

# 11. AZ ELEKTROMÁGNESES INDUKCIÓ

## A NYUGALMI INDUKCIÓ:

- Egy időben állandó árammal átjárt szolenoid tekercs belsejében homogén és az időben állandó mágneses mező jön létre.
- Ha ennek a tekercsnek az áramát ki-be kapcsoljuk, a tekercs árama, és az általa keltett mágneses mező az időben változik, akkor az ennek a tekercsnek a közelébe helyezett másik tekercsben felváltva ellentétes irányú áramlökések keletkezését tapasztaljuk.
- Ezek az áramlökések a második tekercs körében keletkező *elektromotoros erőre* utalnak.
- A jelenség azzal megmagyarázható, hogy az első tekercs változó mágneses mezeje elektromos mezőt hoz létre maga körül, mely a második tekercsben a töltésekre gyakorolt hatásával elektromos áramot indít.
- Az így létrejött elektromos mezőt tehát közvetlenül nem töltések hozzák létre, hanem a mágneses mező időbeli változásának következtében alakul ki.
- A mérések tapasztalata szerint a gerjesztőtekercset körülvevő egyetlen menetben indukált áram erőssége egyenesen arányos a vezető által körülfogott mágneses fluxus változási sebességével, és fordítottan arányos a teljes vezetőkör ellenállásával, ugyanakkor független a vezetőkör alakjától, és területétől:

$$I = \frac{U_{ind}}{R} = \frac{\Delta\phi}{R \cdot \Delta t}$$

- Az összefüggésben szereplő negatív előjel tulajdonképpen az energia-megmaradás törvényének megjelenése a nyugalmi indukció jelensége kapcsán. Eszerint ugyanis az indukált elektromos mező a zárt vezetőkörben olyan irányú áramot hoz létre, amelynek mágneses tere ellentétes irányú az őt keltő mágneses fluxus változásának helyén annak irányával, vagyis akadályozza az őt keltő hatást.
- Általánosságban is megfogalmazhatjuk, hogy **az indukált áram iránya mindig olyan, hogy az őt létrehozó hatást akadályozni igyekszik**. Ezt a megállapítást szoktuk a nyugalmi indukcióra vonatkozó **Lenz-törvénynek** nevezni.
- A változó mágneses mezőbe helyezett tekercs áramköre azonban nem minden esetben zárt, ezért alapvető fontosságú összefüggést kapunk, ha az áramerősségre felírt megállapításunkból a tekercs, illetve a vezetőkör mentén indukált elektromotoros erő nagyságát fejezzük ki:

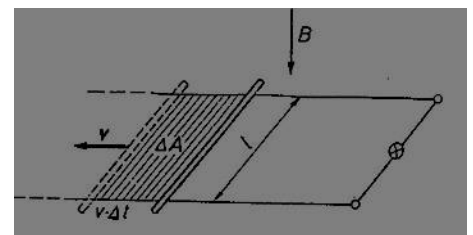
$$U_{ind} = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

- Természetesen az indukált elektromotoros erő értékét a fenti kifejezés csak az időben egyenletesen változó mágneses tér esetén adja meg, általánosan érvényes alakját a kifejezés határértékeként adódó összefüggés írja le, ha az előbbi vezetőkeret  $N$ -szer kerüli meg a változó mágneses fluxust, azaz amikor a tekercs menetszáma  $N$ -nel egyenlő.
- Szavakban ez annyit jelent, hogy valamely zárt,  $N$  menetszámú vezetőkeret (tekercs) mentén indukált elektromotoros erő egyenesen arányos a keret által körülfogott mágneses fluxus változásának sebességével és a tekercs menetszámával, de független a vezeték méreteitől és alakjától.

$$U_{ind} = -N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

## A MOZGÁSI INDUKCIÓ

- A következőkben végezzük el azt a kísérletet, amikor a mágneses mező az időben állandó, benne azonban  $v$ =állandó sebességgel egy fémes vezetőt mozgatunk.
- Ha ezen sebesség iránya nem párhuzamos az indukciójonalakkal, akkor a fém kristályrácsában levő pozitív és negatív töltésekre a mágneses Lorentz erő hat, mégpedig a kétféle töltésre ellentétes irányban.
- Ennek következtében a fém töltései bizonyos mértékig szétválnak, és ez a szétválási folyamat mindaddig tart, míg az így létrejött elektrosztatikus mező a fémen belül éppen egyensúlyt nem tart a mágneses Lorentz erővel.
- A vezeték két pontja között tehát feszültség jön létre, és ezt a jelenséget **mozgási indukciónak**



nevezzük.

- A jelenséget elvileg felfoghatjuk a nyugalmi indukció speciális eseteként, csak most a fluxus változását nem a mágneses teret keltő áram és ezáltal az indukció, hanem a vezeték által sűrűlt felület időbeli változása hozza létre.
- A töltésszétválasztó elektromotoros erő ezzel ellentétes értelmű, nagysága az indukált feszültséggel megegyező.
- Az összefüggés természetesen kiterjeszhető arra az általános esetre is, amikor a vezető mozgásának  $v$  sebessége a mágneses tér  $B$  indukciójának vektorával tetszőleges  $\alpha$  szöveget zár be, a szuperpozíció elvéből következően ugyanis ebben az esetben:

$$U_{\text{ind}} = B \cdot l \cdot v \cdot \sin\alpha$$

- Ha a mágneses térben mozgatott vezeték zárt áramkörre egészítjük ki, akkor a mozgó vezetékszakaszban  $I$  erősségű áram folyik, és ezáltal újabb,  $F$  nagyságú Lorentz erő lép fel.
$$F = B \cdot I \cdot l$$
- Ennek az erőnek az iránya az összefüggés alapján olyan, hogy akadályozza a vezetékszakasz mozgását, mert annak  $v$  sebességével ellentétes irányában hat: ez Lenz törvénye a mozgási indukció jelenségére.
- Természetesen ebben is az energia megmaradásának törvénye nyer kifejezést: ha nem így lenne, akkor az elindított vezeték a Lorentz erő hatására egyre gyorsabban haladna és egyre több áramot szolgáltatna a fogyasztónak mindenféle munka befektetése nélkül.
- Ampére törvénye:
  - Homogén mágneses mezőben az áram járta vezetőre akkor hat max. erő, ha a mágneses mező merőleges a vezetőre. Az erő merőleges a mező és a vezető által alkotott síkra. (jobbkezes szabály)
    - Ha az áram merőleges a mágneses tér irányára, a vezetőre ható erő ( $F$ ) nagysága egyenesen arányos az áramerősséggel ( $I$ ) és a mezőben levő vezető hosszával ( $l$ ).

$$F = B \cdot I \cdot l$$

- Lorentz-erő: (a mágneses mező által a mozgó töltésre kifejtett erő)
  - pl.: a Naptól töltött részecskék felcsavarodnak a Föld mágneses indukcióvonalaira, a katódsugárcsőves tévé

$$F = B \cdot Q \cdot v \leftarrow \text{mert } I = \frac{Q}{t} \text{ és } l = v \cdot t$$

## A KÖLCSÖNÖS INDUKTIVITÁS

- Az előbbieken megállapítottuk, hogy ha egy tekercsben változik az áram erőssége és az általa gerjesztett változó mágneses mező egy része behatol egy másik tekercsbe, akkor az abban elektromos feszültséget indukál.
- A két tekercs tehát elektromágneses kapcsolatba kerül egymással, és ezt a kölcsönhatást a kölcsönös indukciós együttható fogalmának segítségével jellemezhetjük.
- Az első, más szóval primer tekercs által keltett mágneses fluxus, amely a második tekercsen is keresztülhalad, a gerjesztési törvény szerint arányos a benne folyó áram  $I$  erősségével.
- Az indukciótörvény szerint viszont a második tekercsben keletkező  $U_{\text{ind}}$  feszültség arányos a tekercs belsejében létrejött fluxusváltozás sebességével, és ezáltal az első tekercs áramerősség-változási sebességével:

$$U_{\text{ind}} = -N_2 \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -L_{1,2} \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

- Az összefüggésben szereplő  $L_{1,2}$  arányossági tényező **a két tekercs kölcsönös induktivitása vagy kölcsönös indukciós együtthatója**.
- Értéke vákuumban a két tekercs geometriai adatain (menetszám, hossz, keresztmetszet, alak) kívül a

két tekercs egymáshoz viszonyított helyzetétől is függ. Minél nagyobb  $L_{1,2}$  értéke, a két vezetőkör között annál szorosabb a csatolás.

- Az induktivitás mértékegysége a definícióból következően a  $\frac{Vs}{A} = H$  vagyis a Henry.
- Természetesen a primer és a szekunder tekercs szerepe megcserélhető, vagyis  $L_{1,2} = L_{2,1}$

## ÖNINDUKTIVITÁS

- Ha egy tekercsben áram indul meg, vagy az áram erőssége megváltozik, akkor ez a tekercs saját mágneses fluxusát teljes egészében körülveszi, azaz egyszerre tölti be a primer és a szekunder tekercs szerepét is, vagyis ilyenkor minden tekercsben önindukciós feszültség keletkezik. Ez az indukált feszültség természetesen kifejezhető a fluxusváltozás sebességével:

$$U_{ind} = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

- ahol az arányossági tényező most **a tekercs öninduktivitása vagy más néven önindukciós együtthatója**.

- Egy hosszú, egyenes légmagos tekercs önindukciós együtthatójának meghatározásakor vegyük figyelembe, hogy a mágneses mező a tekercs belsejében homogén, a létrehozott fluxus értéke pedig  $\Phi = \mu_0 \cdot N \cdot I \cdot \frac{A}{l}$ , így az önindukciós feszültség:

$$U_{ind} = N \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

- tehát ezen tekercs önindukciós együtthatója:

$$L = \mu_0 \cdot \frac{N^2 \cdot A}{l}$$

- Az önindukció jelenségének fontos gyakorlati alkalmazásával, illetve előfordulásával találkozhatunk az önindukciós tekercset is tartalmazó áramkörök ki- és bekapcsolásának vizsgálatakor.
  - Lenz törvényének értelmében ugyanis bekapcsoláskor az indukált elektromotoros erő ellenkező értelmű, mint az őt létrehozó hatás, vagyis az áram növekedése, míg kikapcsolás esetében az áram csökkenése ellenében hat.
  - Az így kialakult feszültség olyan értékű is lehet, amely akár a vezetékek szigetelését is károsíthatja.
  - A kísérletek tapasztalatai és elméleti megfontolások alapján egyaránt adódik, hogy a be- és kikapcsolások következtében kialakuló áram erőssége az időnek exponenciális függvénye vagyis már ezen példa kapcsán megállapíthatjuk, hogy a tekercs induktivitása az áram változásával szembeni tehetetlenségének, ellenállásának mértéke.

## A VÁLTAKOZÓ ÁRAM ELŐÁLLÍTÁSA, LEÍRÁSA

- A következőkben gondolatban végezzük el azt a kísérletet, amikor egy állandó mágnes közelítőleg homogén mezejében állandó szögsebességgel egy téglalap alakú vezetőkeretet forgatunk az indukcióra merőleges tengely körül. Mindkét indukcióvonalra merőleges vezetékszakaszban elektromotoros erő indukálódik, így a keretben keletkező teljes elektromotoros erő nagysága:

$$U_{ind} = B \cdot l \cdot v \cdot \sin \alpha$$

- ahol  $l$  a B- re merőleges forgástengellyel párhuzamos vezetékpár összhossza, hiszen a másik két vezetékdarabban hosszirányú elektromotoros erő nem keletkezik.
- Az indukált elektromotoros erő értéke tehát a szögelfordulás és ezáltal az idő függvényében állandóan változik, hiszen az egyenletes forgómozgásra érvényes  $\alpha = \omega \cdot t$  összefüggés felhasználásával

$$U_{ind} = -B \cdot l \cdot v \cdot \sin \omega t$$

- Ha a keret kivezetései nem zártak, végpontjai között ugyanekkora indukált feszültség is keletkezik:

$$U_{ind} = -B \cdot l \cdot v \cdot \sin \omega t = u = u_m \cdot \sin \omega t$$

- A kísérlet eredményeképpen tehát egy az időben szinuszosan változó, úgynevezett váltakozófeszültséget kapunk.
- A jelölésben a kis betű a feszültség pillanatnyi értékére, amíg  $u_m$  a feszültség maximális értékére utal. Amennyiben vezetőkeretünket zárt áramkörre egészítjük ki, benne természetesen  $i = i_m \cdot \sin \omega$

$t$  nagyságú áram fog folyni, vagyis a vezetőben tisztán ohmos ellenállású áramkörben a feszültséggel fázisban lévő áram jön létre.

## GYAKORLATI ALKALMAZÁS:

- A váltakozó áramot több mindennapi eszközben kihasználjuk:
- Generátorok: az állandó mágneses teret (állandó mágneses forgórész) fogatjuk a vezetőkeret (tekercsek) mellett, amely áramot indukál a tekercsekben.
- Transzformátorok: a nyugalmi indukció jelenségét kihasználva használjuk az elektromosság továbbítására. A transzformátorokkal emeljük fel szállítás feszültségre, vagy csökkentjük le hálózati feszültségre a hálózati feszültséget. A transzformátoroknál azt a tulajdonságot használjuk ki, hogy állandó teljesítménynél a primer és szekunder tekercsek arányában változik a feszültség (az állandó teljesítmény miatt az áram is fordított arányban).
- Szállítás: Az elektromos áramot távvezetékeken nagy feszültségen továbbítjuk nagy távolságra, mivel az így keletkező (áramerősségből származó) szállítási veszteség minimális.
- A szállítási feszültséget (120 kV) feltranszformálással az erőműveknél állítják elő, míg a hálózati feszültséget több lépcsőben (alállomáson) keresztül transzformálják le 230V-ra.