

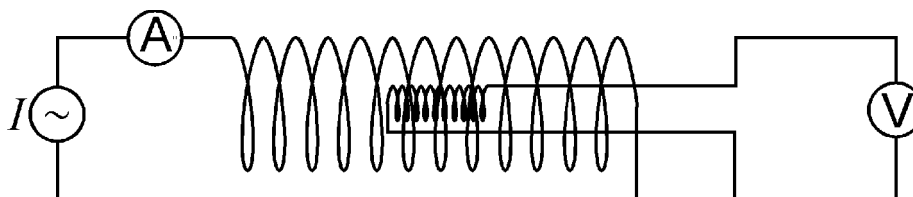
03. Elektromagnetska indukcija

1. Ključni pojmovi

Magnetsko polje solenoida, magnetski tok, Faradayev zakon indukcije

2. Teorijski uvod

U ovoj vježbi proučavat ćemo Faradayev zakon indukcije¹ na primjeru inducirane elektromotorne sile u zavojnici koja se nalazi u vremenski promjenjivome magnetskom polju. Promatrat ćemo napon induciran u maloj zavojnici koja je uložena u veliku zavojnicu čije je polje homogeno u prostoru, ali vremenski promjenjivo (slika 1).



Slika 1. Shema sklopa za proučavanje magnetske indukcije

Velika zavojnica napaja se strujom iz generatora izmjeničnog signala promjenjive frekvencije

$$I = I_0 \sin \omega t. \quad (1)$$

Polje u njoj određeno je strujom I , gustoćom zavoja $n = N/L$ i geometrijom zavojnice²:

$$B = \frac{\mu_0 n I}{2} (\cos \vartheta_1 - \cos \vartheta_2), \quad (2)$$

gdje su ϑ_1 i ϑ_2 kutovi pod kojima se "vide" otvori zavojnice s mjesta na kojem promatramo polje. Za točku u središtu zavojnice, vrijedi $\vartheta_1 = \pi - \vartheta_2$ pa možemo pisati

$$\cos \vartheta_1 = -\cos \vartheta_2 = \frac{L/2}{\sqrt{(L/2)^2 + b^2}}, \quad (3)$$

gdje je L duljina zavojnice, a b njezin polumjer. Polje u središtu zavojnice je

$$B = \mu_0 n I \frac{L/2}{\sqrt{(L/2)^2 + b^2}}. \quad (4)$$

Ako je zavojnica mnogo dulja od svoga promjera, možemo zanemariti b^2 u jednadžbi (4) pa za polje u njezinu središtu vrijedi formula za polje beskonačno dugog solenoida²:

$$B = \mu_0 n I = \mu_0 I \frac{N}{L}. \quad (5)$$

¹ vidi "Udžbenik fizike Sveučilišta u Berkeleyu" - Svezak II, str. 156.-159. ili drugu literaturu

² vidi "Udžbenik fizike Sveučilišta u Berkeleyu" - Svezak II, str. 134, jedn. (6.44) i (6.45) te slika 6.16 ili drugu literaturu

To polje usmjereno je duž osi zavojnice i prilično je homogeno tako dugo dok se ne približimo njenim krajevima. Budući da je struja I izmjenična, polje B mijenja se u vremenu

$$B(t) = \mu_0 \frac{N}{L} I_0 \sin \omega t . \quad (6)$$

Ako je u središte velike zavojnice umetnuta mala zavojnica poprečnog presjeka A i broja zavoja N_z , magnetski tok kroz jedan njezin zavoj bit će

$$\Phi_{zavoj} = \vec{B} \cdot \vec{A} , \quad (7)$$

a tok kroz N_z zavoja male zavojnice bit će

$$\Phi = B \cdot A \cdot N_z . \quad (8)$$

Faradayev zakon indukcije kaže nam da će inducirani napon na krajevima male zavojnice iznositi

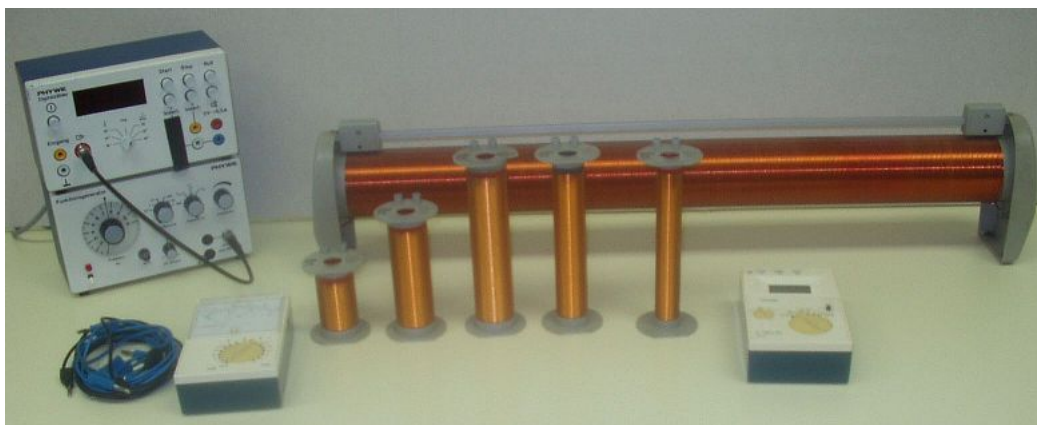
$$U = - \frac{d\Phi}{dt} . \quad (9)$$

Iz jednadžbi (6), (8) i (9) dobivamo iznos inducirano napona:

$$U(t) = - \mu_0 \frac{N}{L} A N_z I_0 \omega \cos \omega t . \quad (10)$$

Uočavamo da će uz istu amplitudu struje kroz veliku zavojnicu, napon induciran u maloj zavojnici ovisiti o frekvenciji izmjenične struje te o broju zavoja i poprečnom presjeku male zavojnice.

3. Mjerni uređaj i mjerenje



Slika 2. Elementi mjernog postava

Mjerni uređaj (slika 2) sastoji se od generatora izmjeničnog signala, mjerača frekvencije, ampermetra, voltmetra, velike zavojnice i pet malih zavojnica. Gustoća zavoja velike zavojnice iznosi $n = N/L = 485 \text{ m}^{-1}$. Tri male zavojnice imaju po 300 zavoja ($N_z = 300$), a njihovi promjeri ($2r$) jesu 41 mm, 33 mm i 26 mm. Postoje još dvije zavojnice promjera $2r = 41 \text{ mm}$ sa 100 i 200 zavoja.

Sklop se spaja prema shemi na slici 1. Treba voditi računa da se mala zavojnica uloži što bliže središtu velike. Iz generatora signala napaja se velika zavojnica. Jakost struja kroz nju mjeri se analognim ampermetrom za izmjeničnu struju. Frekvencija signala mjeri se mjeračem frekvencija koji se priključuje koaksijalnim kabelom na izvor, paralelno s velikom zavojnicom. Kad se na izvoru namjesti određena frekvencija, treba je izmjeriti nekoliko puta da bi se dobila preciznija vrijednost. Napon induciran u maloj zavojnici mjeri se digitalnim voltmetrom. Treba napomenuti da voltmetar i ampermetar mjere efektivne vrijednosti izmjeničnog napona i struje

$$U_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}}|U| \quad ; \quad I_{eff} = \frac{1}{\sqrt{2}}|I| \quad (11)$$

pa da stoga za očitane vrijednosti jednadžba (10) postaje

$$U_{eff} = \mu_0 \frac{N}{L} A N_z \omega I_{eff} \quad (12)$$

Točnost mjernih instrumenata nije zajamčena iznad 12 kHz pa više frekvencije treba izbjegavati. Izbjegavati treba i frekvencije niže od 1 kHz jer se tada impedancija velike zavojnice jako smanji pa ona predstavlja gotovo kratki spoj za generator signala, što ga može oštetiti.

Napomenimo da se generator ponaša kao naponski izvor (izvor napona stalne amplitude). Budući da se promjenom frekvencije mijenja impedancija zavojnice, mijenja se i amplituda struje. U zadacima u kojima amplituda struje treba biti konstantna, potrebno je prilikom svake promjene frekvencije ponovno namjestiti izlazni napon izvora tako da amplituda struje bude ista kao prije.

Površina A u jednadžbi iznosi $A = r^2 \pi$ jer su zavojnice kružnoga poprečnog presjeka.

4. Zadaci

1. Odaberite neku malu zavojnicu i neku frekvenciju signala. Izmjerite ovisnost napona inducirnog u maloj zavojnici o jakosti struje kroz solenoid. Nacrtajte graf ovisnosti napona o struji i provjerite linearnost ovisnosti. Iz koeficijenta smjera izračunajte permeabilnost vakuuma! Kako se dobiveni rezultat slaže s poznatom vrijednosti?
2. Odaberite jednu malu zavojnicu, priključite voltmetar na njezine krajeve i umetnite je u veliku zavojnicu. Odaberite prikladnu jakost struje kroz veliku zavojnicu. Izmjerite ovisnost napona inducirana u maloj zavojnici o frekvenciji struje kroz veliku zavojnicu. Nacrtajte graf ovisnosti inducirana napona o frekvenciji. Provjerite linearnost ovisnosti!
3. Odaberite prikladnu amplitudu i frekvenciju struje kroz veliku zavojnicu. Izmjerite napon induciran u trima zavojnicama istog promjera ($2r=41$ mm), a različitih brojeva zavoja. Odredite ovisnost inducirana napona o broju zavoja N_z . Unesite podatke u $\log U - \log N_z$ dijagram i provjerite linearnu ovisnost u jednadžbi.
4. Odaberite prikladnu amplitudu i frekvenciju struje kroz veliku zavojnicu. Izmjerite napon induciran u trima zavojnicama istog broja zavoja ($N_z=300$), a različitih poprečnih presjeka. Odredite ovisnost inducirana napona o promjeru zavojnice. Unesite podatke u $\log U - \log r$ dijagram i provjerite kvadratičnu ovisnost napona o polumjeru.