a kölcsönhatás következtében bekövetkező „felhasadása” látható a 3. ábrán. Hasonló felhasadás észlelhető mikrorezgőrendszerek – atomok, molekulák – kölcsönhatása következtében is.

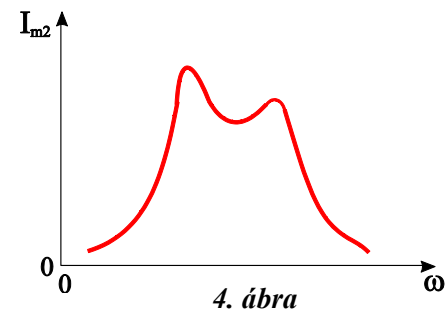
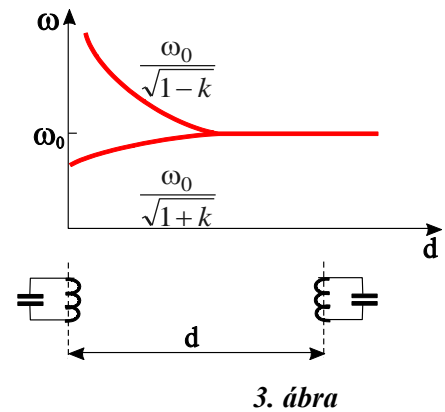
“Széthangolt” rezgőkörökből álló rendszerek esetén, vagyis ha az egyes rezgőköröket kissé különböző frekvenciára hangoljuk, és a rezgőkörök jósági tényezője ($Q_0 = L\omega_0 / R$) sem egyezik meg, akkor a szekunder kör frekvenciakarakterisztikája asszimmetrikussá válik (4. ábra). A széthangolás hatása sokkal inkább észrevehető a primér kör frekvenciagörbéjén, mint a szekunder kör frekvenciakarakterisztikáján, sőt, ha a széthangolás nagymértékű, akkor a primér kör áramgörbéjének csak egy maximuma lesz, tekintet nélkül arra, hogy a szekunder kör frekvenciakarakterisztikáján két élesen kifejezett maximum jelentkezik.

- **Szabad csatolt rezgések** akkor keletkeznek, ha a külső áramforrást nem tartalmazó rezgőkörök egyikét pl. feszültségimpulzussal hozzuk rezgésbe. Az általában bonyolult folyamat lényegesen egyszerűbb két teljesen egyforma rezgőkör esetén. Ekkor a számítás szerint mind az I_1 , mind pedig az I_2 áram két csillapodó szinuszrezgés szuperpozíciójaként írható fel:

$$I_{1,2} = A_1 e^{-\beta t / (1+k)} \cdot \sin(\omega_1 t + \alpha_1) \pm A_2 e^{-\beta t / (1-k)} \cdot \sin(\omega_2 t + \alpha_2) ,$$

ahol $A_1, A_2, \alpha_1, \alpha_2$ a kezdeti feltételekből meghatározható állandók. A $\beta = R/2L$ a csillapítási tényező, az

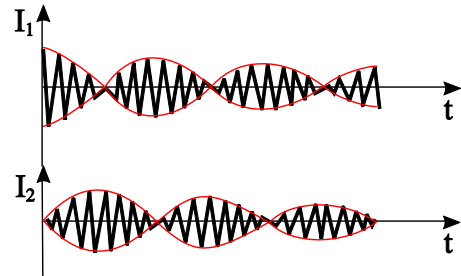
$$\omega_1 = \frac{\omega_0}{\sqrt{1+k}} = \frac{1}{\sqrt{(L+M)C}} , \quad \omega_2 = \frac{\omega_0}{\sqrt{1-k}} = \frac{1}{\sqrt{(L-M)C}}$$



„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

a csatolási körfrekvenciákat jelenti. Ezek a két kör közös $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ saját-körfrekvenciájától és egymástól annál kevésbé különböznek, minél lazább a csatolás.

Elégg *laza csatolás* ($k \ll 1$) és kis csillapodás esetén a csak kissé különböző frekvenciájú két szinuszrezgés összetevődésének eredményeképpen *mindkét rezgő-körben a lebegés jelensége lép fel*: az I_1 és I_2 áramok az idővel az 5. ábrán vázolt módon változnak. A görbék lefutása fizikailag nyilván azzal magyarázható, hogy az ① kör maximális amplitúdóval kezdődő rezgéseinek energiáját nagy részben a ② kör veszi át, és ezért az ① kör rezgéseinek amplitúdói hamarosan, közelítőleg zérusra csökkennek, a ② kör rezgés-amplitúdói viszont maximális értékre növekednek, majd ezt követően a két kör az energiaátadás szempontjából periodikusan szerepet cserél.



5. ábra

II. A mérés menete

A csatolt rezgések vizsgálatához az 1. ábrán látható elrendezést alkalmazzuk. A gyakorlat során 4 db egyforma tekercset használunk, amelyek közös tengelyre, egymás mellé vannak felfűzve. A négy tekercs közül mindig kettőt kiválasztva, három különböző távolság állítható be. A többi áramköri elem (ellenállások és kondenzátorok) egy panelon található ($R_1 \approx R_2$, $C_1 \approx C_2$, a tekercsek menetszáma is közel egyenlő: $N_1 \approx N_2$). A rezgőkörök hangolása a tekercsekbe betolható ferrit maggal valósítható meg.

• Kényszerített csatolt rezgések vizsgálata

Két csatolt, ugyanarra a frekvenciára hangolt rezgőkör vizsgálata. Mivel a négy tekercs azonos menetszámú és $R_1 \approx R_2$, $C_1 \approx C_2$, ezért a két rezgőkör frekvenciája vasmag behelyezése után is azonos. A rezgőkörök f_0 rezonanciafrekvenciájának meghatározása külön-külön úgy történik, hogy az ellenállás és az induktivitás közé $U = U_m \sin \omega t$ feszültséget szolgáltató áramforrást kapcsolunk. Rezonancia esetén az R_1 és az R_2 ellenállásokon eső feszültségek maximális értékűek. Ezután, az egyik szélső tekercs és az ellenállás közé kapcsoljuk a jelgenerátor jelét, míg a másik rezgőkör legyen mindig zárt. A másik tekercs változtatásával (annak az elsőhöz való közelítésével vagy távolításával) változtathatjuk az M kölcsönös induktivitást, ill. a k csatolási tényezőt. A rezgőkörben folyó áramok az ellenállásokon eső feszültségekből *Ohm* törvénye alapján számolható.

„*Széthangolt*” rezgőkörök vizsgálata az előbbieken leírt módon történik, azzal a különbséggel, hogy most az ①-es kör rezonancia frekvenciáját az állandónak tartott f_0 -ról különböző értékre hangoljuk a vasmag segítségével.

• Szabad csatolt rezgések vizsgálata

Az előző pontban leírtak szerint hangoljuk a rezgőkört két azonos f_0 rezonancia-frekvenciára. Szomszédos tekercsek estén ez nem igényel vasmagot, de távolabb lévő tekercsek esetén a csatolás erősítése (és a rezgőkörök hangolása) a vasmagok által lehetséges. Az ellenállásokat rövidre zárva a gerjesztő körre kapcsolt szinuszos jelet, alkalmasan megválasztott frekvenciájú négyszögjellel váltunk fel. A kondenzátorokon eső feszültséget kétcsatornás oszcilloszkóppal vizsgálja. A tekercsek helyének változtatásával a rezgőkörök energiaátadási folyamatának időbeli változása vizsgálható.

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

III. Mérési feladatok és számítások

1. Mérőműszerrel mérje meg a rezgőkörök R_1 , R_2 ellenállásainak, R_{L1} , R_{L2} , R_{L3} , R_{L4} tekercsellenállásainak, valamint C_1 , C_2 kapacitásainak értékeit!
2. Hangolja a két rezgőkört azonos f_0 frekvenciára. Számítsa ki a két rezgőkör tekercsének önindukciós együtthatóját!
3. A $\Delta\omega$ félérték-szélesség mérésével mindkét rezgőkör esetében határozza meg a Q_0 rezonancia jósági tényezőt és L , C ismeretében számítsa ki az R_v veszteségi ellenállás (a rezgőkörben fellépő nem *Ohmos* veszteségek) értékét!
4. A k csatolási tényező változtatásával vizsgálja meg az I_1 -t és I_2 -t az ω függvényében! Egy alkalmasan választott tekercstávolság mellett $I_2(\omega)$ mérésével határozza meg a csatolási tényező értékét!
5. Hangolja az ① jelű rezgőkört $f_2 \neq f_0$ frekvenciára! Határozza meg a tekercs önindukciós együtthatóját és a rezgőkör jósági tényezőjét! A csatolási tényező változtatásával ismét vizsgálja meg az $I_1(\omega)$ és $I_2(\omega)$ görbék menetét. Vesse össze tapasztalatait a 4. feladatban kapott eredményeivel!
6. Vizsgálja meg szabad csatolt rezgések esetén a rezgőkörök energiaátadási folyamatának időbeli lefolyását!

IV. Ellenőrző kérdések

1. Alkothat-e rezgőkört egy induktív tekercs a saját menetei között fellépő parazita kapacitással?
2. Miként valósítana meg két olyan rezgőkört, amelynek rezonanciafrekvenciája kissé különböző, de jósági tényezője azonos?
3. Szabad csatolt rezgések vizsgálatakor miért zárjuk rövidre az ellenállásokat?
4. A rezgőkörökben folyó áramokat egy beépített ellenálláson eső feszültség mérésén keresztül határoztuk meg. Meghatározhatnánk-e úgy is az áramokat, hogy az oszcilloszkópot *50 ohmos* vagy *75 ohmos* bemeneti ellenállású állapotba kapcsoljuk és ezt az ellenállást használjuk fel munkaellenállásként?
5. Csökkenthető-e és hogyan egy légmagos tekercs induktivitása anélkül, hogy geometriai méreteit és menetszámát megváltoztatnánk?
6. Milyen gyakorlati alkalmazása van a csatolt rezgőköröknek?

V. Felhasznált és ajánlott irodalom

1. Hevesi I.: Elektromosság, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1998.
2. Budó Á.: Kísérleti Fizika II., Tankönyvkiadó, Budapest, 1968.
3. Simonyi K.: Villamosság, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1983.
4. Szmirenyin B. A.: A rádiótechnika kézikönyve, Nehézipari Könyv- és Folyóiratkiadó Vállalat, Budapest, 1952.
5. Michailovits L.: III. éves fizikai laboratóriumi gyakorlatok, JATEPress, Szeged, 2004.



„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

Az 1. számú laboratóriumi gyakorlat ábrái a Michailovits L.: III. éves fizikai laboratóriumi gyakorlatok (JATEPress, Szeged, 2004) című jegyzet 20. gyakorlatának ábrái alapján készültek.



TÁMOP-4.1.1.C-12/1/KONV-2012-0005 projekt



„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

Atomfizika és elektromosságtan laboratóriumi gyakorlat

2.

SOROS RLC REZGŐKÖR VIZSGÁLATA

- Célkitűzés:**
- szinuszosan váltakozó feszültséggel táplált soros *kapcsolású RLC* körben létrejött *kényszerrezgés és feszültségrezonancia* („soros rezonancia”) vizsgálata,
 - a kényszerrezgést létrehozó áramforrás frekvenciájának függvényében *a rezgőkör néhány paraméterének a meghatározása.*

A gyakorlatot összeállította: *dr. Bohus János* egyetemi adjunktus
SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék

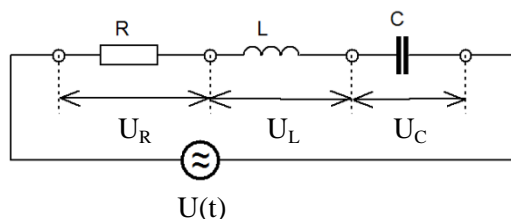


„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

I. A 2. gyakorlathoz kapcsolódó fizikai alapismeretek

• Kényszerrezgések soros RLC körben.

Számítsuk ki az 1. ábrán látható soros RLC körben folyó $I=I(t)$ áramot, ha a körbe $U(t)=U_m \sin \omega t$ váltakozó feszültségű áramforrást kapcsolunk be.. Megjegyezzük, hogy feltételezésünk szerint R (a teljes zárt kör ohmos ellenállását jelenti), L és C állandó értékű és az áramerősségtől független un. lineáris kapcsolási elemek.



1. ábra

Ha az intenzitás időpontban $I=I(t)$, akkor az áramforrás $U_m \sin \omega t$ feszültségéhez hozzájárul a tekercs két vége közti $-L di/dt$ önindukciós feszültség, továbbá a kondenzátor pillanatnyi Q töltéséből származó $-Q/C$ feszültség, és így Kirchhoff második törvénye alapján:

$$IR = -\frac{Q}{C} - L \frac{dI}{dt} + U_m \sin \omega t .$$

A kondenzátort is feszültségforrásként tekintve, a Kirchhoff-törvénynek megfelelően a kondenzátor feszültségét $-Q/C$ -nek kell vennünk, mert a Q/C feszültség pozitív Q esetén egymagában a választott körüljárási iránnyal ellentétes irányú áramot hozna létre. A Q töltést a fenti egyenletben $I = dQ/dt$ definíció alapján eliminálva, és az egyenletet az idő szerint differenciálva, majd rendezzük, akkor azt kapjuk, hogy

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} + \frac{1}{C} I = U_m \sin \omega t .$$

Ennek a differenciálegyenletnek a megoldásként (a bekapcsolás után rövidesen kialakuló állandósult állapotban) a körben folyó áramerősséget az

$$I = I_m \sin(\omega t - \varphi)$$

kifejezéssel írhatjuk le, ahol φ az $U=U_m \sin \omega t$ feszültség és az I áram közötti fázis-eltolódást jelenti. Egyszerű számítás a következő fontos eredményre vezet:

$$\varphi = \arctg \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}$$

és

$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}} .$$

Megállapítható, hogy az *Ohm* törvény a szinuszosan váltakozó áramra is érvényes, csak az ohmos R ellenállás szerepét a soros *RLC* kör esetén a

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$$

„váltakozó áramú ellenállás” vagy (impedancia) veszi át: A Z a következőképpen is írható:

$$Z = \frac{U_m}{I_m} \left(= \frac{U_{eff}}{I_{eff}}, \text{ ahol } U_{eff} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, I_{eff} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \right).$$

A soros RLC-kör Z impedanciája és a φ fáziskülönbség egyszerű geometriai szerkesztéssel is meghatározható.

Figyelembe véve, hogy a soros RLC-körben az ellenálláson $U_R = IR$, a kondenzátoron $U_C = Q/C$ és a tekercsen $U_L = Ldi/dt$ feszültség esik, azt írhatjuk, hogy

$$U_R + U_C + U_L = U_m \sin \omega t .$$

(Ez az összefüggés csak a pillanatnyi értékekre érvényes, az effektív értékekre nem!)

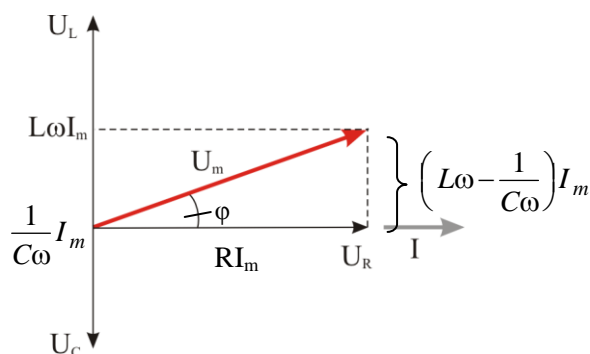
Megmutatható (l. ajánlott irodalom), hogy

$$U_R = RI_m \sin \omega t ,$$

$$U_C = \frac{1}{C\omega} I_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right),$$

$$U_L = L\omega I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right),$$

azaz a kondenzátoron fellépő feszültség fázisban $\pi/2$ -vel késik, míg az indukciós tekercsen fellépő feszültség $\pi/2$ -vel siet az áramhoz képest. A fázisviszonyokat jól szemlélteti a 2. ábrán látható vektordiagram.



2. ábra

• „Rezonanciaeset”.

Az előzőekben láttuk, hogy a Z impedancia és a φ fáziskülönbség is a R, L, C, ω mennyiségektől függ. Megadott R mellett Z -nek minimuma van az

$$L\omega = \frac{1}{C\omega}$$

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

vagy az

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0$$

ún. „rezonanciaesetben”, azaz ha az ω gerjesztési frekvencia egyenlő a csillapodás nélküli rezgőkör ω_0 saját-körfrekvenciájától.

Az I_m -et mint az ω függvényét feltüntető görbét ($I_m = I_m(\omega)$), *rezonanciagörbének* nevezzük. A maximum annál kifejezettebb, vagyis a *rezonancia annál élesebb*, minél kisebb a rezgőkör csillapodása (minél nagyobb a „jósága”), azaz minél kisebb a

$$\beta = \frac{R}{2L}$$

csillapítási tényező (l. 3. ábra), vagy a

$$A = \frac{\pi R}{L\omega_0}$$

logaritmikus dekrementum.

Ez az eredmény még világosabban kitűnik, ha a rezonanciagörbe egyenletét az

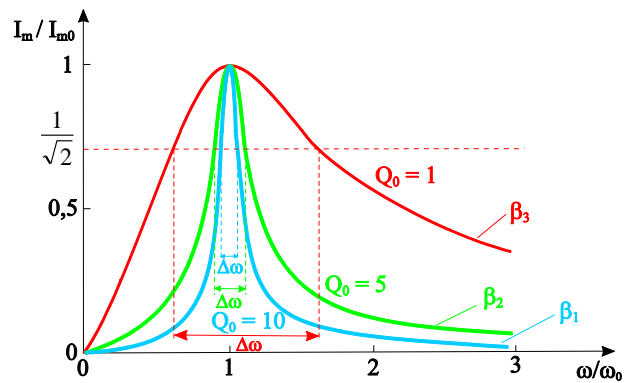
$$L\omega = 1/C\omega \text{ és } \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0 \text{ figyelembe}$$

vételével átalakítjuk. A $C = 1/L\omega_0^2$, illetve $1/C\omega = L\omega_0^2/\omega$ értékek behelyettesítése után a rezonanciagörbe egyenletére és φ -re a következő kifejezéseket kapjuk:

$$I_m = \frac{U_m}{L} \frac{\omega}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\beta^2\omega^2}}$$

és

$$\varphi = \arctg \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{2\beta\omega}$$



3. ábra

- **Feszültségrezonancia.** Az $U = U_m \sin \omega t$ forrásfeszültség hatására $I = \left(\frac{I_m}{Z}\right) \sin(\omega t - \varphi)$ árammal átjárt soros RLC-körben az R , L , C kapcsolási elemeken, mint fogyasztókon fellépő feszültségek:

$$U_R = IR = \frac{R}{Z} U_m \sin \omega t ,$$

$$U_L = IL\omega = \frac{L\omega}{Z} U_m \sin(\omega t) + \frac{\pi}{2} ,$$

$$U_C = \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{C\omega Z} U_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) .$$

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

Speciálisan, *rezonanciaesetben* (amikor $L\omega = \frac{1}{C\omega}$, $Z = R$ és $\varphi = 0$) azt írhatjuk, hogy

$$U_{0R} = U_m \sin \omega_0 t = U,$$

$$U_{0L} = \frac{L\omega_0}{R} U_m \cos \omega_0 t,$$

$$U_{0C} = -\frac{L\omega_0}{R} U_m \cos \omega_0 t.$$

Az U_L és U_C összege minden időpontban zérus, ezért egyenlő az U forrásfeszültség az U_R feszültséggel. A fenti eredményekből az is következik, hogy az önindukciós tekercsen és a kondenzátoron fellépő U_L , U_C feszültségek sokszorosan ($L\omega/R$ -szer) felülmúlhatják az U forrásfeszültséget:

$$U_{L,eff} = U_{C,eff} = \frac{L\omega}{R} U_{eff}.$$

A fentiek miatt megfelelően összeállított soros RLC -kör esetében $L\omega/R$ egynél jóval nagyobb lehet, úgyhogy a tekercs végei között is és a kondenzátor sarkai között is a forrásfeszültségnél jóval nagyobb feszültséget mérhetünk. A fentiek miatt a soros rezonanciát más néven *feszültségrezonanciának* hívják.

Megjegyezzük, hogy a rezgések általában nemcsak az „*ohmos* veszteségek” miatt csillapodnak, hanem egyéb energiaveszteségek miatt is. Ilyenek pl. a vasmagos tekercsek vasmagjában létrejövő örvényáramú- és hiszterézisveszteségek, továbbá a kondenzátorokban a dielektrikumnak a vezetőképességgel járó hőfejlődésen felüli felmelegedését előidéző dielektromos veszteségek. A rezgőkörben fellépő nem *ohmos* veszteségek alkalmas „*veszteségi ellenállással*” vehetők figyelembe, úgyhogy R -en az *ohmos* ellenállás és a veszteségi ellenállás összege értendő.

• **A rezgőkör jósági tényezője.** A rezgőkör „jóságát” számszerűen a Q_0 rezonancia *jósági tényezővel* jellemezhetjük, amely annál nagyobb, minél kisebb az R_v veszteségi ellenállás, vagy másként: „minél jobb a rezgőkör”. A jósági tényező megadható a

$$Q_0 = \frac{L\omega_0}{R_v},$$

illetve a

$$Q_0 \left(= \frac{L\omega_0}{R_v} \right) = \frac{1}{R_v C \omega_0} = \frac{1}{R_v} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

összefüggéssel (*l. ajánlott irodalom*).

A rezgőkörök jóságát a Q_0 tényező mellett a $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$ sávszélességgel is szokás jellemezni. Soros rezgőkörnél – állandó kapocsfeszültség esetén – ω_1 és ω_2 azon két körfrekvencia, amelyekre I_m értéke az

$$I_{m,0} = I_m(\omega_0) = \frac{U_m}{2\beta L} = \frac{U_m}{R}$$

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

maximumnak a $\sqrt{2}$ -ed része:

$$I_m(\omega_1) = I_m(\omega_2) = \frac{1}{\sqrt{2}} I_m(\omega_0).$$

Egyszerű számítás szerint az ω_1 és ω_2 kis csillapodás esetén ($\beta^2 \ll \omega_0^2$) a következő értékeket veszük fel:

$$\omega_1 = \omega_0 + \beta,$$

és

$$\omega_2 = \omega_0 - \beta.$$

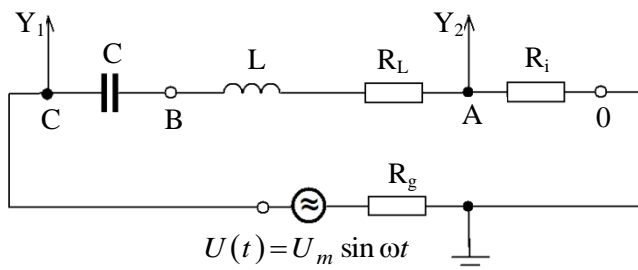
Az $(\omega_1 - \omega_2)/2\pi = \Delta f$ frekvenciakülönbséget, amelyet *félérték-* vagy *rezonanciaszélességnek* (sávszélességnek) nevezünk, az alábbi módon írhatjuk fel:

$$\Delta f = \frac{\beta}{\pi} = \frac{1}{\pi} f_0 = \frac{f_0}{Q_0}.$$

A 3. ábrán különböző jósági tényezőjű rezgőkörök $I_m/I_{m,0}$ értékei láthatók. Vegyük észre, hogy a jósági tényező növekedése a sávszélesség csökkenését eredményezi.

II. A mérés menete

A soros RLC rezgőkör vizsgálatát a 4. ábrán látható kapcsolásban végezzük, ahol R_i a rezgőkörrel sorosan kapcsolt ellenállás, R_g pedig a szinuszosan váltakozó feszültséget kapcsolt ellenállás, R_g



4. ábra

pedig a szinuszosan váltakozó feszültséget szolgáltató generátor belső ellenállását jelöli.

Az 0-A, 0-C csatlakozási pontokon mért U_{0Amax} , U_{0Cmax} feszültségek, valamint a rezgőkörrel sorosan kapcsolt R_i ohmos ellenállás és az $f (= \omega/2\pi)$ frekvencia ismeretében az $I_{max} = I_{max}(\omega)$ és a $Z = Z(\omega)$ Ohm-törvénye alapján egyszerűen számítható (az R_i használatát a fázisszög mérése indokolja):

$$I_{max} = \frac{U_{0Amax}}{R_i},$$

$$Z = \frac{U_{0Cmax}}{I_{max}} = \frac{U_{0Cmax}}{U_{0Amax}} R_i.$$

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

Az $I_{max}=I_{max}(\omega)$ függvény méréséhez, valamint a Q_0 rezonancia jósági tényező meghatározásához biztosítani kell a feszültséggenerátoros táplálás feltételét, azaz U_{0Cmax} -nak állandó értékűnek kell lennie.

A 4. ábrán látható kapcsolásban az R_i ellenállás a rezgőkör veszteségi ellenállását növeli. Emiatt R_i értékét úgy kell megválasztani, hogy $R_i \ll R_L$ feltétel teljesüljön, de U_{0Amax} még jól mérhető legyen.

III. Mérési feladatok és számítások

1. Digitális mérőműszerrel mérje meg C , R_L és R_i értékeit!
2. Állítsa össze a 4. ábrán látható kapcsolást, és határozza meg először az $f_0(=\omega_0/2\pi)$ rezonanciafrekvencia nagyságát, majd számítsa ki L értékét !
3. $0,5 \cdot f_0$ és $1,5 \cdot f_0$ frekvencia-intervallumban legalább 20 alkalmasan választott f értéknél mérje meg és ábrázolja az adott R , L , C paraméterekkel rendelkező rezgőkör $Z=Z(\omega)$, $\varphi=\varphi(\omega)$, valamint az $I_{max}=I_{max}(\omega)$ függvényeit ($R_i \ll R_L$ esetén) !
4. A 3. feladatban kapott mérési eredményei felhasználásával határozza meg $Z_{min} \approx (R_L + R_i)$ értékét!
5. A $\Delta\omega$ félérték-szélességből meghatározva a Q_0 rezonancia jósági tényezőt, L és C ismeretében számítsa ki R_v értékét. Hasonlítsa össze az 1. feladatban mért R_L értékét R_v értékével. Indokolja meg az eltérés okát !
6. Az $\omega = \omega_0$ esetben mérje meg az U_{ABmax} , U_{BCmax} és U_{0Cmax} feszültségek nagyságait, és indokolja az esetleges különbségek okait !

IV. Ellenőrző kérdések

1. A soros RLC rezgőkör impedanciája milyen frekvencián induktív, illetve kapacitív jellegű?
2. A kapocsfeszültség (generátor feszültség) és a körben folyó áramerősség függvényeket $U = U_m \sin(\omega t + \varphi)$, $I = I_m \sin \omega t$, vagy $U = U_m \sin \omega t$, $I = I_m \sin(\omega t + \varphi)$ alakban is felvehetjük. Van-e különbség eme két változat között?
3. A $\varphi = \varphi(\omega)$ kapcsolat meghatározásakor az 0-A, valamint az 0-C pontok között eső feszültségek oszcilloszkóppal történő vizsgálata milyen szemléletes információt hordoz?
4. A mérés során mikor lényeges kikötés az $U_{0Cmax} =$ állandó kapocsfeszültség biztosítása?
5. Mi az a mennyiség, amely a rezonanciagörbe élességét, és ezáltal a rezgőkör jósági tényezőjét befolyásolja?
6. Kétcsatornás oszcilloszkóppal történő mérés esetén lényeges-e az 0 pont földelése?

V. Felhasznált és ajánlott irodalom

1. Hevesi I.: Elektromosságtan, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1998.
2. Fodor Gy.: Elméleti elektrotechnika, Tankönyvkiadó, Budapest, 1979.
3. Javorszkij, B.M. - Detlaf, A.A.: Fizikai zsebkönyv, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1974.
4. Michailovits L.: III. éves fizikai laboratóriumi gyakorlatok, JATEPress, Szeged, 2004



TÁMOP-4.1.1.C-12/1/KONV-2012-0005 projekt



„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

A 2. számú laboratóriumi gyakorlat ábrái a Michailovits L.: III. éves fizikai laboratóriumi gyakorlatok (JATEPress, Szeged, 2004) című jegyzet 17. gyakorlatának ábrái alapján készültek.



„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

Atomfizika és elektromosságtan laboratóriumi gyakorlat

3.

PÁRHUZAMOS REZGŐKÖRÖK VIZSGÁLATA

- Célkitűzés:**
- párhuzamos kapcsolású, szinuszosan váltakozó feszültséggel táplált rezgőkörben létrejövő kényszerrezgés vizsgálata,
 - *a rezgőkör néhány paraméterének meghatározása a kényszerrezgést létrehozó áramforrás frekvenciájának függvényében.*

A gyakorlatot összeállította: *dr. Bohus János* egyetemi adjunktus
SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

I. A 3. gyakorlathoz kapcsolódó fizikai alapismeretek

• **Párhuzamos rezgőkör.** Az 1. ábrán vázolt kör A,B pontjaira kapcsoljunk ismert $U(t) = U_m \sin \omega t$ forrásfeszültséget, és határozzuk meg az osztatlan ágban folyó I és a tekercsen, ill. kondenzátoron átmenő I_L, I_C áramokat. A veszteséges kondenzátort egy soros R_1C taggal, a veszteséges tekercset pedig egy soros R_2L taggal vesszük figyelembe. Az I_C és I_L áramok a következőképpen írhatók:

$$I_C = I_{mC} \sin(\omega t + \varphi_1),$$

$$I_L = I_{mL} \sin(\omega t + \varphi_2),$$

ahol

$$I_{mC} = \frac{U_m}{\sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{C\omega}\right)^2}}, \quad I_{mL} = \frac{U_m}{\sqrt{R_2^2 + (L\omega)^2}},$$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{1}{C\omega R_1}, \quad \operatorname{tg} \varphi_2 = -\frac{L\omega}{R_2}.$$

A főágban folyó $I = I_L + I_C$ áramerősség

$$I = I_m \sin(\omega t + \varphi)$$

alakra hozható, ahol

$$I_m = \sqrt{I_{mC}^2 + I_{mL}^2 + 2I_{mC}I_{mL} \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}$$

és

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_{mC} \sin \varphi_1 + I_{mL} \sin \varphi_2}{I_{mC} \cos \varphi_1 + I_{mL} \cos \varphi_2}.$$

• **Ha a párhuzamos ágak ohmos ellenállása nulla ($R_1 = R_2 = 0$, párhuzamos LC-kör), akkor**

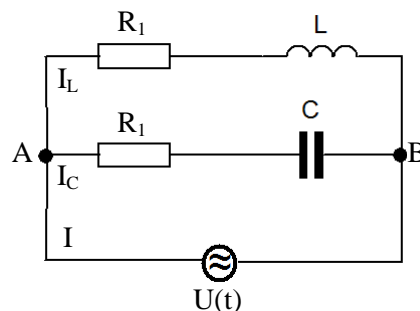
$$I_{mC} = U_m C \omega, \quad I_{mL} = \frac{U_m}{L \omega},$$

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \infty \quad (\varphi_1 = \pi/2), \quad \operatorname{tg} \varphi_2 = -\infty \quad (\varphi_2 = -\pi/2),$$

és

$$I_C = U_m C \omega \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right), \quad I_L = \frac{U_m}{L \omega} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

azaz az áramok a mellékágakban ellentétes fázisúak. Ekkor az I áram a főágban:



1. ábra

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

$$I = I_C + I_L = U_m \left| C\omega - \frac{1}{L\omega} \right| \sin\left(\omega t \pm \frac{\pi}{2}\right)$$

$$\left(+\frac{\pi}{2}, \text{ ha } C\omega > \frac{1}{L\omega} \quad \text{és} \quad -\frac{\pi}{2}, \text{ ha } C\omega < \frac{1}{L\omega} \right) .$$

Ha $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, akkor $I_{mC} = I_{mL}$ és $Z = \infty$, $I = 0$ lenne. A párhuzamosan kötött induktív és kapacitív ellenállást tápláló áram amplitúdójának éles csökkenését $\omega \rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ esetben „áramrezonanciának” hívjuk.

• **Ha $R_1 = 0$ és $R_2 \neq 0$** , vagyis ha a kondenzátorok vesztesége elhanyagolható, azonban a tekercsek ohmos ellenállása számottevő, akkor az 1. ábrán látható kör

$$Z = \frac{U_m}{I_m} \left(= \frac{U_{eff}}{I_{eff}}, \text{ ahol } U_{eff} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, I_{eff} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \right)$$

impedanciájának nagysága tetszőleges R_2 esetén:

$$Z(\omega) = \frac{1}{C\omega} \sqrt{\frac{R_2^2 + L^2\omega^2}{R_2^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}} .$$

A feszültség és áramerősség közötti fázisszög abszolút értéke:

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{L\omega - C\omega(R_2^2 + L^2\omega^2)}{R_2} .$$

Az

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R_2}{L}\right)^2}$$

a rezonanciafrekvencia, amely láthatóan különbözik a soros rezgőkörnél kapott értéktől.

• **Ha a veszteségek elhanyagolhatóak azaz $R_2 \ll L\omega_0$** , akkor az $L\omega_0 \approx 1/C\omega_0$ feltétel mellett létrejövő áramrezonancia esetén a kör Z impedanciája igen nagy, és a főágban folyó igen kicsiny I áramot a tekercsen, illetve a kondenzátoron átfolyó áramok általában sokszorosan ($L\omega_0/R$ -szer) felülmúlják:

$$I_{mL} = I_{mC} = \frac{L\omega_0}{R_2} I_m .$$

Ekkor a rezonancia-impedancia nagysága:

$$Z_0 = \frac{L}{CR_2} .$$

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

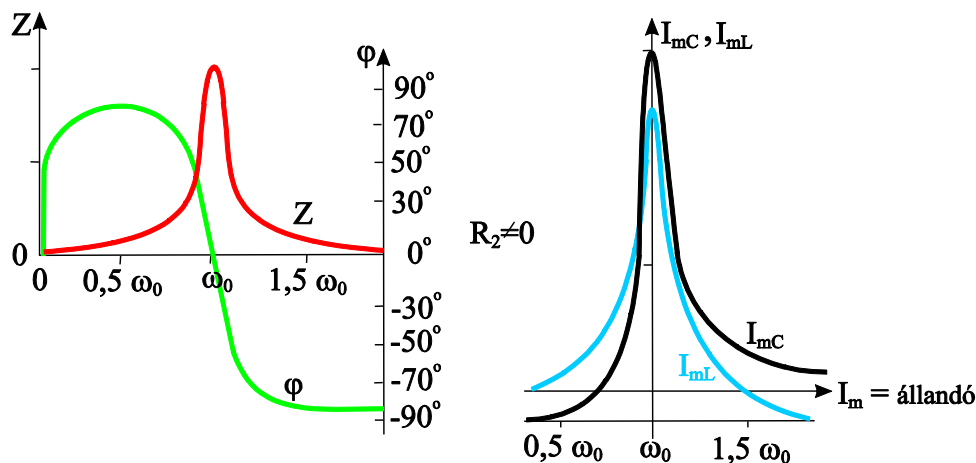
A párhuzamos rezgőkör rezonancia jósági tényezőjének értéke:

$$Q_0 = \frac{L\omega_0}{R_2} \sqrt{1 + \frac{CR_2^2}{L}} = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1} .$$

A rezgőkörök jóságát a $\Delta\omega$ sávszélességgel is szokás jellemezni, amelyet a következőképpen értelmezünk („áramgenerátoros” táplálást feltételezve, azaz amikor $I_m = \text{állandó}$):

$$U_m(\omega_2) = U_m(\omega_1) = \frac{1}{\sqrt{2}} U_m(\omega_0) .$$

- **Ábrázolva** a $Z = Z(\omega)$, $\varphi = \varphi(\omega)$, valamint az $I_{mL} = I_{mL}(\omega)$, $I_{mC} = I_{mC}(\omega)$ mennyiségeket (ez utóbbiakat $I_m = \text{állandó}$ esetén), a párhuzamos rezgőkörök vizsgálatánál nyert eredmények alapján, az alábbi görbéket kapjuk.



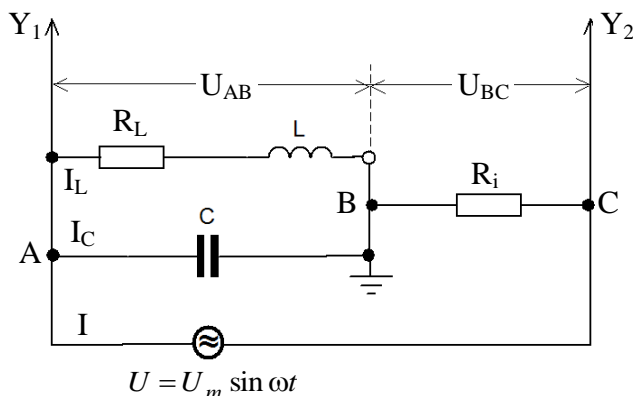
2. ábra

II. A mérés menete

Állítsuk össze a 3. ábrán látható áramkört. Ebben a kapcsolásban a főágban folyó I áram mérését feszültség mérésre vezethetjük vissza. Az R_i és az U_{BCm} ismeretében Ohm-törvényéből $I_m = U_{BCm}/R_i$, így a rezgőkör Z impedanciája (amint az egyszerűen belátható):

$$Z = \frac{U_{ABeff}}{I_{eff}} = \frac{U_{ABeff}}{U_{BCeff}} R_i .$$

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”



3. ábra

A $\varphi(\omega) = \arctg \left[\frac{L\omega - C\omega(R_2^2 + L^2\omega^2)}{R_2} \right]$ fázisszög oszcilloszkóppal megmérhető, ha azt az AB és BC pontokra csatlakoztatjuk úgy, hogy a B pont legyen a közös földpont. Ekkor egyrészt az $U(t) = U_m \sin \omega t$ forrásfeszültséget szolgáltató generátornak föld-független kimenettel kell rendelkeznie(!), másrészt a B pont földelése következtében létrejött 180° -os fáziseltolódást figyelembe kell venni! A C ismeretében $\omega_0 (= 2\pi f_0)$ és Z_0 méréséből az L, illetve az R_v veszteségi ellenállás értéke számítható, feltéve, hogy $R_v \ll L\omega_0$, ekkor ugyanis:

$$\omega_0 \approx \frac{1}{\sqrt{LC}},$$

$$Z_0 \approx \frac{L}{CR_v}$$

és

$$Q_0 \approx \frac{L\omega_0}{R_v}.$$

III. Mérési feladatok és számítások

1. feladat Digitális mérőműszerrel mérje meg a rezgőkörben lévő C, R_C , R_L és R_i értékeket!
2. feladat Állítsa össze a 3. ábrán látható kapcsolást és mérje ki, valamint ábrázolja a $Z = Z(\omega)$ és a $\varphi = \varphi(\omega)$ függvényeket!
3. feladat Biztosítva az $I_m =$ állandó feltételt:
 - a) az ω_0 , ω_1 , ω_2 mérésével határozza meg a $Q_0 = \omega_0 / (\omega_2 - \omega_1)$, $\omega_0 \approx 1/\sqrt{LC}$ értékeket, majd ezt követően a $Q_0 \approx L\omega_0 / R_v$ összefüggés felhasználásával határozza meg R_v értékét;
 - b) az $\omega = 0,5\omega_0$, $\omega = \omega_0$, $\omega = 1,5\omega_0$ körfrekvenciákon U_{ABm} (és L, C, R_v) ismeretében számítsa ki I_{Lm} , I_{Cm} értékeit, majd ezt a mért I_m -mel összevetve – az $I_m = I_{mC} = \frac{L\omega_0}{R_2} I_m$ összefüggést is figyelembe véve – elemezze a kapott eredményt!

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

IV. Ellenőrző kérdések

1. A mérés során lényeges kikötés-e az $I = \text{állandó}$ (áramgenerátor) feltétel biztosítása? Indokolja válaszát!
2. Azonos L , C , R_V paraméterek esetén mely feltételek mellett egyezik meg a soros és a párhuzamos rezgőkör rezonancia frekvenciája, illetve jósaági tényezője?
3. Szükségszerű-e a φ fázisszög oszcilloszkóppal történő mérésekor a 3. ábrán látható kapcsolatban a B pont földelése? Miért kell ekkor a forrásfeszültséget szolgáltató generátornak föld-függetlennek lennie?
4. A 3. kérdésben szereplő B pont földelése esetén mi okozza a 180° -os fáziseltolódást?
5. Milyen gyakorlati haszna lehet az 1. ábrán látható R_I ellenállásnak?

V. Felhasznált és ajánlott irodalom:

1. Hevesi I.: Elektromosság, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1998.
2. Fodor Gy.: Elméleti elektrotechnika, Tankönyvkiadó, Budapest, 1979.
3. Javorszkij, B.M. - Detlaf, A.A.: Fizikai zsebkönyv, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1974.
4. Michailovits L.: III. éves fizikai laboratóriumi gyakorlatok, JATEPress, Szeged, 2004

A 3. számú laboratóriumi gyakorlat ábrái a Michailovits L.: III. éves fizikai laboratóriumi gyakorlatok (JATEPress, Szeged, 2004) című jegyzet 18. gyakorlatának ábrái alapján készültek.

Atomfizika és elektromosságtan laboratóriumi gyakorlat

4.

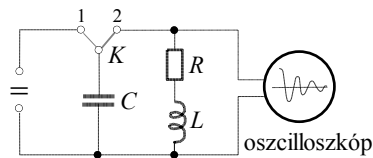
**SZABAD ÉS KÉNYSZERÍTETT
ELEKTROMÁGNESES REZGÉSEK
VIZSGÁLATA**

- Célkitűzés:**
- RLC körben tranziens gerjesztéssel előállított *szabad elektromágneses rezgések* oszcilloszkóppal történő vizsgálata,
 - RLC körben periódikusan változó feszültségű áramforrás által előállított *kényszerített elektromágneses rezgések* jellemzőinek tanulmányozása.

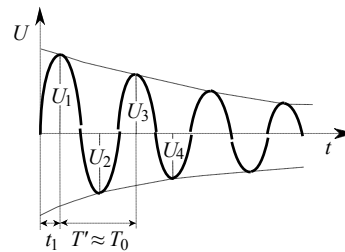
A gyakorlatot összeállította: *dr. Bohus János* egyetemi adjunktus
dr. Füle Miklós egyetemi docens
SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék

I. A 4. gyakorlathoz kapcsolódó fizikai alapismeretek

- **Szabad elektromágneses rezgések.** Az L induktivitású, R ohmos ellenállású önindukciós tekercsből és a C kapacitású kondenzátorból állítsuk össze a K kapcsolóval zárható kört (1. ábra). A K 1 állásában a T telep feltölti a kondenzátort, a 2 állásában a kondenzátor kisül. Egy katódsugaras oszcilloszkóp ernyőjén megfigyelhetjük, hogy a kisülés alatt a kondenzátor feszültségének időbeli változása csillapodó rezgésnek felel meg. Hasonlóan változik a zárt RLC körben folyó áram erőssége is. A kondenzátornak önindukciós tekercsen át való kisülésénél általában csillapodó elektromágneses rezgések keletkeznek. Az elektromágneses rezgéseknél az elektromos tér energiája periodikusan átalakul a mágneses tér energiájává és megfordítva, de az *ohmos* ellenállásban fejlődő hő (és egyéb veszteségek) miatt nem teljes mértékben.



1. ábra



2. ábra

Alkalmazva a *Kirchhoff*-féle huroktörvényt azt kapjuk, hogy:

$$L \frac{dI}{dt} + RI + \frac{Q}{C} = 0.$$

Az I áramerősséget kifejezve a kondenzátor $U = Q/C$ feszültségével, és figyelembe véve, hogy $I = dQ/dt = C dU/dt$, a fenti differenciálegyenletet a következő alakba írhatjuk:

$$\frac{d^2U}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dU}{dt} + \frac{U}{LC} = 0,$$

vagy

$$\frac{d^2U}{dt^2} + 2\beta \frac{dU}{dt} + \omega_0^2 U = 0, \quad (*)$$

ahol

$$\beta = \frac{R}{2L}, \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

A (*)-gal jelölt differenciálegyenlet megoldása (az $\omega_0 > \beta$ esetben):

$$U = U_m e^{-\beta t} \sin(\omega' t + \varphi),$$

amely *csillapodó elektromos rezgést* jelent. A $\beta = R/2L$ -et *csillapítási tényezőnek* nevezzük, az

$$\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$$

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

a rezgések körfrekvenciája, az $\omega'/2\pi$ pedig a rezgőkör saját frekvenciája. Az U_m és φ tetszőleges, ill. a kezdeti feltételekből meghatározható állandók.

Az I áramerősségre is a (*)-gal jelölt differenciálegyenlettel megegyező alakú differenciálegyenlet írható fel.

• **Kis csillapodás esetén a *-gal jelölt differenciálegyenlet megoldása:** egy lassan csökkenő, $U_m e^{-\beta t}$ amplitúdójú $\omega' \approx \omega_0$ rezgés, amelyet szemléletesen az egymást követő, azonos előjelű feszültségmaximumok viszonyával az ún. csillapodási hányadossal jellemezhetünk:

$$K = \frac{U_1}{U_3} = \frac{U_2}{U_4} = \dots = \frac{e^{-\beta t_1}}{e^{-\beta(t_1+T')}} = e^{\beta T'} \approx e^{\beta T_0},$$

ahol t_1 az első feszültségmaximumhoz tartozó időpont (l. 2. ábra), $T' = 2\pi/\omega'$ és $T_0 = 2\pi/\omega_0$. Ha $\beta \ll \omega_0$, akkor:

$$\frac{\Delta U}{U_3} = \frac{U_1 - U_3}{U_3} = \frac{U_1}{U_3} - 1 = e^{\beta T_0} - 1 \approx \beta T_0.$$

A rezgőkört szokás a Q_0 rezonancia jósági tényezővel is jellemezni, amely a rezgőkör teljes energiájának és az egy rezgés alatt elveszített energia hányadosának 2π -szerese. Mivel a töltött kondenzátorban tárolt energia értéke: $W_C = CU^2/2$, így

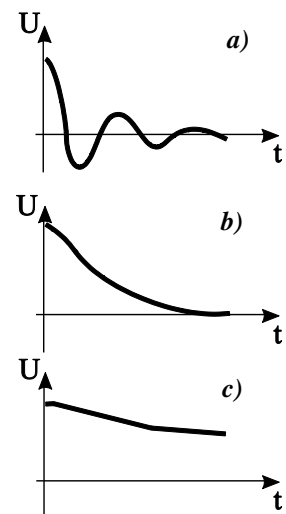
$$Q_0 = 2\pi \frac{W_1}{\Delta W} = 2\pi \frac{W_1}{W_1 - W_3} = 2\pi \frac{U_1^2}{U_1^2 - U_3^2} = 2\pi \frac{1}{1 - \left(\frac{U_3}{U_1}\right)^2} = 2\pi \frac{1}{1 - e^{-2\beta T_0}} =$$

$$= 2\pi \frac{1}{1 - \left[1 - 2\beta T_0 + \frac{(2\beta T_0)^2}{2} - \dots\right]} \approx 2\pi \frac{1}{2\beta T_0} = \frac{\omega_0 L}{R}.$$

Ha $\beta^2 \geq \omega_0^2$, vagyis ha R eléri vagy meghaladja az $R^2/4L^2 = 1/LC$ egyenletből adódó

$$R_h = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$$

határellenállást, a csillapított rezgéseket jelentő megoldás érvényét veszti. A β csillapítási tényező fokozatos növelésével egyre jobban csillapodó rezgések keletkeznek (3a. ábra). A $\beta = \omega_0$ az ún. aperiodikus kisülés viszonylag gyors időbeli lefolyását jelenti (3b. ábra). Ennek az esetnek a megvalósítása azért célszerű pl. galvanométereknél, mivel a műszer mutatója ekkor állapodik meg leghamarabb az egyensúlyi helyzetben, míg $\beta > \omega_0$ esetén lassan „mászik” az egyensúlyi helyzet felé (3c. ábra). Megjegyezzük, hogy a csillapodó és a megfelelő csillapítatlan ($R \rightarrow 0$) rezgés T' , illetve T_0 rezgésideje közti kapcsolatot, az $\omega' = 2\pi/T'$, $\omega_0 = 2\pi/T_0$



3. ábra

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

és $A = \ln K$ figyelembevételével a

$$T' = T_0 \sqrt{1 + \frac{A^2}{4\pi^2}}$$

összefüggés írja le. A K csillapodási hányados természetes logaritmusát *logaritmikus dekrementumnak* nevezzük:

$$A = \ln K \approx \beta T_0,$$

amely a rezgések csillapodásának jellemzésére szolgál.

• **Kényszerített elektromágneses rezgések.**

Az előzőekben vizsgált szabad rezgésekkel szemben kényszerrezgések keletkeznek az elektromos rezgőkörben akkor, ha a rezgőkört periodikusan változó, a legegyszerűbb esetben $U = U_m \sin \omega t$ feszültségű áramforráshoz kapcsoljuk, amelynek belső ellenállását a következőkben elhanyagolhatónak tekintjük (feszültség generátor esete). Mivel egy ilyen rezgőkörrel a „Soros rezgőkör vizsgálata” című gyakorlat keretében már foglalkoztunk, ezért itt csak néhány eredményt elevenítünk fel.

A külső feszültség bekapcsolását követő átmeneti folyamat utáni állandósult (stacionárius) állapotban a rezgőkör állandó amplitúdóval és az $U_m \sin \omega t$ gerjesztő feszültség ω körfrekvenciájával rezeg, nevezetesen e kényszerrezgésnél az áramerősség:

$$I = I_m \sin(\omega t - \varphi),$$

ahol

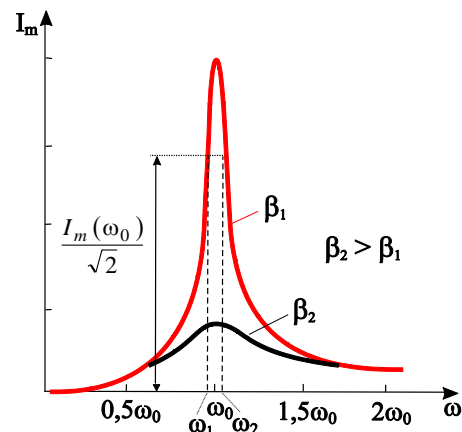
$$I_m = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}} \quad \text{és} \quad \text{tg}\varphi = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}.$$

Átalakítva ezt a két egyenletet az $L\omega = 1/C\omega$ vagy $\omega = 1/\sqrt{LC} = \omega_0$ „rezonancia eset” figyelembevételével, a rezonanciagörbe egyenlete és $\text{tg}\varphi$ kifejezése a következő lesz:

$$I_m = \frac{U_m}{L} \frac{\omega}{\left[(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2\right]^{1/2}}, \quad \text{és}$$

$$\text{tg}\varphi = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{2\beta\omega}.$$

Az I_m -t mint az ω függvényét feltüntetve $I_m = I_m(\omega)$ rezonanciagörbét R különböző értékei mellett ábrázolva (l. 4. ábra), azt kapjuk, hogy a maximum annál kifejezettebb, vagy a rezonancia annál élesebb, minél kisebb a rezgőkör csillapodása, azaz a $\beta = R/2L$ csillapítási tényező értéke.



4. ábra

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

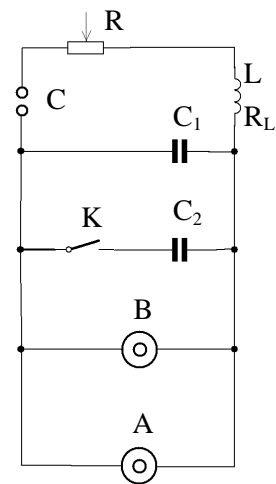
Állandó kapocsfeszültség esetén azok az ω_1 és ω_2 körfrekvenciák, amelyekre I_m értéke az $I_m(\omega_0) = U_m / 2\beta L = U_m / R$ maximumnak a $\sqrt{2}$ -ed része – vagyis az I_m^2 -tel arányos energia a maximális energiának a fele, kis csillapodás esetén ($\beta^2 \ll \omega_0^2$) a következők: $\omega_1 = \omega_0 + \beta$, $\omega_2 = \omega_0 - \beta$. Az $(\omega_1 - \omega_2) = \Delta\omega$ frekvenciakülönbség a félérték- vagy rezonanciaszélesség (sáv szélesség):

$$\Delta\omega = \frac{\omega_0}{Q_0}$$

A $\Delta\omega$ tehát egyszerű kapcsolatban van a rezgőkör csillapodását jellemző Q_0 jósági tényezővel, amely a rezonancia görbéből meghatározható.

II. A mérés menete

- **A szabad elektromágneses rezgések vizsgálata.** A szabad elektromágneses rezgések vizsgálatához az 5. ábrán látható összeállítást alkalmazzuk. A C jelű hüvelypárt zárja rövidre. A rezgőkör tranzienst követő folyamat időbeli változása az A jelzésű kivezetésre kapcsolt négyszög (□) impulzust szolgáltató generátor, valamint a B jelzésű kivezetésre kapcsolt oszcilloszkóp segítségével vizsgálható. A rezgőkörben lévő kapacitás értéke a K jelű kapcsoló nyitásával vagy zárásával, a veszteségi ellenállás értéke R változtatásával módosítható. Az 5. ábrán R_L a tekercs ohmikus ellenállását jelenti.



5. ábra

- **Kényszerített elektromágneses rezgések vizsgálata.** A kényszerített elektromágneses rezgések vizsgálatához ugyancsak az 5. ábrán látható összeállítás alkalmazható. Kapcsoljon a C jelű hüvelypárra (bemenetre) ismert, állandó amplitúdójú szinuszos feszültséget szolgáltató generátort. A körben folyó áramerősség nagyságának meghatározására – ismert ellenállás érték mellett – a potenciométeren mérjen feszültséget. Az R ellenálláson mért feszültségből Ohm-törvénye alapján számolható ki az áramerősség. (Az A és B jelzésű kivezetéseket ekkor hagyja szabadon.)

III. Mérési feladatok és számítások

1. Mérje meg digitális mérőműszerrel a C_1 , C_2 és R_L értékeit!
2. Végezze el a 2. ellenőrző kérdésben szereplő számítást (l. IV. pont) és ennek eredményét (a $T' \approx T_0$ feltétel alkalmazhatóságát) vegye figyelembe a 4. feladat elvégzésénél! Rögzítse számításainak eredményét!
3. Állítson elő szabad elektromágneses rezgést, és az R ohmos ellenállás fokozatos növelésével határozza meg a $R_h = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ összefüggésben szereplő R_h határellenállást! Számítsa ki L értékét!

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

(A vizsgálat pontosságának növelése érdekében használja ki az oszcilloszkóp függőleges erősítőjének túlvezérelhetőségét!)

4. Valamely választott $R(\ll R_i)$, L , C értékekkel rendelkező rezgőkörnél – szabad elektromágneses rezgések előállításával – az I -ben szereplő összefüggések felhasználásával, U_1 , U_2 , U_3 , ... valamint $T' (\approx T_0)$ mérésével határozza meg L , β és Q_0 értékeit!
5. Nézze meg oszcilloszkópon a négyszög impulzust szolgáltató generátor jelét és rögzítse ennek jellemző értékeit!
6. Kényszerített elektromágneses rezgések előállításával a 4. feladatban választott paraméterű rezgőkörnél ω_0 , ω_1 és ω_2 mérésével, illetve az I -ben szereplő összefüggések felhasználásával határozza meg L , Q_0 , valamint az $R_v (\geq R + R_L)$ veszteségi ellenállás értékeit!
7. Ismétlje meg az előző feladatban szereplő mérést más R , L , C paraméterek esetén is!

IV. Ellenőrző kérdések

1. A $\beta = R/2L$ csillapodási tényezőben szereplő R érték mérhető-e ohm-mérővel? Indokolja választát!
2. Számítsa ki a K csillapodási hányados értékét annak feltételezésével, hogy T_0 és T' 10%-kal térnek el egymástól! Mire jellemző és mit mutat ez a szám?
3. Szabad elektromágneses rezgések vizsgálatokor a tranzienst gerjesztést biztosító, négyszög impulzust szolgáltató generátornak elvileg milyen főbb paraméterekkel kell rendelkeznie? (Válaszát ne számszerű adatokkal adja meg!)
4. A kényszerített elektromágneses rezgések vizsgálatokor lényeges kikötés-e az állandó feszültségű gerjesztés?
5. Megfigyelhető-e a 4a. ábrának megfelelő rezgés egy olyan kör esetében, amely egy $L=15\text{ mH}$ induktivitású, $R_L=180\ \Omega$ ohmikus ellenállású tekercset és egy $C=2\ \mu\text{F}$ -os kapacitást tartalmaz?
6. Az oszcilloszkóp bemenő impedanciájának milyen feltételnek kell megfelelnie a 3. feladatban?

V. Felhasznált és ajánlott irodalom

1. Hevesi I.: Elektromosság, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1998.
2. Budó Á.: Kísérleti Fizika II., Tankönyvkiadó, Budapest, 1968.
3. Fodor Gy.: Elméleti elektronika, Tankönyvkiadó, Budapest, 1979.
4. Michailovits L.: III. éves fizikai laboratóriumi gyakorlatok, JATEPress, Szeged, 2004

A 4. számú laboratóriumi gyakorlat ábrái a Michailovits L.: III. éves fizikai laboratóriumi gyakorlatok (JATEPress, Szeged, 2004) című jegyzet 19. gyakorlatának ábrái alapján készültek.

Atomfizika és elektromosságtan laboratóriumi gyakorlat

5.

**OLDATOK ABSZORPCIÓS SZÍNKÉPÉNEK
FELVÉTELE SPEKTROFOTOMÉTERREL**

- Célkitűzés:**
- *az abszorpciós színek leírására használatos fizikai mennyiségek és ezek mérési módszereinek megismerése.*

A gyakorlatot összeállította: *dr. Bohus János* egyetemi adjunktus
dr. Füle Miklós egyetemi docens
SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

I. Az 5. gyakorlathoz kapcsolódó fizikai alapismeretek

• **Abszorpciós együttható, extinkciós koefficiens.** Az abszorpciós spektrum alapján felderíthetjük az atomok és molekulák energiaszint rendszerét, a molekuláris kölcsönhatásokat és a kondenzált anyagok szerkezetét is.

Az oldatok abszorpciós színekének kvantitatív jellemzésére a $k(\lambda)$ abszorpciós együttható vagy az $\varepsilon(\lambda)$ moláris dekadikus extinkciós koefficiens szolgál. A *Beer-Lambert* törvény szerint a homogén oldat belsejében az intenzitás – az elnyelődés következtében – exponenciálisan csökken:

$$I = I_0 e^{-k(\lambda)d} = I_0 10^{-\varepsilon(\lambda)cd} ,$$

ahol I_0 és I a fény intenzitása a d vastagságú oldatba való belépéskor, illetve a d vastagságú oldaton való áthaladás után, c az oldat koncentrációja *mol/l*-ben kifejezve.

Az I_0 és I ismeretében az

$$E = \log \frac{I_0}{I}$$

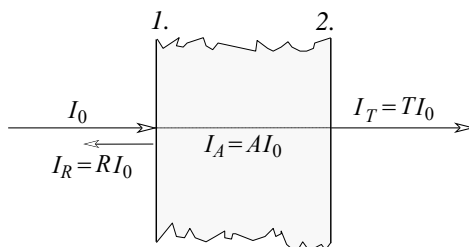
extinkció meghatározható, majd ebből az egy mol oldott anyagra eső abszorpciós együttható, illetve az

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{E}{cd}$$

molekuláris dekadikus extinkciós koefficiens kiszámítható.

Megjegyezzük, hogy az $\varepsilon(\lambda)$ függvény meghatározása csak abban az esetben célravezető, ha értéke független az oldat koncentrációjától; ezekben az esetekben az abszorpció mérésével a koncentráció meghatározható.

• **Transzmisszió-, reflexió- és abszorpcióképesség.** Az I_0 intenzitású fénynyaláb kölcsönhatását tetszőleges testtel három integrális mennyiséggel jellemezhetjük: a transzmisszióval (T), a reflexióval (R) és az abszorpcióval (A). Az egyes mennyiségek jelentése az *1. ábra* szerint: az I_0 beeső intenzitású fénynyalábból az *1.* határfelületről RI_0 visszaverődik, AI_0 elnyelődik a közegben, és TI_0 átjut a *2.* határfelületén.



1. ábra

Megjegyezzük, hogy a fenti *Beer-Lambert* törvényben szereplő I_0 és az *1. ábrán* látható I_0 jelentése különbözik.

Ha csak abszorpció, reflexió és transzmisszió lép fel, akkor a három mennyiség összege: $R + A + T = I$. (A valóságban a szórás is befolyásolja a folyamatot.)

II. A mérés menete

A gyakorlaton használt spektrofotométer folyékony és szilárd anyagok áteresztési (transzmissziós) együtthatójának mérésére alkalmas, a színek 360 - 1000 nm-es tartományában.

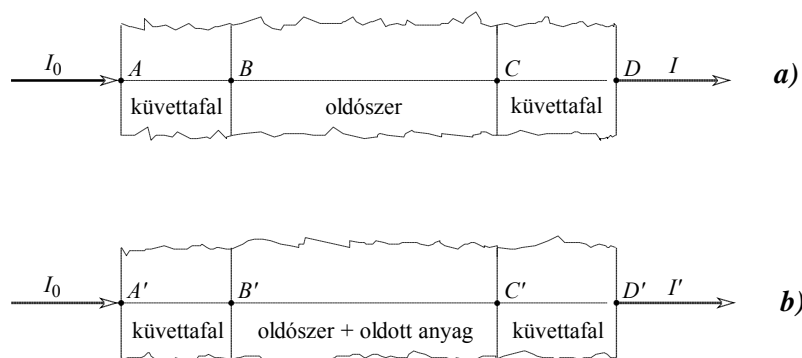
A mérések során minden esetben két rendszer áteresztőképességét hasonlítjuk össze. Az egyik rendszer az oldatot tartalmazó kivetta, a másik üres fényút, üres vagy tiszta oldószert tartalmazó kivetta (ún. vakoldal). Az intenzitásviszonyokat a két rendszeren való áthaladás során a 2. ábra mutatja. Ezzel a mérési eljárással a

$$T = \frac{I'}{I} \left(= \frac{T_1}{T_2} = \frac{I'/I_0}{I/I_0} \right)$$

transzmisszió, vagy az

$$E = \log \frac{I}{I'}$$

extinkció arány határozható meg. Ha a kivettafalakon ($A, B, C, D, A', B', C', D'$) fellépő reflexió és a falak abszorpciója a két fényútban azonos, továbbá a két kivetta rétegvastagsága pontosan megegyezik $\overline{BC} = \overline{B'C'}$, akkor az előző két összefüggés az oldott anyag transzmisszióját, illetve extinkcióját adja meg.



2. ábra

A mérés pontatlansága a túl kicsi és túl nagy transzmissziók esetén általában nagy, ezért csak a 20-70 % közötti transzmisszió, illetve az ennek megfelelő extinkció értékeket tekintjük mérvadónak. A vizsgálandó festék extinkciós koefficiense független a koncentrációtól. Az oldatsorozat koncentrációi lehetővé teszik, hogy az adott hullámhosszon legalább egy oldat transzmissziója az értékelhető tartományba essen. Bizonyos tartományokban több oldat is lehetővé teheti a pontos mérést (ún. fedőpontok), ebben az esetben az $\varepsilon(\lambda)$ értékeket átlagolni kell.

III. Mérési feladatok és számítások

1. A kiadott $c = 10^{-4} \text{ mol/l}$ koncentrációjú fluoreszcein oldatból készítsen $50 - 50 \text{ ml}$ ($5 \cdot 10^{-5}$, $2 \cdot 10^{-5}$ és $5 \cdot 10^{-6}$) mol/l koncentrációjú oldatokat (az oldószer 10^{-2} mol/l koncentrációjú NaOH oldat).

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

2. Határozza meg az $\varepsilon(\lambda)$ -t a (420 – 510) nm spektrumtartományban 5 nm-enként végzett extinkció mérésekből, három különböző koncentrációjú fluorescein oldat egyidejű vizsgálatával! A táblázatba foglalt mérési eredmények alapján ábrázolja az $\varepsilon(\lambda)$ -t!

IV. Ellenőrző kérdések

1. Adja meg a transzmissziós, az abszorpciós és a reflexiós együttható definícióját!
2. Hogyan értelmezi a molekula spektrumok keletkezését?
3. Az abszorpciós spektrumok ismerete milyen feladatok megoldását teszi lehetővé?

V. Felhasznált és ajánlott irodalom

1. Hevesi I. - Szatmári S.: Bevezetés az atomfizikába, JATEPress, Szeged, 2002.
2. Budó Á. - Mátrai T.: Kísérleti Fizika III., Tankönyvkiadó, Budapest, 1977.
3. Mátrai T. - Csillag L.: Kísérleti spektroszkópia, Tankönyvkiadó, Budapest, 1990.
4. Kovács I. - Szőke J.: Molekulaspektroszkópia, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1987.
5. Michailovits L.: III. éves fizikai laboratóriumi gyakorlatok, JATEPress, Szeged, 2004

A 5. számú laboratóriumi gyakorlat ábrái a Michailovits L.: III. éves fizikai laboratóriumi gyakorlatok (JATEPress, Szeged, 2004) című jegyzet 11. gyakorlatának ábrái alapján készültek.

Atomfizika és elektromosság tanlaboratóriumi gyakorlat

6.

VÁKUUM-FOTOCÉLLA KARAKTERISZTIKÁINAK
VIZSGÁLATA

Célkitűzés:

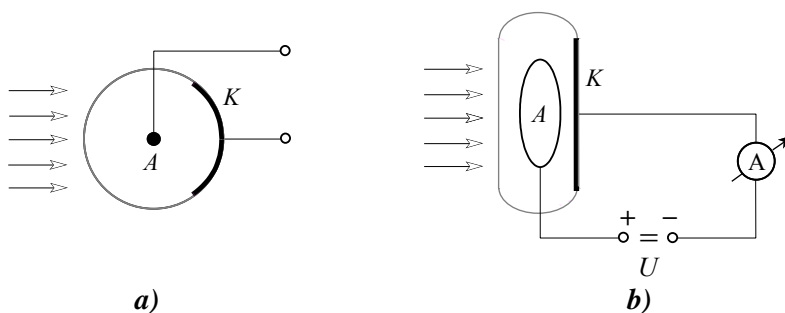
- *vákuum-fotocella karakterisztikáinak meghatározása,*
- *a karakterisztikák felhasználásának vizsgálata sugárzásmérésre.*

A gyakorlatot összeállította: *dr. Bohus János* egyetemi adjunktus
dr. Füle Miklós egyetemi docens
SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

I. A 6. gyakorlathoz kapcsolódó fizikai alapismeretek

- **A fotocella áramerősség-feszültség karakterisztikája.** A vákuum-fotocella a fényelektromos hatáson alapuló egyszerű sugázmérő eszköz, amely légritkított üvegedénybe helyezett két elektródból: fotokatódból és anódból áll. A katódot (*K*) – általában speciális alkálifém réteget – gyakran az üvegbúra belső felületén alakítják ki, az anód (*A*) gömb, gyűrű vagy hurok alakú (*1. a. ábra*). A katódból megvilágítás hatására elektronok lépnek ki, amelyek megfelelő feszültség esetén eljutnak az anódra. Az *1b. ábra* szerint összeállított körben *U* feszültségnél a megvilágítás ideje alatt áram folyik, amit *foto-áramnak* nevezünk.



1. ábra

A fotocella áramerősség-feszültség karakterisztikáját [*I(U)*] több tényező határozza meg. Az *I(U)* függvény alakja függ a katód valamint az anód anyagától, a megvilágító fény hullámhosszától és a cső geometriai felépítésétől. A katódot ν frekvenciájú fényel megvilágítva, az abból kilépő elektronok v_m maximális sebességét az

$$\frac{mv_m^2}{2} = h\nu - W_K$$

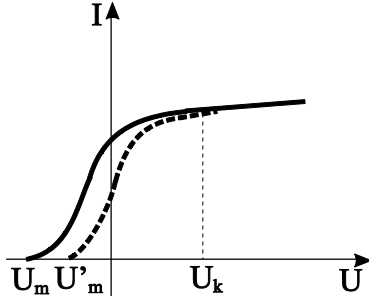
Einstein-féle fényelektromos egyenlet alapján határozhatjuk meg, ahol *h* a *Planck*-állandó, *m* az elektron tömege, W_K a kilépési munka. Ha az anódot a változtatható feszültségű áramforrás negatív sarkával kötjük össze, akkor az

$$\frac{mv_m^2}{2} = eU_m$$

egyenlet által meghatározott U_m feszültségnél a katódból a felületre merőlegesen kilépő leggyorsabb elektronok még éppen eljutnak az anódra, a többi elektron pedig visszafordul a katód felé. Csökkentve az anód negatív feszültségét, a kisebb sebességű – a mélyebb rétegekből származó, energiavesztéssel kilépő – elektronok is eljutnak az anódra, az anódáram a feszültség csökkentésével rohamosan nő. Amikor az elektromos térerősség az elektródok között nulla, akkor a katódból kilépő összes elektron elér az anódra (telítési szakasz). Mivel a katód és az anód anyaga mindig különböző, és a fényérzékeny katódon a kilépési munka (W_K) kisebb az anódhoz tartozó kilépési munkánál (W_A), az anód és a katód közötti feszültség zérus külső feszültség esetén egyenlő az $U_K = (W_A - W_K)/e$ kontaktpotenciállal, és az anód a negatív. Így a katód és az anód potenciálja akkor lesz egyenlő, ha a külső feszültség éppen U_k . A fotocella karakterisztikája ezért a nagyobb

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

feszültség felé tolódik el és a telítési szakasz U_k -nál kezdődik (2. ábra, szaggatott görbe). A maximális sebességű elektronok lefékezéséhez szükséges anódfeszültség:



2. ábra

$$U_m = U'_m + U_K,$$

ahol U'_m a cellára kapcsolt feszültség.

(Megjegyezzük, hogy a telítési szakasz elérése után a fotoáram általában kissé emelkedik a feszültség növelésével. Ennek a magyarázata az, hogy a növekvő elektromos térerősség hatására felléphet észrevehető átvezetés, az anód fotoemissziója és termikus emisszió is.)

A gyakorlatban használt (nem gömbszimmetrikus) fotocellák áramerősség-feszültség karakterisztikáját a 3. ábra mutatja. A kontaktpotenciál értéke ebben az esetben az ábrán bemutatott módon becsülhető meg.

• **A fotocella spektrális érzékenysége.** A fotocellák fotoárama (I) konstans anódfeszültségnél arányos a katódot megvilágító monokromatikus (λ hullámhosszúságú) sugárzás $\Phi(\lambda)$ teljesítményével:

$$I = c(\lambda) \cdot \Phi(\lambda) + I_0$$

ahol a $c(\lambda)$ arányossági tényező a *fotocella spektrális érzékenysége*, I_0 a cella sötétárama. Ez utóbbit részben az elektródok közötti átvezetés, részben a katód termikus emissziója határozza meg; értéke általában $10^{-11} - 10^{-13}$ A.

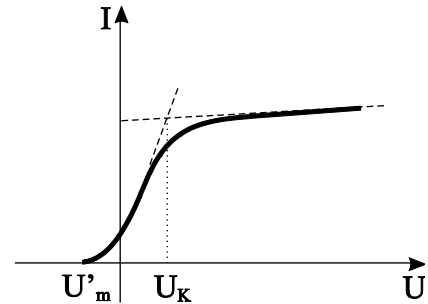
A fotocella spektrális érzékenysége erősen hullámhosszfüggő – alkálifém-katód esetében maximuma a látható spektrumtartományban van –, és értéke zérus a katód anyagára jellemző határhullámhossz felett. A gyártási technológiától függően a fotokatód egyes részeire vonatkozó $c(\lambda)$ is erősen különböző lehet, ezért sugármérésnél ügyelni kell arra, hogy a katódnak mindig ugyanazon területe legyen megvilágítva. A fotoáram széles tartományban lineáris kapcsolatban van a beeső sugárzás teljesítményével. Az érzékenység függ a fény polarizációjától is.

Ha a fotocellát bontatlan (fehér), Φ sugárzási teljesítményű fényel világítjuk meg, akkor a fotoáram

$$I = C\Phi + I_0,$$

ahol C az átlagos érzékenység, amelynek értéke megváltozik, ha a fény spektrális összetétele változik. A fotocella átlagos érzékenységét úgy vizsgálhatjuk, hogy ismert mértékben változtatjuk a katódot érő sugárzás teljesítményét és mérjük a fotoáramot az izzólámpán átfolyó konstans áramerősség biztosítása mellett. A katódon a besugárzott felületi teljesítményt (E -t) a fényforrás és a fotocella közé helyezett polarizációs (P) szűrőkkel változtatjuk. Ha a két polarizátor polarizációs síkjá egymással φ szöveget zár be és párhuzamos állásban a besugárzott teljesítmény E_0 , akkor

$$E = E_0 \cos^2 \varphi.$$

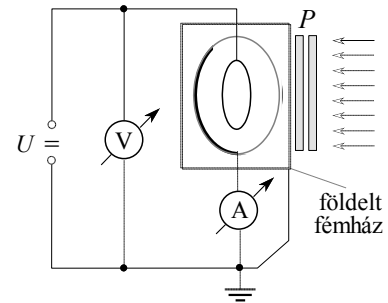


3. ábra

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

II. A mérés menete

A fotocella áramerősség-feszültség karakterisztikáját a 4. ábra szerinti elrendezésben vizsgáljuk. Az áramerősség mérésére érzékeny árammérő műszert használunk. A feszültségforrás szabályozható kimenetű tápegység. (A külső zavarok csökkentése érdekében a fotocellát célszerű árnyékolni!) A fény spektrális összetételének változatlansága érdekében a cella megvilágítását stabilizált tápegységről táplált izzó biztosítja.



4. ábra

III. Mérési feladatok és számítások

1. Vegye fel a fotocella áramerősség–feszültség karakterisztikáit különböző megvilágításoknál. Az intenzitást a polarizátorok segítségével szabályozza! (A görbe gyorsan változó szakaszain a feszültséget kis lépésekben változtassa!)
2. Mérje meg a fotoáramot a polarizátorok polarizációs iránya által bezárt szög függvényében. A cella feszültségét a telítési szakaszra állítsa!
3. Ábrázolja a relatív intenzitás változását, az $I(\varphi)/I(0)$ -t φ , valamint $\cos^2\varphi$ függvényében!
4. Becsülje meg a kontaktpotenciált (l. 3. ábra) és számítsa ki a $(W_A - W_K)$ -t!

IV. Ellenőrző kérdések

1. Milyen szisztematikus hibák léphetnek fel a 2. feladat kapcsán?
2. Miért módosítja a fotocella áramerősség-feszültség karakterisztikáját a cella felépítése?

V. Felhasznált és ajánlott irodalom

1. Budó Á.: Kísérleti fizika II., Tankönyvkiadó, Budapest, 1968.
2. Budó Á. - Mátrai T.: Kísérleti fizika III., Tankönyvkiadó, Budapest, 1977.
3. Hevesi I. - Szatmári S.: Bevezetés az atomfizikába, JATEPress, Szeged, 2002.
4. Michailovits L.: III. éves fizikai laboratóriumi gyakorlatok, JATEPress, Szeged, 2004

A 6. számú laboratóriumi gyakorlat ábrái a Michailovits L.: III. éves fizikai laboratóriumi gyakorlatok (JATEPress, Szeged, 2004) című jegyzet 9. gyakorlatának ábrái alapján készültek.

Atomfizika és elektromosságtan laboratóriumi gyakorlat

7.

A STEFAN-BOLTZMANN-FÉLE SUGÁRZÁSI
TÖRVÉNY ALKALMAZÁSA

- Célkitűzés:**
- *a hőmérsékleti sugárzás törvényeinek tanulmányozása* gyakorlati felhasználásuk szempontjából,
 - *izzó test átlagos elnyelőképességének meghatározása.*

A gyakorlatot összeállította: *dr. Bohus János* egyetemi adjunktus
dr. Füle Miklós egyetemi donces
SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

I. A 7. gyakorlathoz kapcsolódó fizikai alapismeretek

- A **Stefan-Boltzmann törvény** szerint a *fekete test* által kisugárzott teljesítmény a test T abszolút hőmérsékletének negyedik hatványával arányos:

$$\frac{dE}{dt} = \sigma AT^4,$$

ahol σ a *Stefan-Boltzmann-féle* állandó ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$), A a sugárzó fekete test felülete. Egy *szürke test* hőmérsékleti sugárzási teljesítménye *Kirchhoff* törvénye szerint:

$$\frac{dE_{sz}}{dt} = \varepsilon \sigma AT^4,$$

ahol $\varepsilon < 1$ a szürke test elnyelőképessége.

Ennek az összefüggésnek az alapján meghatározható egy elektromos árammal izzított test (pl. egy wolfram izzószál) átlagos elnyelőképessége. Használjunk sugárzó testként egy izzólámpát. Az izzólámpába betáplált elektromos teljesítmény a következő:

$$P = I^2 R(T),$$

ahol I az izzószálon átfolyó effektív áramerősség, $R(T)$ pedig a T hőmérsékletű izzószál abszolút hőmérséklete. Termikus egyensúlyi állapotban ekkora teljesítményt ad le az izzó, hővezetés és hőszugárzás útján:

$$P = B(T - T_0)^n + \varepsilon \sigma AT^4 - DT_0^4,$$

ahol B , illetve D a sugárforrásra jellemző állandók, T_0 a környezet hőmérséklete. A tapasztalat szerint $n \approx 1$, DT_0^4 pedig a környezet által visszasugárzott teljesítmény. Mivel $T \gg T_0$ esetben a sugárzással leadott teljesítmény dominál, P a következő egyszerű alakú lesz:

$$P \approx \varepsilon \sigma AT^4.$$

II. A mérés menete

A $P \approx \varepsilon \sigma AT^4$ egyenlőség vizsgálatához az izzószál ellenállásának $R = R(T)$ hőmérséklet-függését kell megmérnünk. A T_0 szobahőmérsékletéhez tartozó R_0 értéket digitális multiméterrel határozzuk meg. Az $R(T)$ értékeket – $T > T_0$ esetben – *Ohm* törvénye alapján a kiadott univerzális fogyasztásmérő segítségével mérjük meg.

Az izzószál T hőmérsékletét – 1000 K felett – a mért ellenállásadatokból a

$$T = T_0 \left(\frac{R(T)}{R_0} \right)^{0,83}$$

empirikus összefüggés alapján számíthatjuk ki.

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

A sugárforrás (az l hosszúságú izzószál) A felülete a wolfram fajlagos ellenállásának (300 K-en $\rho_0 = 5,5 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$), az izzószál d átmérőjének, valamint a szobahőmérsékleten mért R_0 ellenállás értékének ismeretében az

$$A = d\pi l$$

és

$$R_0 = \rho_0 \frac{l}{(d/2)^2 \pi}$$

összefüggések egybevetéséből az

$$A = \frac{R_0 d^3 \pi^2}{4 \rho_0}$$

formula alapján határozható meg.

A $P \approx \varepsilon \sigma A T^4$ egyenletből, $\sigma (=5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4})$ ismeretében minden T hőmérsékleten számolható az $\varepsilon = \varepsilon(T)$ elnyelőképesség. Az egyenlet logaritmusát véve azt kapjuk, hogy

$$\log P \approx \log \varepsilon A \sigma + 4 \log T,$$

amiből látható, hogy $\log P$ -t a $\log T$ függvényében ábrázolva, egy egyenest kell kapnunk, amelynek iránytangense: 4.

III. Mérési feladatok és számítások

1. Mérje meg a kiadott izzólámpák R_0 ellenállását szobahőmérsékleten!
2. Számítsa ki az izzószálak A felületét! Az izzószál d átmérőjét mikroszkóp és mikrométerskála segítségével határozza meg!
3. Állítsa össze a mérőkört, és a megadott feszültségtartományban a különböző teljesítményű izzólámpák esetén mérje ki az $I = I(U)$ karakterisztikát! Határozza meg az $R = R(T)$ értékeit! A mért ellenállásadatokból számítsa ki az izzószál T hőmérsékletét! A fogyasztásmérő 35 V-nál kisebb feszültségeken nem működik hitelesen! A feszültséget a kiadott tirisztoros áramforrás segítségével változtassa!
4. Az 1600 K-nél nagyobb hőmérsékletekhez tartozó pontok felhasználásával ábrázolja a $\log P$ -t a $\log T$ függvényében, és határozza meg az egyenes iránytangensét!
5. Az 1600 K-nél magasabb hőmérsékletre tartozó pontok figyelembevételével számítsa ki az $P \approx \varepsilon \sigma A T^4$ összefüggés alapján az $\varepsilon = \varepsilon(T)$ értékeit!

IV. Ellenőrző kérdések

1. Milyen előnyei vannak a sugárzásmérésen alapuló hőmérséklet-meghatározásnak, és milyen hőmérséklet-tartományban érdemes ezt használni?



TÁMOP-4.1.1.C-12/1/KONV-2012-0005 projekt



„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

-
2. 1000 K felett miért empirikus összefüggés felhasználásával számítjuk ki az izzósál hőmérsékletét?

V. Ajánlott irodalom

1. Budó Á. - Mátrai T.: Kísérleti Fizika III., Tankönyvkiadó, Budapest, 1977.
2. Hevesi I.: Elektromosság, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1998.
3. Hevesi I. - Szatmári S.: Bevezetés az atomfizikába, JATEPress, Szeged, 2002.
4. Michailovits L.: III. éves laboratóriumi gyakorlatok, JATEPress, Szeged, 2004

A 7. számú laboratóriumi gyakorlat ábrái a Michailovits L.: III. éves fizikai laboratóriumi gyakorlatok (JATEPress, Szeged, 2004) című jegyzet 1. gyakorlatának ábrái alapján készültek.

Atomfizika és elektromosságtan laboratóriumi gyakorlat

8.

A h/e MEGHATÁROZÁSA FOTOCPELLÁVAL

- Célkitűzés:**
- az *Einstein-féle fényelektromos egyenlet* kísérleti igazolása,
 - az *ellentér-módszer alkalmazása* a h Planck-állandó és az e -elektromos elemi töltés hányadosának a meghatározására.

A gyakorlatot összeállította: *dr. Bohus János* egyetemi adjunktus
dr. Füle Miklós egyetemi docens
SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

I. A 8. gyakorlathoz kapcsolódó fizikai alapismeretek

- **A h/e meghatározása a fényelektromos egyenlethől.** A ν frekvenciájú monokromatikus fényvel megvilágítjuk a vákuum-fotocella fényérzékeny katódját („fotokatód”), akkor a katódból kilépő elektronok lefékezéséhez (a fotoáram megszüntetéséhez) szükséges ellentér U_m potenciálkülönbsége és a ν között felírható az

$$eU_m = h\nu - W_K = h(\nu - \nu_0)$$

összefüggés (l. 6. gyakorlat), ahol e az elektron töltése, h a Planck-állandó, W_K a kilépési munka a katódon és $\nu_0 = W_K/h$ a határfrekvencia. Ennek az egyenletnek az alapján meghatározható a h/e hányados úgy, hogy a fotocellát megvilágító fény frekvenciáját változtatva, mérjük U_m -et. U_m -et ν függvényében ábrázolva egyenest kapunk, amelynek meredeksége h/e -t adja.

Az U_m fékező feszültség meghatározása a kontaktpotenciál ismerete nélkül nem lehetséges, azonban megfelelő mérési eljárással h/e a kontaktpotenciál ismerete nélkül is meghatározható. Az említett 6. gyakorlatnál megmutattuk azt is, hogy ha a fotocella áramának megszüntetéséhez a cellára U'_m feszültséget kell kapcsolni, akkor:

$$U_m = U'_m + U_K.$$

Ez azt jelenti, hogy a frekvencia függvényében ábrázolva az U_m és U'_m értékeket, párhuzamos egyeneseket kapunk, amelyek meredeksége h/e (l. 1. ábra).

- **Az Einstein-féle fényelektromos egyenlet alapján** azt írhatjuk, hogy

$$U'_m(\nu) = \frac{h}{e}\nu - konst. .$$

Ha U'_m -t ν_1 -nél és ν_2 -nél is meghatározzuk, akkor fennáll, hogy

$$U'_m(\nu_1) = \frac{h}{e}\nu_1 - konst.,$$

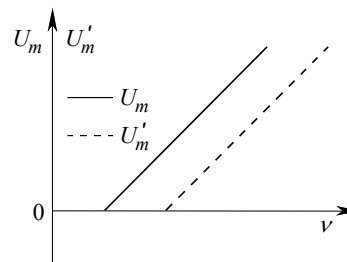
$$U'_m(\nu_2) = \frac{h}{e}\nu_2 - konst..$$

E két egyenletből következik, hogy

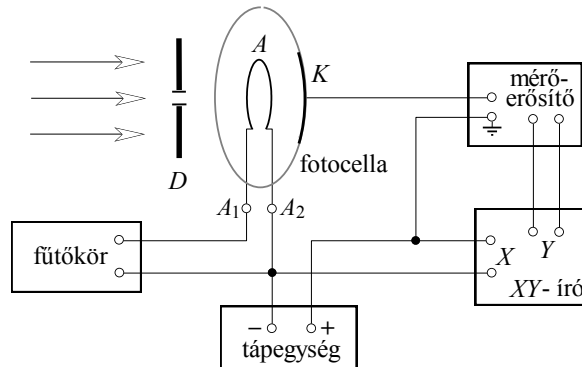
$$\frac{h}{e} = \frac{U'_m(\nu_2) - U'_m(\nu_1)}{\nu_2 - \nu_1}.$$

II. A mérés menete

A mérés során ügyelni kell arra, hogy az anód ne legyen közvetlenül megvilágítva. A fotocellát különböző hullámhosszúságú lézerefényrel világítjuk meg, a lézerek adatai ismertek. Az ajánlott elektromos kapcsolást a 2. ábra mutatja.



1. ábra



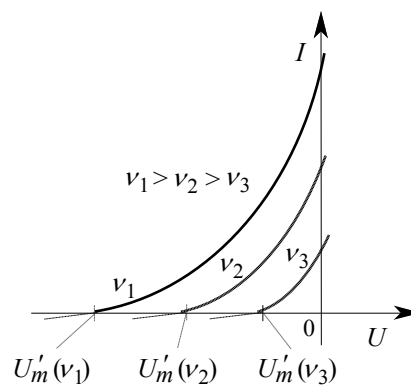
2. ábra

A cella katódja kálium, amely kis mértékben mindig párolog és kondenzálódhat is az anódon. Így, amikor az anódra negatív feszültséget kapcsolunk, akkor csekély megvilágítás hatására is képes elektronokat emittálni, s az így létrejövő negatív fotoáram meghamisítja a mérések eredményét. Ennek elkerülése érdekében úgy kell megvilágítani a katódot, hogy az anódot közvetlenül ne érje fény.

A fotoáram igen kis értéke miatt (nA) nagyon fontos a cella és a mérőeszközökhöz vezető kábelek gondos árnyékolása. Az anódra a mérés során 0 és -4 V közötti feszültséget kapcsolunk. A fotoáram-feszültség karakterisztika felvételét végezhetjük feszültség-mérőkkel (potenciométeres feszültség szabályozás).

A fotocella karakterisztikáját a kiadott lézerekkel történő megvilágítással vesszük fel.

A felvett karakterisztikák általában a 3. ábrán látható menetűek.



3. ábra

III. Mérési feladatok és számítások

1. Vegye fel a fotocella relatív fotoáram-cellafeszültség karakterisztikáit különböző frekvenciákon!
2. Határozza meg $U'_m(v_i)$ értékeit és számítsa ki h/e -t!

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

3. Mérési eredményét hasonlítsa össze az irodalmi értékkel! Adja meg az eltérés nagyságát és sorolja fel a főbb hibaforrásokat!

IV. Ellenőrző kérdések

1. A vizsgálatok során mérhet-e negatív fotoáramot?
2. Lézerek helyett milyen más megoldást javasolna ha monokromatikus fénnel kell megvilágítani a fotocellát?

V. Ajánlott irodalom

1. Hevesi I.: Elektromosság, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1998.
2. Budó Á.: Kísérleti fizika II., Tankönyvkiadó, Budapest, 1968.
3. Budó Á.: Kísérleti fizika III., Tankönyvkiadó, Budapest, 1977.
4. Hevesi I. - Szatmári S.: Bevezetés az atomfizikába, JATEPress, Szeged, 2004
5. Michailovits L.: III. éves laboratóriumi gyakorlatok, JATEPress, Szeged, 2004

A 8. számú laboratóriumi gyakorlat ábrái a Michailovits L.: III. éves fizikai laboratóriumi gyakorlatok (JATEPress, Szeged, 2004) című jegyzet 10. gyakorlatának ábrái alapján készültek.

Atomfizika és elektromosságtan laboratóriumi gyakorlat

9.

HALL-EFFEKTUS MÉRÉSE FÉLVEZETŐKBEN

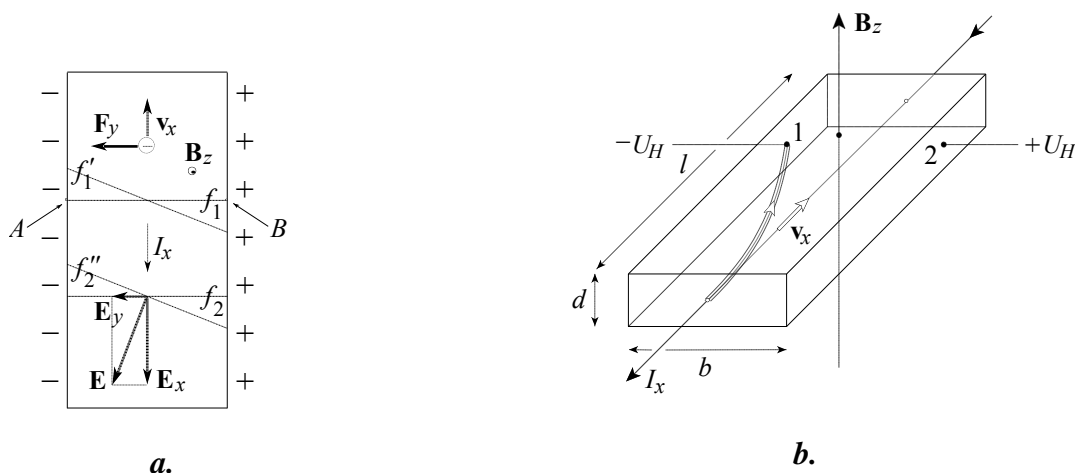
- Célkitűzés:**
- *töltéshordozók koncentrációjának és mozgékonyságának meghatározása félvezetőkben, az elektromos vezetőképesség és a Hall-feszültség mérésével.*

A gyakorlatot összeállította: *dr. Bohus János* egyetemi adjunktus
dr. Füle Miklós egyetemi docens
SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

I. A 9. gyakorlathoz kapcsolódó fizikai alapismeretek

- **A Hall-feszültség.** Ha egy fémből vagy félvezetőből készült lemezt – amelyen stacionárius áram halad keresztül – a síkjára merőleges mágneses térbe helyezünk, akkor az áram és a tér irányával párhuzamos lemezfelületek között U_H potenciálkülönbség lép fel (l. 1. ábra), amelyet *Hall-feszültségnek* nevezünk. Félvezetőkben a *Hall-feszültség* előjele negatív vagy pozitív, annak megfelelően, hogy a töltéshordozók negatív töltésű elektronok, vagy pozitív töltésű lyukak (*n*-típusú vagy *p*-típusú félvezető).



1. ábra

A Hall-effektus könnyen értelmezhető a következőképpen. *Ha nincs jelen mágneses tér*, akkor a lemezben folyó áram az E_x elektromos térerősségnek tulajdonítható (1a. ábra). Ennek a térnek az ekvipotenciális felületeit az 1a. ábrán az f_1 és f_2 vonalak jelzik. *Ha bekapcsoljuk a B_z mágneses teret*, akkor a töltéshordozókra a lemez b oldalával párhuzamosan F_y mágneses Lorentz-erő hat, amelynek nagysága:

$$F_y = e v_x B_z,$$

ahol v_x az elektronok driftsebessége. Az F_y erő hatására a lemez baloldali oldalfelületénél negatív töltéstöbblet jön létre, és ennek megfelelően a lemez jobb oldalfelületénél pozitív töltéstöbblet keletkezik. Ily módon az E_x mellett egy E_y elektromos tér is fellép. Ha ennek a térnek a töltésekre gyakorolt erőhatása kiegyenlíti az F_y Lorentz-erő hatását, vagyis ha

$$e E_y = e v_x B_z,$$

akkor keresztirányban a töltések stacionárius eloszlása lép fel. Az E_y az E_x térerősségek eredőjeként kapott E térerősséghez tartozó ekvipotenciális felületeket az 1a. ábrán az f_1' és f_2'' vonalakkal jelöltük. Az A és B pontok tehát most nem ugyanazon az ekvipotenciális felületen helyezkednek el. A két pont között tehát potenciálkülönbség lép fel, amelyet a következőképpen határozhatunk meg

$$U_H = b E_y = b v_x B_z .$$

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

Fejezzük ki v_x -et az ismert $J_x = \frac{I_x}{bd} = env_x$ összefüggésből, és helyettesítsük be U_H értékébe.

Ekkor azt kapjuk, hogy

$$U_H = b \frac{I_x}{enbd} B_z = \frac{1}{en} \frac{I_x B_z}{d} = R_H^* \frac{I_x B_z}{d},$$

azaz $U_H = (R_H^* I_x / d) \cdot B_z$, ahol rögzített I_x (és d esetében) U_H egyenesen arányos B_z -vel.

• **A Hall-állandó.** Az

$$R_H^* = \frac{1}{\pm en}$$

arányossági tényezőt *Hall-állandónak*, vagy *Hall-együtthatónak* nevezzük, amelynek előjelét a töltéshordozók töltésének előjele szabja meg.

Pontosabb számítások azt mutatják, hogy a Hall-együttható fémek és egytípusú szennyezéses félvezetők esetében általánosabban a következőképpen írható:

$$R_H = \frac{A}{\pm en},$$

ahol az A arányossági tényező értéke 1 és 2 között változik.

Az R_H Hall-együttható és A ismeretében a fenti összefüggésből meg tudjuk határozni a töltéshordozók n koncentrációját:

$$n = \frac{A}{\pm eR_H}$$

Ha n értékét ismerjük és ha mérni tudjuk a vizsgált anyag $\sigma = en\mu_n$ fajlagos vezetőképességét, akkor a

$$\mu_H = \sigma R_H$$

ún. *Hall-mozgékonyosság* is meghatározható.

A μ_H Hall-mozgékonyosság ismeretében az elektronok rácсионokkal való két, egymás utáni „ütközése” közt eltelt átlagos τ szabad idő megbecsülhető. Az E elektromos tér hatására az $a = eE/m^*$ gyorsulással mozgó töltéshordozók τ idő alatt

$$v = \frac{e}{m^*} E\tau$$

sebességre tesznek szert. Az m^* az elektronok effektív tömegét jelenti. Így a $\mu = v/E$ figyelembevételével a τ átlagos szabad idő:

$$\tau = \frac{m^*}{e} \mu_H = \frac{m^*}{e} \sigma R_H.$$

Germániumban és szilíciumban az effektív tömegek számításokhoz ajánlott átlagértékei:

$$m_{Ge}^* = 0,12 m_e, \text{ illetve } m_{Si}^* = 0,25 m_e,$$

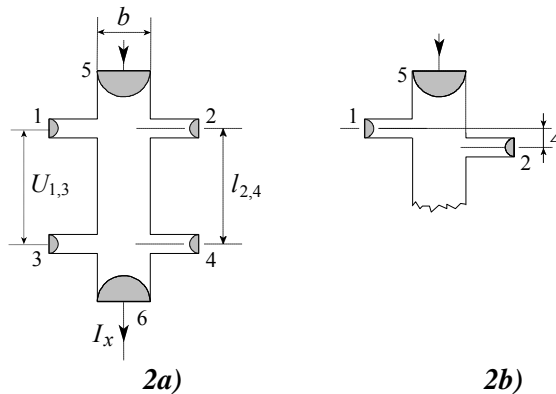
ahol m_e a szabad elektron tömege.

II. A mérés menete

A méréshez használt *Hall*-minta alakja a 2a. ábrán látható. A minta segítségével a *Hall*-feszültség mellett a minta geometriai adatait is ismerve, a $\sigma (=1/\rho)$ fajlagos vezetőképesség, az $R = U/I = \rho l/A$ összefüggés felhasználásával, az (1, 3) vagy (2, 4) kontaktusok között megjelenő $U_{1,3}$ vagy $U_{2,4}$ feszültség ismeretében a (2a. ábra), a

$$\sigma \left(= \frac{I l}{U A} \right) = \frac{I_x l_{1,3}}{U_{1,3} b d}, \quad \text{vagy a} \quad \sigma = \frac{I_x l_{2,4}}{U_{2,4} b d}$$

egyenletek alapján kiszámítható, ahol I_x a mintán átfolyó áramot, $bd(=A)$ a minta keresztmetszetét, $l_{1,3}$, illetve $l_{2,4}$ pedig az (1, 3), illetve (2, 4) kontaktusok közötti távolságot (a vezető hosszát) jelöli.

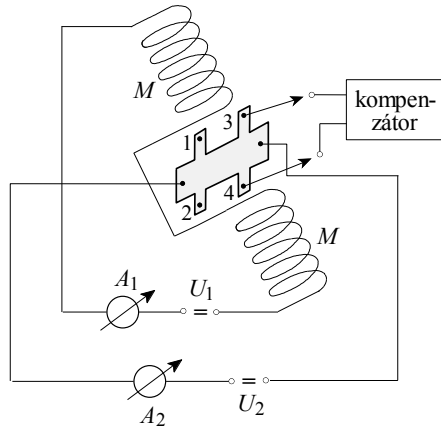


2. ábra

Előfordulhat, hogy a *Hall*-minta készítésénél az (1, 2) illetve (3, 4) elektródák nem szimmetrikusan, azaz nem ekvipotenciális vonal mentén kerülnek kialakításra: $\Delta \neq 0$ (2.b ábra). Ennek következményeként mágneses tér nélkül is, az I_x áram hatására feszültség lép fel az (1, 2), illetve (3, 4) *Hall*-elektródák között. Ez a „hibafeszültség” $B_z = 0$ esetben mérhető ($U'_{1,2}$, illetve $U'_{3,4}$), és ismeretében a $B_z \neq 0$ mágneses indukciójú tér hatására mért ($U_{1,2}$, illetve $U_{3,4}$) feszültségekből a *Hall*-feszültség kiszámítható:

$$U_H = U_{1,2} \pm U'_{1,2} \quad (= U_{3,4} \pm U'_{3,4}).$$

A mérő rendszer kapcsolási rajzát a 3. ábra mutatja. Az M elektromágneset változtatható egyenfeszültségű tápegységről (U_1) tápláljuk, az áramerősséget az A_1 ampermérőn olvashatjuk le. A mágnes pólusai közötti homogén tér B_z mágneses indukciójának nagyságát az áramerősség függvényében ismertnek vesszük. A vizsgált mintán keresztül bocsátott $I_x = \text{konstans}$ áramot az A_2 ampermérőn olvassuk le. Az U_H *Hall*-feszültséget az (1, 2), vagy a (3, 4) elektródák között mérjük, nagy belső ellenállású voltmérővel.



3. ábra

III. Mérési feladatok és számítások

1. Állítsa össze a Hall-feszültség méréséhez szükséges kapcsolást!
2. Különböző indukciójú mágneses terekben mérje meg a kiadott félvezető anyagok *Hall*-feszültségeit! (Egyszerűség okán kompenzátor helyett a gyakorlaton igen nagy bemenő-ellenállású $R_b \geq 10 \text{ M}\Omega$ voltmérőt használjon!)
3. Határozza meg a kapott félvezető anyagok vezetőképességét és vezetési típusukat!
4. Számítsa ki a kiadott anyagok *Hall*-koefficienseinek, a töltéshordozók koncentrációinak és a töltéshordozók mozgékonyságainak az értékeit ($A \approx 1$)!
5. Becsülje meg a τ átlagos szabadidő értékeit!
6. Vizsgálja meg, hogy a tekintett mérési tartományban észlelhető-e a *Hall*-koefficiens mágneses tértől való függése!

IV. Ellenőrző kérdések

1. Miként mérheti meg a *Hall*-elektródok aszimmetriájából eredő hibafeszültséget?
2. Szükséges-e a *Hall*-elektródok aszimmetriájából eredő feszültséget előzetesen meghatározni, vagy az más módon is kiküszöbölhető?
3. Miért célszerű a gyakorlat során a feszültségméréseket kompenzációs módszerrel végezni?
4. A gyakorlat során a *Hall*-feszültség mért előjele alapján hogyan határozza meg a vezetési jellegét (*n*- vagy *p*-típusú félvezető)?
5. Hogyan mérné meg a *B* mágneses indukciót a tekercsek között?



TÁMOP-4.1.1.C-12/1/KONV-2012-0005 projekt



„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

V. Felhasznált és ajánlott irodalom

1. Hevesi I.: Elektromosság, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1998.
2. Sz. Kirijev: Félvezetők fizikája, Tankönyvkiadó, Budapest, 1974.
3. Michailovits L.: III. éves fizikai laboratóriumi gyakorlatok, JATEPress, Szeged, 2004

A 9. számú laboratóriumi gyakorlat ábrái a Michailovits L.: III. éves fizikai laboratóriumi gyakorlatok (JATEPress, Szeged, 2004) című jegyzet 4. gyakorlatának ábrái alapján készültek.

Atomfizika és elektromosságtan laboratóriumi gyakorlat

10.

**B-H GÖRBE FELVÉTELE
OSZCILLOSKÓPPAL**

Célkitűzés: • a *mágneses hiszterézis tanulmányozása* ferromágneses anyagok esetén.

A gyakorlatot összeállította: *dr. Bohus János* egyetemi adjunktus
dr. Füle Miklós egyetemi docens
SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

I. A 10. gyakorlathoz kapcsolódó fizikai alapismeretek

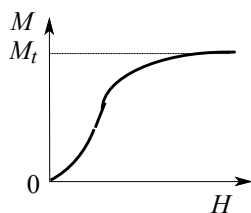
- Az anyag térfogategységére jutó mágneses momentumot, az \mathbf{M} mágnesezettségi vektort, az anyag belsejében a \mathbf{B} mágneses indukció vektort, valamint a \mathbf{H} mágneses térerősségvektort a következő összefüggés kapcsolja össze (l. ajánlott irodalom):

$$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{M}$$

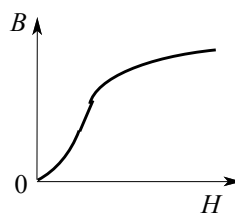
ahol μ_0 a vákuum-permeabilitás.

Ha egy tekercs belsejébe helyezett, kezdetben nem mágneses vasmintában a H térerősséget a tekercs áramának folyamatos növelésével növeljük, és a B vagy M értékeket H függvényében ábrázoljuk, akkor az 1., illetve 2. ábra szerinti $M = M(H)$, illetve $B = B(H)$ görbét kapjuk. Látható, hogy H növelésekor M csak bizonyos határig nő, ezen túl mágneses telítés következik be:

$$M = M_t = \text{állandó.}$$

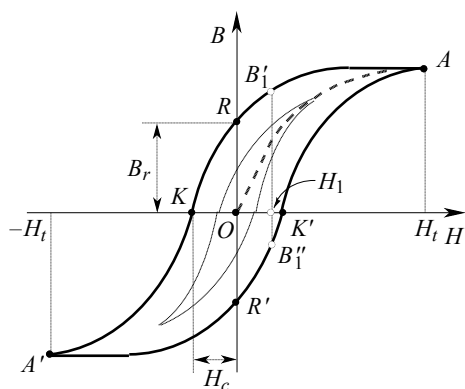


1. ábra



2. ábra

Ha a kezdetben nem mágneses vasmintát mágnesezzük telítésig (a 3. ábrán szaggatott OA görbe),



3. ábra

Mágneses hiszterézis görbe

ezután a tekercs áramának fokozatos változtatásával csökkentjük a H térerősséget H_t -ről nullára, ezt követően növeljük az ellenkező irányba $-H_t$ -ig, majd fokozatosan térünk vissza ismét H_t -re. Megmérve és ábrázolva az egyes H értékeknél a B értékeket, az $ARA'R'A$ zárt görbéhez jutunk. A 3. ábráról leolvasható, hogy a térerősség nagyságának csökkentésekor ugyanazon H értékekhez nagyobb B indukció tartozik, mint a térerősség növekedésekor. Ez a jelenség a *mágneses hiszterézis*, az $ARA'R'A$ görbe a *hiszterézishurok*, a még nem mágnesezett anyagra vonatkozó, nem megismétlődő OA görbe pedig az *első mágnesezési görbe*.

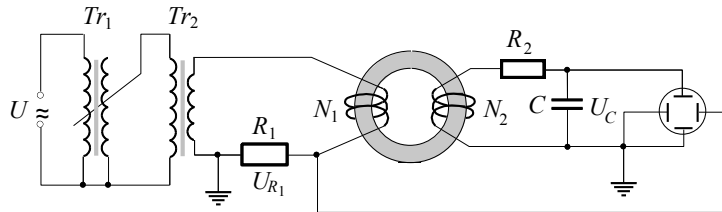
II. A mérés menete

Ferromágneses anyagok esetében a μ_r permeabilitás, ill. általánosabban a B és H közötti (első mágnesezési görbéből adódó)

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}$$

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

összefüggés meghatározását egy toroid alakú zárt anyaggyűrűvel végezhetjük, amelynek keresztmetszete: A , a gyűrű közepe sugara: r_k . Erre a gyűrűre tekercselünk egy N_1 menetszámú gerjesztő tekercset és egy N_2 menetszámú mérőtekercset (l. 4. ábra).



4. ábra

Ha a gerjesztő tekercsbe I_1 áramot vezetünk, akkor

$$H = \frac{N_1 I_1}{l}$$

mágneses térerősség jön létre a tekercs belsejében, ahol $l = 2r_k \pi$ a toroid középkörének a hossza. Célszerű váltóáramú gerjesztést alkalmazni. A gerjesztő tekercsre

$$U_1 = U_0 \sin \omega t$$

váltófeszültséget kapcsolva, a toroidban

$$U_0 \sin \omega t = N_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

összefüggésnek megfelelő fluxusváltozás lép fel. Ezen fluxusváltozás hatására a mérőtekercsben

$$U_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} = N_2 A \frac{dB}{dt}$$

nagyságú feszültség indukálódik. Ha a mérőtekercsrel sorba egy olyan $R_2 C$ integráló tagot kapcsolunk, amelyre $R_2 C \gg \omega^{-1}$, akkor a kondenzátor feszültsége a következő lesz:

$$U_C = \frac{1}{C} \int I_2 dt = \frac{1}{R_2 C} \int U_2 dt = \frac{1}{R_2 C} N_2 A B.$$

Így U_C mérésével a toroid belsejében a mágneses indukció meghatározható. A gerjesztő áram ismeretében $H(I_1)$ és így μ_r is számítható.

A mérési elrendezést a 4. ábra mutatja. A Tr_1 jelzésű toroid transzformátorral a Tr_2 jelzésű leválasztó transzformátoron keresztül változtatható feszültséget kapcsolunk az N_1 menetszámú gerjesztő tekercsre. Ennek hatására az N_2 menetszámú mérőtekercsben feszültség indukálódik. Az R_1 ellenálláson eső feszültség mérésével az I_1 gerjesztő áram és így a H mágneses térerősség kiszámítható. A C kondenzátoron megjelenő U_C feszültség mérésével pedig meghatározható a vasmagban kialakuló B mágneses indukció:

$$B = \frac{U_C R_2 C}{N_2 A}.$$

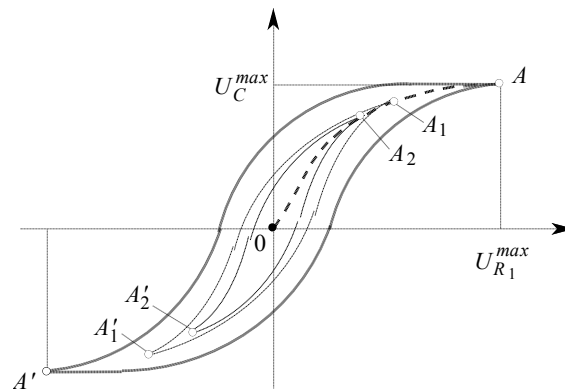
„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

A gerjesztő tekercs szinuszos árammal történő táplálása miatt természetesen mind az I_1 áramerősség, mind pedig az U_C feszültség, illetve a H és a B is időtől függő mennyiségek. Ha azonban $U_{R_1}(=I_1R_1)$ és $U_C - U_0$ -tól függő – maximális értékeivel számolunk, amely feszültség értékek az oszcilloszkóp képernyőjén megjelenő hiszterézisgörbe adataiból könnyen leolvashatók (l. 5. ábra A, A_1, A_2, \dots pontjait), akkor H -ra és B -re is az adott U_0 -hoz tartozó maximális értéket kapjuk. Tehát U_0 értékét a Tr_1 toroid transzformátorral szabályozva, az 5. ábrán látható hiszterézisgörbék A, A_1, A_2 pontjaihoz tartozó $U_{R_1}^{max}, U_C^{max}$ értékekből az összetartozó $H, B; H_1, B_1; H_2, B_2; \dots; H_i, B_i$ értékpárok számíthatók:

$$H_i = \frac{N_1 \frac{U_{R_1}^{max}}{R_1}}{l},$$

$$B_i = \frac{U_C^{max} R_2 C}{N_2 A}.$$

Az A, A_1, A_2, \dots, A_i pontokat összekötő görbe az első mágnesezési görbét határozza meg, amelynek ismeretében a $\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}$ összefüggésből a $\mu_r = \mu_r(H)$ meghatározható.



5. ábra

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

III. Mérési feladatok és számítások

1. Állítsa össze a 4. ábrán átható kapcsolást!
2. Digitális oszcilloszkóppal rögzítse a B - H görbé(ke)t!
3. Az oszcilloszkóp X, Y bemenetei V/osztás érzékenység értékeinek ismeretében és az 5. ábrán látottak figyelembevételével, továbbá az egyes H , B ; H_1 , B_1 ; H_2 , B_2 ; ...; H_i , B_i értékpárok, valamint az $M = M_i =$ állandó összefüggés felhasználásával számítsa ki μ_r értékeit és ábrázolja a $\mu_r = \mu_r(H)$ görbét! (A számításokhoz szükséges további adatok a gyakorlathoz kiadott eszközök felsorolásában található.)

IV. Ellenőrző kérdések

1. Mi a különbség a légmagos és vasmagos tekercsek között?
2. Mely ferromágneses anyagok alkalmasak permanens mágnesek előállítására?
3. Mi a különbség a hiszterézisveszteség és az örvényáramú veszteség között?
4. Mi a magyarázata annak, hogy $H \rightarrow \infty$ esetén $\mu_r \rightarrow 1$ -hez?
5. Hogyan változik egy légréssel ellátott zárt vasmag B - H görbéje ha növeljük a légré méretét?
6. Hogyan változik a B - H görbe a gerjesztő áram frekvenciájának növelésével?

V. Felhasznált és ajánlott irodalom

1. Hevesi I.: Elektromosság, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1998.
2. Simonyi K.: Villamosság, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1983.
3. Michailovits L.: III. éves fizikai laboratóriumi gyakorlatok, JATEPress, Szeged, 2004

A 10. számú laboratóriumi gyakorlat ábrái a Michailovits L.: III. éves fizikai laboratóriumi gyakorlatok (JATEPress, Szeged, 2004) című jegyzet 5. gyakorlatának ábrái alapján készültek.

Atomfizika és elektromosságtan laboratóriumi gyakorlat

11.

ELEKTROMÁGNESES HULLÁM TERJEDÉSE HULLÁMVEZETŐBEN

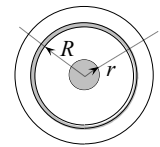
- Célkitűzés:**
- az elektromos energia szállítási lehetőségeinek vizsgálata nagyfrekvenciás jelek esetén.

A gyakorlatot összeállította: *dr. Bohus János* egyetemi adjunktus
dr. Füle Miklós egyetemi docens
SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

I. A 11. gyakorlathoz kapcsolódó fizikai alapismeretek

- **A telegráfegyenlet; a hullámellenállás.** Az elektromágneses energiának az egyik áramkörtől a másikig való továbbításánál célszerű a szállítási veszteség csökkentése. Kisfrekvenciás áramkörökben a veszteségmentes vezetésre jól megfelel a közönséges vezeték, nagy frekvenciákon (> 1 kHz) azonban a sugárzási veszteségek – hátrányosan – megnövekednek. Megoldást jelent, ha a nagyfrekvenciás jeleket, az elektromágneses energiát ún. *hullámvezetőkön* továbbítják. A legelterjedtebb hullámvezető az ún. *koaxiális kábel* (l. 1. ábra). Ez egy R sugarú, henger alakú, külső vezetőből és a kábel közepén húzódó r sugarú vezetékszálból áll. E két vezető között szigetelő anyag van. Hullámellenállása a geometriai méretektől és a szigetelő anyag minőségétől függően $(50 - 200) \Omega$ között van. Csillapítása a kis sugárzási veszteségek miatt kicsi.



A következőkben röviden összefoglaljuk a hullámvezetőkre vonatkozó legfontosabb összefüggéseket. A kábel egységnyi szakaszra jutó ellenállása, induktivitása, kapacitása és a két vezető rész közötti nem tökéletes szigetelésből származó ún. „átvezetés” egyenletesen oszlik el a vezeték mentén, s ezért a vezeték ún. *elosztott paraméterű* rendszer. Jellemző paraméterek a *kettős vezeték hosszegységére vonatkoztatott ellenállás* (R), *induktivitás* (L), *kapacitás* (C) és *átvezetés* (G). Igen hosszú vezeték szakaszon vizsgálva a feszültség hely- és időfüggését, az ún. *telegráfegyenlethez* jutunk (l. ajánlott irodalom):

1. ábra

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = LC \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} + (RC + GL) \frac{\partial U}{\partial t} + RGU$$

Teljesen hasonló egyenlet vezethető le I -re is. Ezek az egyenletek képezik az alapját a hullámvezetők elméletének.

Ha a G átvezetés elhanyagolható kicsiny és $R \ll L\omega$, akkor tetszőleges R, L, C mennyiségek esetén a telegráfegyenletet kielégíti az

$$U = U_0 e^{-\alpha x} \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right)$$

függvény, amely csillapított amplitúdójú hullámot jelent.

- **Csillapítási tényező és terjedési sebesség.** A α csillapítási tényező és a v fázissebesség is általában függ a frekvenciától. Ha $R \ll L\omega$, akkor:

$$\alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$$

és

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \left(1 - \frac{1}{8} \frac{R^2}{L^2 \omega^2} \right)$$

Említettük, hogy általában a csillapítás és a fázissebesség is függ a frekvenciától, tehát diszperzió lép fel a hullámterjedés alatt. Nagy frekvenciákon azonban $(\omega \rightarrow \infty)v$ az alábbi módon közelíthető:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}}$$

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

ahol c a fény sebessége vákuumban, μ_r a relatív permeabilitás, ε_r a relatív dielektromos állandó.

A hullámvezetők jellemezhetők a Z_0 komplex *hullámellenállással* vagy karakterisztikus impedanciával, amely egy x irányban haladó hullámnál az $U(x,t)$ feszültség, valamint az $I(x,t)$ áramerősség hányadosa, ami helytől és időtől független:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + jL}{G + jC}}.$$

A Z_0 komplex értéke azt jelenti, hogy a (*haladó*) *feszültség- és áramhullám között általában fáziskülönbség lép fel*. Veszteségmentes vezeték esetében ($R = 0, G = 0$) a fázis-különbség zérus.

• **A vezeték végén fellépő jelenségek.** A hullámellenállás csak abban az esetben adja meg egy vezeték tetszés szerinti pontjában a mért feszültség és áramerősség hányadosát, ha a vezetékben csak egyirányú hullám terjed. Ez végtelen hosszú vezeték esetén lehetséges, vagy véges hosszúságú vezeték esetén akkor, ha a vezeték végét a Z_0 hullámellenállásnak megfelelő Z impedanciával (pl. fogyasztóval) zárjuk le. Ez utóbbi a gyakorlati felhasználás szempontjából fontos speciális esetet jelent, mivel nem történik visszaverődés, így a vezeték végére jutó teljes energiát a fogyasztó használja fel – a lezáró impedancia *illesztve* van a vezetékhez ($Z = Z_0$).

Ha a vezeték végére egy $Z (\neq Z_0)$ komplex ellenállású fogyasztót csatlakoztatunk, az impedanciák különbözősége folytán a feszültség- és áramhullámnak egy része bizonyos „fázisugrással” visszaverődik, s emiatt a vezetékben a $+x$ és $-x$ irányban haladó hullámokon kívül állóhullámok is kialakulnak. A reflektált jelet jellemezni lehet az ún. R_r *reflexiókoefficienssel*. R_r abszolút értéke azt mutatja meg, hogy a jel hányszorosa verődik vissza, R_r fázisa pedig azt, hogy a visszavert hullám mennyit siet vagy késik a beeső hullámhoz képest. Az R_r reflexiókoefficiens definíciója szerint:

$$R_r = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}.$$

Tiszta haladó hullámok esetén az amplitúdó-eloszlás a vezeték mentén egyenletes, tiszta állóhullámok esetén pedig egy maximum és nulla érték között változik. Általános esetben a feszültség amplitúdójának eloszlása ezen két érték közé esik. Az amplitúdó-eloszlás hullámosságát jellemezhetjük a σ *állóhullám-viszonnyal*, amelyen a maximális amplitúdó és a minimális amplitúdó viszonyát értjük:

$$\sigma = \frac{U_{\max}}{U_{\min}},$$

vagy R_r -rel kifejezve:

$$\sigma = \frac{1 + |R_r|}{1 - |R_r|}.$$

Ez a kifejezés *egyed* ad abban az esetben, ha nincs állóhullám, és *végtelent* ad, ha csak állóhullám van, így ezzel is jellemezni lehet a lezáró ellenállás illesztését a Z_0 -hoz.

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

A hullámellenállás nagyságát koaxiális kábelek esetén a vezeték geometriai méretei és a dielektrikum anyagi minősége a következő összefüggés szerint határozza meg:

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \ln \frac{R}{r},$$

ahol $\mu_0 \mu_r$ és $\epsilon_0 \epsilon_r$ a két vezető közötti anyag mágneses permeabilitása, illetve dielektromos állandója. Ha egy adott hullámellenállású hullámvezetőre rövid feszültségimpulzust bocsátunk, attól függően, hogy a vezető végét mekkora hullámellenállású fogyasztóval zárjuk le, az impulzus teljesen, részlegesen, vagy egyáltalán nem verődik vissza. (Szabad vég esetén fázisugrás nélkül, rövidre zárt vég esetén fázisugrással teljesen visszaverődik.)

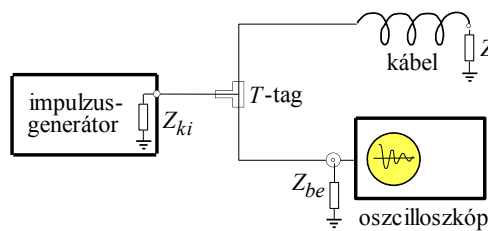
II. A mérés menete

Hullámvezetőben az elektromágneses hullám terjedésének vizsgálatához a 2. ábrán látható elrendezést használjuk. Tranziens gerjesztőforrásként egy impulzusgenerátor által előállított impulzussorozatot alkalmazunk, a kábelben terjedő jeleket oszcilloszkóppal figyeljük meg.

Az ϵ_r dielektromos állandó és a Z_0 hullámellenállás meghatározásához a $v = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}}$ és az

$Z_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \ln \frac{R}{r}$ egyenleteket használjuk fel, miután megmértük az adott kábel hosszát és a

vezeték végéről visszavert jel visszaérkezési idejét. A kábelek további geometriai adatait a gyakorlatvezető adja meg.



2. ábra

III. Mérési feladatok és számítások

1. Vizsgálja meg és rajzolja le az impulzusgenerátor kimenő jelének legfontosabb paramétereit: a jelalakot, az amplitúdót, a felfutás időt, a félértékszélességet (amely az amplitúdó felénél a jel időbeli szélessége)!
2. Határozza meg adott koaxiális kábelek dielektrikumának ϵ_r dielektromos állandóját, és ebből számolja ki a kábelek Z_0 hullámellenállását, feltételezve a $\mu_r = 1$ összefüggés teljesülését!
3. Vizsgálja meg, hogyan verődik vissza a kábelvégről az impulzus
 - a) szabad vég,
 - b) rövidre zárt vég és

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

c) a kiadott változtatható Z impedanciájú ellenállással lezárt vég esetén!

Határozza meg a c) feladat alapján is a kiadott kábelek hullámellenállását, és adja meg ezek eltérését a 2. feladatban számított értéktől!

IV. Ellenőrző kérdések

1. Szabad és rövidre zárt végről való visszaverődés esetén miért látunk több, egyre csökkenő amplitúdójú jelet az oszcilloszkóp ernyőjén?
2. Általában a $\sigma = 2$ -t még jól elfogadhatónak tartják a gyakorlatban. Számolja ki ebben az esetben, hogy a betáplált energia hány százaléka verődik vissza a kábel végéről?
3. Ismertessen legalább két gyakorlati esetet az impedanciaillesztés szerepével kapcsolatban.

V. Felhasznált és ajánlott irodalom

1. Hevesi I.: Elektromosság, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1998.
2. Budó Á.: Kísérleti fizika II., Tankönyvkiadó, Budapest, 1968.
3. Simonyi K.: Elméleti villamosság, Tankönyvkiadó, Budapest, 1963.
4. Michailovits L.: III. éves fizikai laboratóriumi gyakorlatok, JATEPress, Szeged, 2004

A 11. számú laboratóriumi gyakorlat ábrái a Michailovits L.: III. éves fizikai laboratóriumi gyakorlatok (JATEPress, Szeged, 2004) című jegyzet 27. gyakorlatának ábrái alapján készültek.



TÁMOP-4.1.1.C-12/1/KONV-2012-0005 projekt



„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

Atomfizika és elektromosság tanlaboratóriumi gyakorlat

12.

A TRANSZFORMÁTOR VIZSGÁLATA

- Célkitűzés:**
- *a transzformátor működésének, fázisviszonyainak és a reális transzformátornál fellépő különböző veszteségeknek a tanulmányozása.*

A gyakorlatot összeállította: *dr. Bohus János* egyetemi adjunktus
dr. Füle Miklós egyetemi docens
SZTE Kísérleti Fizikai Tanszék

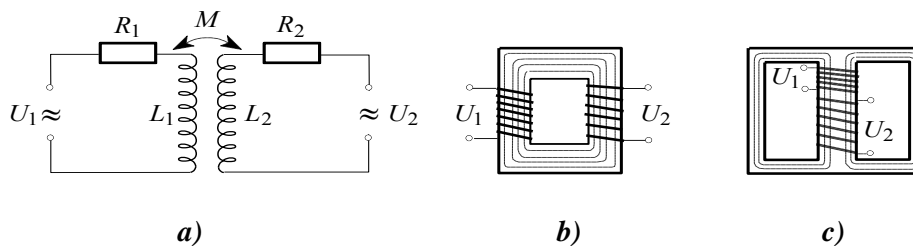


„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

I. A 12. gyakorlathoz kapcsolódó fizikai alapismeretek

- **A transzformátor felépítése.** A váltóáramú hálózatok egyik leggyakrabban használt eleme a transzformátor. Alkalmazását az a tulajdonsága indokolja, hogy viszonylag csekély teljesítményvesztés árán a váltófeszültséget szolgáltató energiaforrás feszültsége tetszés szerinti értékre fel- vagy letranszformálható. Ezen kívül pl. erősítőfokozatok galvanikus leválasztására, feszültségforrások és terhelések közti impedancia illesztésére alkalmazható.

A transzformátor két vagy több egymáshoz szorosan csatolt tekercsből áll. Elvi vázlata, illetve felépítése az 1. ábrán látható. A gyakorlatban a transzformátorokat – eltekintve az egészen magas rádiófrekvenciákon használatos légmagos tekercsesektől – mindig jól mágnesezhető anyagokra tekercselik azért, hogy a szükséges induktivitás minél kisebb menetszámmal legyen megvalósítható. Kisebb menetszám esetén a veszteség is kevesebb, növekszik a tekercs jóságai tényezője, csökken a szórt mágneses tér. A transzformátoroknál az *R ohmikus* ellenállás értéke lényegesen kisebb, mint az induktív ellenállás $L\omega$ értéke.



1. ábra

A transzformátor két (vagy több) tekercse közül azt, amelyikre a külső – általában időben szinuszosan változó – feszültséget kapcsoljuk, *primer tekercsnek* nevezzük. A primer tekercsben folyó áram változó indukciófluxust hoz létre a tekercs belsejében lévő vasmagban, és ez feszültséget indukál a másik (illetve a többi) tekercsben is. Ez utóbbi(aka)t *szekunder tekercs(ek)nek* nevezzük. Ha a primer tekercsre úgy kapcsolunk feszültséget, hogy a szekunder kivezetéseket szabadon hagyjuk, *üresjárásról*, ha pedig kicsi ellenálláson keresztül zárjuk azokat, *rövidzárásról* beszélünk. A transzformátor névleges feszültsége, névleges árama és névleges teljesítménye azok a jellemző értékek, amelyekkel a transzformátor hosszabb ideig káros melegedés nélkül üzemelhet.

- **Ideális (vesztésmentes) transzformátor.** Ha a transzformátort veszteségmentesnek, valamint az indukciófluxusnak a vasmagon kívül eső részét elhanyagolhatónak tekintjük, akkor bármely tekercs bármely menetében ugyanakkora a fluxusváltozás, és a transzformátor a primer oldalon felvett teljesítményt a szekunder oldalon leadja. Ebből adódóan:

$$\frac{U_p}{U_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} = n,$$

ahol a primer, illetve a szekunder tekercsben indukált feszültségeket U_p -vel, illetve U_s -sel, a tekercsek áramait I_p -vel, illetve I_s -sel, a menetszámokat N_p -vel, illetve N_s -sel jelöltük. Attól függően, hogy az *n áttételi szám* 1-nél kisebb vagy nagyobb, *fel-, illetve letranszformálásról* beszélünk. Az előbbivel igen nagy feszültségek, az utóbbival igen nagy áramerősítések állíthatók elő.

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

Terheletlen transzformátoron a disszipált teljesítmény átlagértéke:

$$P_{\text{át}} = \frac{1}{T} \int_0^T U_0 \sin \omega t \cdot I_0 \sin(\omega t + \delta) dt = 0.$$

- **Reális transzformátor.** Változó frekvenciájú jelek átvitelére alkalmazott transzformátorok (pl. mikrofonok, hangszórók illesztő transzformátorai, erősítő fokozatok közötti csatoló transzformátorok) jellemzőivel e gyakorlat keretében nem foglalkozunk. A továbbiakban kizárólag hálózati (50 Hz) frekvencián működő transzformátorok különböző veszteségeit és hatásfokát vizsgáljuk.
- **A transzformátor jellemzői.** *Vasveszteség.* Terheletlen transzformátornál a primer oldalon a hálózathoz felvett $P_{\text{üh}}$ *üresjárási hatásos teljesítmény* kicsi, mert a primer tekercs általában nagy induktivitású, így a primer üresjárási impedancia ($Z_{\text{ü}} = L_{\text{ü}}\omega$) nagy, és a fázistolás közel 90° :

$$P_{\text{üh}} = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \cos \varphi \approx 0.$$

Az üresjárásban mért primer hatásos teljesítmény tehát gyakorlatilag csak a vasmag periodikus átmágnesezéséből származó *örvényáramú* és *hiszterézis veszteségből* adódik. Ennek neve: *vasveszteség*.

Tekercsveszteség vagy rézveszteség. A transzformátorban folyó áram mind a primer, mind a szekunder tekercsben *Joule*-féle hőt fejleszt, ami szintén a primer oldalon betáplált elektromos energia rovására történik. Ha a szekunder oldalt rövidre zárjuk, a rövidzárási áram fluxusa gyakorlatilag teljesen lerontja a primer áram fluxusát, így a primer induktivitás és ezen keresztül a primer kör impedanciája jelentősen lecsökken. Ennek következtében a primer feszültség névleges értéken tartásához rendkívül nagy primer áram alakulna ki, amelyet lényegében a primer tekercs ohmos veszteségi ellenállása határozná meg. Az ekkor mért P_{rh} *primer hatásos teljesítmény* neve: *rézveszteség*. Rézveszteség (vagy tekercsveszteség) gyakorlatilag csak terheletlen transzformátornál lép fel, a vasveszteség üresjárásnál is.

A rézveszteséget tehát rövidre zárt szekunder tekercs mellett mérjük, de csak olyan kicsi primer feszültséggel, hogy a kialakuló primer vagy szekunder áram ne lépje túl a megengedett (névleges) értéket. *Szórás fluxus okozta veszteség.* Annak ellenére, hogy a vasmag zárt, nem minden erővonal záródik a transzformátor vasmagjában. Azok az erővonalak, amelyek nem haladnak át mind a primer, mind a szekunder tekercsen, szórt fluxust eredményeznek. A primer tekercs üresjárásban megmért $Z_{\text{ü}} = L_{\text{ü}}\omega$ impedanciája és a rövidre zárt szekunder kör mellett megmért $Z_r = L_r\omega$ rövidzárási impedanciája ismeretében megadhatjuk az úgynevezett *szórás tényezőt*:

$$\sigma = \frac{Z_r}{Z_{\text{ü}}}.$$

Ennek értéke arra jellemző, hogy az egyik tekercs által létrehozott fluxus milyen mértékben szóródik (vagyis milyen mértékben nem fogja át a másik tekercs felületét) pl. rosszul összefogott vasmag esetén.

Ezzel ellentétesen változó jellemző a $k = M/M_{\text{max}}$ ($0 \leq k \leq 1$) *csatolási tényező*. Az M és az M/M_{max} mennyiségek közti különbség annál nagyobb, minél kevesebb a két tekercs közös indukciójának száma, vagyis „laza” a csatolás közöttük. Kimutatható, hogy a csatolási tényező és a szórás tényező közötti kapcsolat:

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

$$\sigma \approx 1 - k^2.$$

A *transzformátor hatásfoka*. A transzformátor hatásfokát a szekunder terhelésen leadott, és a primer oldalon betáplált teljesítmény hányadosával definiáljuk:

$$\eta = \frac{P_s}{P_p}.$$

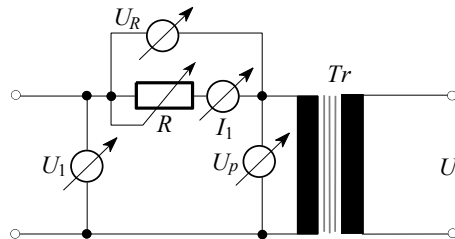
Ez a hatásfok a 90%-ot is elérheti a szokásosan használt transzformátoroknál.

II. A mérés menete

- **Az áttételi szám meghatározása.** Az áttételi szám meghatározásához keressük meg a transzformátor primer és szekunder tekercseinek kivezetéseit. Ezek ismeretében kapcsoljunk a primer tekercsre ismert feszültséget és mérjük meg a terheletlen szekunder tekercsen lévő feszültséget. Az n áttételi számot a primer tekercsen mért U_p és a szekunder tekercsen mért U_s feszültségek hányadosaiból számítjuk:

$$n = \frac{N_p}{N_s} \approx \frac{U_p}{U_s}.$$

- **A vasvesztés mérése.** A vasvesztés mérése a primer kör üresjárási veszteségének mérésén alapszik, ugyanis üresjárásnál a *Joule-hő* kicsi, így a felvett energia gyakorlatilag a vasvesztés fedezésére fordítódik. A mérést a 2. ábrán látható kapcsolásban végezzük.

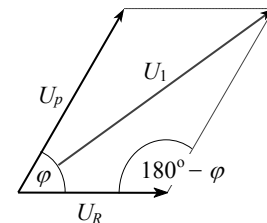


2. ábra

A primer körbe egy R ohmos ellenállást sorba kötve megmérjük U_1 , U_R , U_p és I_1 értékeit. A három feszültség alapján vektor ábrát rajzolva (l. 3. ábra), az U_p és U_R közötti φ szög lesz a számításokhoz szükséges fázisszög. Könnyen belátható, hogy a *teljesítménytényezőt*, valamint a *vesztéséget* a következő összefüggések adják:

$$\cos\varphi = \frac{U_1^2 - U_R^2 - U_p^2}{2U_R U_p},$$

$$P_{1h} = U_p I_1 \cos\varphi = \frac{U_1^2 - U_R^2 - U_p^2}{2U_R} I_1.$$



3. ábra

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

A vasvesztés mérésénél a szekunder oldali tekercsek nyitva maradnak, azokra semmiféle terhelést nem kötünk. Mivel a vasvesztés közelítőleg a feszültség négyzetével arányos, feltétlenül szükséges, hogy a mérést a tekercs névleges, üzemi feszültségénél végezzük. (A 2. ábra kapcsolásában U_p -nek kell a névleges feszültség-értékűnek lennie).

- **A tekercsvesztés mérése.** A tekercsvesztés mérése a transzformátor szekunder tekercsének rövidre zárási állapotában történik. Rövidzárásnál a felvett primer teljesítmény egyenlőnek vehető a tekercsvesztéssel, mivel rövidzáraskor a felvett elektromos energia túlnyomó része *Joule*-hő formájában disszipálódik.

Névleges primer feszültségnél nem lehet huzamosabb időn keresztül rövidre zárnunk a szekunder kapcsokat, mivel a tekercsek túlságosan felmelegsznek, sőt le is éghetnek. Ezért a mérést olyan primer feszültséggel végezzük, amelynél a rövidre zárt szekunder körben a névleges üzemi áram folyik.

A tekercsvesztés mérése szintén a 2. ábrán feltüntetett kapcsolásban történik, azzal az eltéréssel, hogy a szekunder kapcsokat most elhanyagolható belső ellenállású áramerősség-mérővel rövidre zárjuk.

- **A szórás fluxus okozta veszteség mérése.** Váltakozóáramú hídban, vagy egyéb impedancia-mérő műszerrel megmérve a primer tekercs induktivitását nyitott szekunder tekercs esetén, majd rövidre

zárt szekunder tekercs esetén, a $\sigma = \frac{Z_r}{Z_z}$ és $\sigma \approx 1 - k^2$ összefüggések felhasználásával kiszámíthatjuk a szórás, valamint a csatolási tényezőt.

- **A transzformátor hatásfokának mérése.** A transzformátor hatásfokának meghatározása ugyancsak a 2. ábrán feltüntetett kapcsolásban történik úgy, hogy a primer tekercsre névleges feszültséget, a szekunder oldalra pedig fogyasztóként árammérő közbeiktatásával változtatható, R_t ohmos ellenállást kapcsolunk. Az R_t terhelő ellenállást fokozatosan csökkentve mérjük az azon átfolyó áramot, és a terhelt szekunder kivezetéseken eső U_t feszültséget. Ebből egyszerűen számítható a terhelő ellenállás és a leadott teljesítmény nagysága:

$$R_t = \frac{U_t}{I_t}, \text{ illetve } P_t = U_t I_t .$$

A P_t teljesítmény maximuma annál az ellenállás értéknél lesz, amely illeszkedik a transzformátorhoz.

A maximális teljesítmény esetében megmérve a primer körben a teljesítményt az $\eta = \frac{P_s}{P_p}$ összefüggés felhasználásával kiszámíthatjuk a transzformátor hatásfokát is.

III. Mérési feladatok és számítások

1. Adott transzformátor primer és szekunder tekercseinek ismeretében határozza meg az áttételi számokat!
2. Mérje meg a transzformátor vasvesztését! Amennyiben az árammérő műszer belső ellenállása nem elhanyagolható, úgy azt is vegye figyelembe!
3. Mérje meg a transzformátor tekercsvesztését!
4. Határozza meg a transzformátor szórás és csatolási tényezőjét!

„Ágazati felkészítés a hazai ELI projekttel összefüggő képzési és K+F feladatokra”

5. Mérje meg és ábrázolja a terhelt transzformátor által leadott teljesítményt a terhelő ellenállás függvényében!
6. Kétsugaras oszcilloszkóppal vizsgálja meg a primer és a szekunder tekercsek feszültsége, illetve árama közötti fáziskülönbséget! (Készítsen a vizsgálat előtt kapcsolási vázlatot!)

IV. Ellenőrző kérdések

1. Miért lemezekből készítik a transzformátorok vasmagjait?
2. Miért folyik a terheletlen transzformátor primer tekercsében áram?
3. Mi történik akkor, ha a transzformátorhuzal megsérül, és két szomszédos menet között átvezetés jön létre?
4. Terhelés hatására hogyan változik a primer és szekunder feszültség közötti fáziseltérés?
5. Miért lényeges, hogy a vasvesztéseget a névleges feszültség mellett mérjük?
6. Milyen értékek között változhat a szórási tényező?

V. Felhasznált és ajánlott irodalom

1. Hevesi I.: Elektromosság, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1998.
2. Budó Á.: Kísérleti Fizika II., Tankönyvkiadó, Budapest, 1968.
3. Török M.: Elektronika, JATEPress, Szeged, 2000.
4. Michailovits L.: III. éves fizikai laboratóriumi gyakorlatok, JATEPress, Szeged, 2004

A 12. számú laboratóriumi gyakorlat ábrái a Michailovits L.: III. éves fizikai laboratóriumi gyakorlatok (JATEPress, Szeged, 2004) című jegyzet 25. gyakorlatának ábrái alapján készültek.