



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  
ПРИРОДНО – МАТЕМАТИЧКИ  
ФАКУЛТЕТ  
ДЕПАРТАМАН ЗА ФИЗИКУ



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ

ПРИМЉЕНО:	16.07.2009
ОРГАНИЗ.ЈЕД.	БРОЈ
0603	3/902

# ОБРАДА НАСТАВНЕ ТЕМЕ: „ЕЛЕКТРОМАГНЕТНА ИНДУКЦИЈА“ ЗА СРЕДЊЕ ШКОЛЕ

- дипломски рад -

Ментор:  
проф. др Душанка Обадовић

Кандидат:  
Ненад Павловић

Нови Сад, 2009.

*Захваљујем се ментору проф. др Душанки Обадовић на предложеној теми, на стрпљењу и помоћи током израде овог дипломског рада.*



# Садржај:

1. Увод.....	3
2. Теоријски део.....	4
2.1. Оште карактеристике магнетних појава .....	4
2.1.1. Кулонов закон у магнетостатици .....	5
2.1.2. Магнетна индукција .....	6
2.1.3. Јачина магнетног поља .....	6
2.1.4. Магнетна пермеабилност и сусцептибилност.....	7
2.1.5. Линије сила магнетног поља проводника са струјом .....	8
2.1.6. Линије сила магнетног поља проводника са струјом савијеног у круг .....	9
2.1.7. Линије сила магнетног поља соленоида .....	10
2.2. Електромагнетна индукција .....	10
2.2.1. Мајкл Фарадеј.....	10
2.2.2. Фарадејев експеримент. Електромагнетна индукција у непокретном проводнику .....	11
2.2.3. Индукована електромоторна сила у проводнику који се креће у хомогеном магнетном пољу .....	13
2.2.4. Фарадејев закон електромагнетне индукције .....	15
2.2.5. Ленцово правило .....	16
2.2.6. Електромагнетна индукција и закон одржавања енергије .....	18
2.2.7. Самоиндукција.....	19
2.2.8. Енергија и густина енергије магнетног поља.....	21
2.2.9. Енергија електромагнетног поља .....	22
2.2.10. Бетатрон .....	22
3. Обрада наставне теме: Електромагнетна индукција .....	24
3.1. Методичке напомене.....	24
3.2. Једноставни експерименти у настави физике .....	25
4. Демонстрациони огледи .....	26
4.2.1. Магнетни топ.....	26
4.2.2. Ерстедов оглед.....	27
4.2.3. Електромагнет .....	28
4.2.4. Линије сила магнетног поља соленоида .....	29
4.2.5. Индуковање струје у непокретном калему .....	30
4.2.6. Прстен који прати магнет.....	31
4.2.7. Заустављено падање.....	32
4.2.8. Самоиндукција.....	33
4.2.9. Једноставан генератор.....	34
4.2.10. Лебдећи прстен.....	35
5. Закључак .....	37
6. Литература.....	38
Кратка биографија кандидата .....	39
Кључна документацијска информација .....	40

# 1. Увод

Наставна тема „Електромагнетна индукција“ се обраћује у трећем разреду гимназије. При обради наставне теме „Електромагнетна индукција“ потребно је ученике прво подсетити на природу магнетизма, карактеристике магнетног поља сталних магнета, указати на аналогију са електричним пољем, указати да магнетна поља постоје не само код макроскопских тела него и код микрочестица и да су ова прва резултат суперпонирања микромагнетних поља. Често ученици праве грешку сматрајући да магнетно поље постоји само у тачкама које припадају магнетним линијама сила а да не постоји у простору између тих линија, па је потребно указати на непрекидност магнетног као и осталих облика физичког поља. Потом је потребно објаснити узајамно деловање проводника са електричном струјом и магнетним пољем, истаћи затвореност магнетних линија сила и на њихово обухватање контуре проводника са електричном струјом.

Пре извођења огледа којима се демонстрира електромагнетна индукција потребно је ученике подсетити да магнетно поље постоји само у простору наелектрисаних честица које се крећу. На сваку од тих наелектрисаних честица које се крећу заједно са проводником у магнетном пољу деловаће сила одређеног интензитета, правца и смера, и постојаће само док се проводник креће. Под дејством те силе долази до раздвајања наелектрисања, тако да се слободни електрони нагомилавају на једном крају проводника, при чему други крај постаје позитивно наелектрисан. Ово условљава разлику потенцијала на крајевима проводника, и у случају да је проводничка контура затворена долази до појаве струје која се назива индукована струја, а сама појава настајања те струје назива се електромагнетна индукција. Ученицима је потребно скренути пажњу на принципијелну различитост ове електромоторне сile и електромоторне сile хемијских извора. Док електромоторна сила неког хемијског извора постоји само у граничном слоју металних електрода и електролита, дотле електромоторна сила индуковане струје постоји на целом делу кола које пресеца линије сile магнетног поља. Смер индуковане струје поклапа се са смером електромоторне сile индукције, што значи да важи правило десне руке, које се у ствари односи на одређивање смера електромоторне сile индукције, а може да се примени и за дефинисање смера индуковане струје. О индукованој струји у правоуглом металном раму који се равномерно обрће у хомогеном магнетном пољу неопходно је истаћи следеће: пошто је електромоторна сила индукције пропорционална брзини пресецања магнетних линија сила проводником, то се онда карактер промене електромоторне сile поклапа са природом измене те брзине. Величине које карактеришу равномерно обртно кретање могу да се прикажу синусном, односно косинусном функцијом.

Узајамна условљеност електричних и магнетних појава може да се искаже у два става:

- Свако кретање наелектрисаног тела (честице) условљава постојање магнетног поља
- Промена магнетног поља узрокује кретање слободних наелектрисаних честица у проводнику, при чему проводник има само улогу „канала“

## 2. Теоријски део

### 2.1. Опште карактеристике магнетних појава

У Старом и Средњем веку се веровало да магнет има неку чаробну моћ, како се магнетом могу лечити разне болести и да магнет губи своју моћ ако се премаже белим луком. Један од најпознатијих арапских коментатора Аристотела (Άριστοτέλης, 384 – 322), Авероес (Abū 'l-Walīd Muḥammad ibn Aḥmad ibn Rūshd, Averroes, 1126 – 1198) из Кордове, каже да се „железо креће због промене коју прима од магнета помоћу ваздуха који их одваја, и због тога кад је састав магнета изменењен, он више не привлачи, као што је случај када се натрља луком“. Од Плинија до Авероеса прошао је цео миленијум, а проћи ће још неколико векова, а да нико од учених људи не провери ту тврдњу. Кад је почeo да се користи компас, дежурни официр на броду није смео да једе јело са белим луком. Данас, после низа експеримената и теоријског објашњења, јасно је да је реч о заблуди и стога, када причамо о магнетима и њиховим особинама, ослањамо се на теорије електромагнетне интеракције међу честицама.

Свака фундаментална честица висионе ремети кретање сваке друге честице, привлачећи је или одбијајући, бар једном од четири познате силе. Једна од тих сила је електромагнетна сила. Покретно наелектрисање производи мистериозну магнетну силу. У природи је ова сила нађена код гвоздене руде магнетита. Сама реч магнетит значи камен правца.

Магнет је свако тело које има својство да привуче и да трајно држи ситне гвоздене предмете. Гвожђе и челик су материјали који се могу лако намагнетисати тако што се стални магнет превуче преко предмета неколико пута у истом смеру, при чему долази до оријентације магнетних домена и стварања магнетних полова на крајевима предмета. Уколико челик унесемо у јако магнетно поље сталног магнета, по престанку дејства поља челик остаје трајно намагнетисан. Меко гвожђе се, за разлику од челика, не може трајно намагнетисати. Ове особине не можемо уочити код материјала као што су алуминијум, бакар, дрво, због тога што је за оријентацију домена ових материјала потребно поље изузетно велике јачине. Размагнетисавање магнета се врши механичким ударцима.

Магнете можемо поделити на природне (магнетит,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) и вештачке.

Магнет има два пола. Према познатим особинама магнетне игле да увек један пол окреће приближно према северу, тај пол је назван *северни* или *позитивни* пол магнета. Супротни пол је онда *јужни* или *негативни*. Битна особина магнета је да му се не могу раздвојити полови. Физички је немогуће имати једнопол, магнет са једним полом. На месту где поделимо магнет на два дела формираће се два супротна магнетна пола, па ћемо на тај начин добити два стална магнета.

Понашање сталних магнета постало је јасно када се схватило да се атом састоји од електрона који круже око језгра. Ови електрони стварају кружну струју сличну току слободних електрона дуж намотаја електромагнета и тако је сваки атом за себе мали електромагнет са северним и јужним полом. Кружење мноштва електрона у већини атома производи магнетна поља која имају тенденцију да се пониште али у неким малобројним елементима (гвожђе) индивидуални атомски електромагнети су јаки и за све атоме у целом чврстом телу могу бити оријентисани на исти начин, са укупним ефектом да се један крај понаша као северни а други као јужни пол.

Интеракција која настаје услед кретања наелектрисаних честица назива се магнетна интеракција, а одговарајућа сила - магнетна сила. Према томе, када се наелектрисане честице крећу, онда се поред електричног појављује и међусобно магнетно деловање. Данас се сматра да су све магнетне појаве, укључујући и оне са сталним магнетима, где нема електричних струја, последица одговарајућих кретања наелектрисаних честица. Све

до открића магнетне интеракције између електричних струја, односно наелектрисаних честица које се крећу, сматрало се да постоје магнетни набоји, *намагнетисања* која су аналогна наелектрисањима. Међутим, утврђено је да су све магнетне појаве једино последица кретања наелектрисаних честица и да никакви магнетни набоји не постоје. На основу овога можемо закључити да магнетна поља непосредно потичу од наелектрисаних честица које се крећу, и испољавају се тако што на покретна наелектрисања која се у њима налазе делују магнетне сile.

Електрицитет и магнетизам су различите манифестације исте основне електромагнетне сile. Сам начин дејства једног тела на друго тело (привлачење или одбијање) објашњавамо постојањем поља око тела. Магнетно поље је векторско поље: свака тачка поља може се описати вектором који може бити променљив у времену. Правац вектора магнетног поља поклапа се са правцем оријентације магнетног дипола у магнетном пољу - као на пример малог магнета или мале контуре струје у магнетном пољу, или мноштво малих честица феромагнетног материјала. Магнетно поље у физици представљамо линијама сила магнетног поља. По дефиницији ове линије сила извиру из северног магнетног поља а увиру у јужни магнетни пољ. Густина линија сила одређује јачину магнетног поља које је најјаче на половима магнета и слаби са квадратом растојања како се удаљавамо од магнета. Тамо где је густина већа поље је јаче и обрнуто. Магнетна линија сила представља криву чија тангента у свакој тачки има правац вектора јачине поља. Јачина поља је пропорционална броју линија по јединици површине нормалног пресека.

Линије сила магнетног поља пролазе кроз картон, пластику, дрво, стакло, а не пролазе кроз гвожђе јер их гвожђе сакупља у себе, тако да је њихова густина много већа у гвожђу него ван њега.

### 2.1.1. Кулонов закон у магнетостатици

Према аналогијама са електричним диполом сматрало се да при супротним крајевима магнета постоје *магнетне масе* истих количина а супротног знака. И као што позитивно и негативно наелектрисање образују полове електричног дипола, тако магнетне масе образују два супротна поља магнета. Према томе, сваки магнет у својим половима садржи две магнетне масе, једнаке по величини а супротне по знаку,  $+m$  и  $-m$ . На сличан начин као што су испитиване сile између наелектрисаних тела у електростатици, приступило се и проучавању привлачних и одбојних сила између магнетних маса. Установљено је да се те сile у вакууму понашају по закону који има сличан облик као Кулонов (Charles-Augustin de Coulomb, 1736 – 1806) закон за електростатичке сile, па је назван **Кулонов закон у магнетостатици**:

$$F = k' \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} [N] \quad (2.1)$$

$$\text{Где је } k' = \frac{1}{4\pi\mu_0}$$

Дакле, *сила између магнетних поља сразмерна је магнетним масама тих поља а обрнуто сразмерна квадрату њиховог међусобног растојања*.

Овде се ради о фиктивном појму магнетне масе па и магнетних поља, јер се магнетни поља никада нису могли одвојити један од другога нити је могао бити начињен магнет са неједнаким магнетним масама у половима. Положај магнетних поља у магнету се није могао поуздано одредити. Концепција магнетних поља се задржала до данас због подесне практичне стране за изражавање појава помоћу магнетних поља.

## 2.1.2. Магнетна индукција

Између два наелектрисања у покрету јавља се електромагнетна сила. Та сила настаје услед неке врсте физичког поља које ствара наелектрисање у кретању и назива се магнетно поље. Према томе, може се рећи да је магнетно поље простор око наелектрисаног тела у покрету у коме се одигравају извесни процеси који се посебно демонстрирају електромагнетном силом. Магнетно поље је посредник којим се остварује магнетно узајамно деловање, и у свакој тачки простора описује се помоћу векторске величине која се назива **магнетна индукција** и обележава се са  $\vec{B}$ . Прво помињање магнетне индукције налазимо још код Сократа: „Магнетни камен не само да привлачи желеzне прстенове, већ и на њих преноси способност привлачења, тако да привлаче друге прстенове“. Магнетна индукција  $\vec{B}$  карактерише деловање магнетног поља на наелектрисане честице које се у њему крећу. Правац вектора  $\vec{B}$ , индукције магнетног поља, нормалан је на правац вектора магнетне сile  $\vec{F}$ . Ако се крене од израза за магнетну силу

$$\vec{F}_M = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.2)$$

може се наћи интензитет вектора магнетне индукције:

$$B = \frac{F}{qv \sin \varphi} \quad (2.3)$$
$$[B] = \left[ \frac{F}{qv} \right] = \frac{N}{A \cdot m} = T$$

Овде је  $F$  интензитет сile којом магнетно поље делује на честицу чије је наелектрисање  $q$ , а брзина  $\vec{v}$ , док је  $\varphi$  угао између вектора  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ . Јединица магнетне индукције назива се тесла (T). Према томе, може се рећи да је интензитет магнетне индукције бројно једнак интензитету сile којом магнетно поље делује на јединично наелектрисање ако се оно креће јединичном брзином у правцу нормалном на  $\vec{B}$ . Магнетно поље је познато ако су познати интензитет, правац и смер тога вектора у свакој тачки простора.

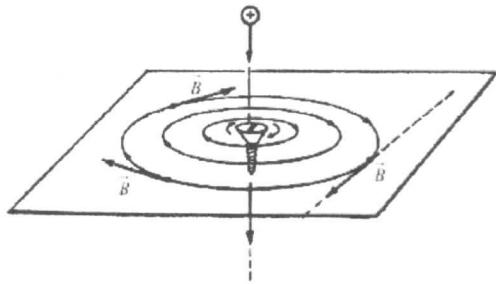
## 2.1.3. Јачина магнетног поља

Пошто се у магнетостатици сматрало да магнетно поље потиче од магнетних маса које се налазе у области магнетних полова, направљена је аналогија са електричним пољем у електростатици и узето да је поље дато односом из магнетне сile и магнетне масе:

$$H = \frac{F}{m_p} = \frac{B}{\mu_0} = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{m}{r^2} \quad (2.4)$$
$$[H] = \left[ \frac{A}{m} \right], \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$$

Константа  $\mu_0$  назива се магнетна пропустљивост или permeabilnost.

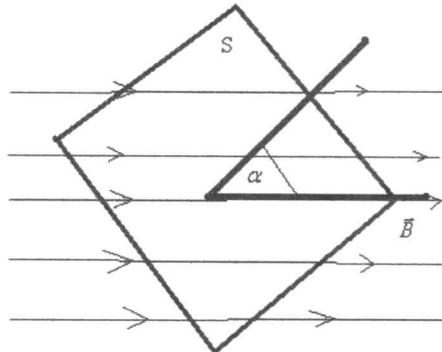
На основу познавања магнетног поља око струјног проводника, може се утврдити изглед магнетног поља око наелектрисане честице у покрету (Слика 2.1).



Слика 2.1. Магнетно поље око наелектрисане честице у покрету

За разлику од магнетне индукције, **магнетни флукс** представља скаларну величину и дефинише се као:

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} \cos \alpha \quad (2.5)$$



Слика 2.2. Магнетни флукс

где је  $\alpha$  угао између нормале на површину и вектора  $\vec{B}$  (Слика 2.2). Одавде следи јединица магнетног флука која се назива *вебер* (Wb):  $Wb = Tm^2$ . За разлику од магнетне индукције, магнетни флукс је скаларна а не векторска величина.

#### 2.1.4. Магнетна пермеабилност и сусцептибилност

Експериментално се може установити да се магнетном пољу које се образује у соленоиду услед протицања електричне струје може знатно повећати интензитет ако се у централни део унесе комад гвожђа. Ово се објашњава тиме што се приликом уношења тела у магнетно поље услед електродинамичке сile јавља тенденција да се све микрострује у телу оријентишу тако да се њихова поља поклоне са спољашњим пољем. Поља микроструја се сабирају, образује се резултујуће макроскопско поље које има исту оријентацију као и поље соленоида које изазива оријентацију микроструја. На тај начин долази до повећања спољашњег поља. Поље које је настало услед оријентације микроструја сразмерно је пољу које изазива оријентацију. Коефицијент сразмерности  $\chi_m$  назива се **магнетна сусцептибилност**. Укупно резултујуће поље је тада дато изразом:

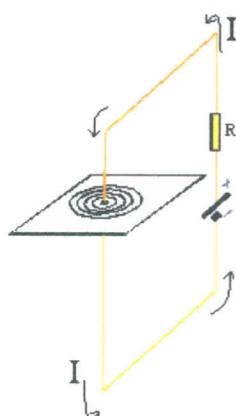
$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \chi_m \vec{H} = (\mu_0 + \chi_m) \vec{H} = \mu \vec{H} \quad (2.6)$$

Коефицијент  $\mu$  се назива **магнетна пермеабилност**. Аналогно поступку у електростатици може се изразити коефицијент  $\mu_r = \frac{\mu_0 + \chi_m}{\mu_0}$ , који се назива релативна магнетна пермеабилност, па магнетна индукција добија следећи облик:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} \quad (2.7)$$

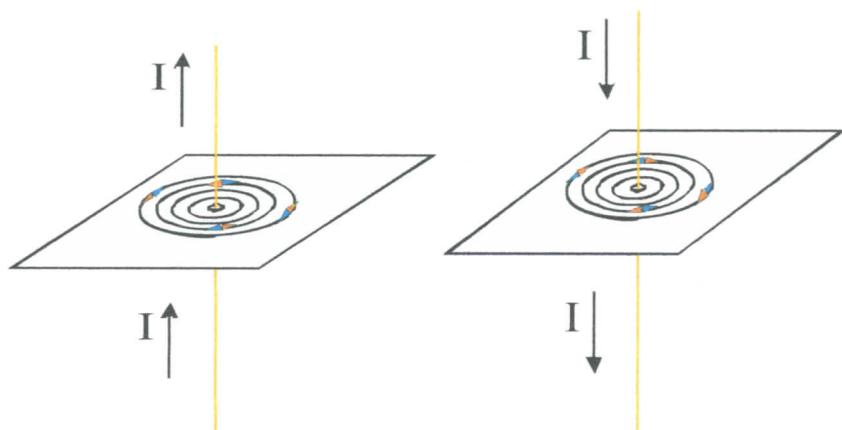
## 2.1.5. Линије сила магнетног поља проводника са струјом

Ако наелектрисана честица мирује око ње постоји само електрично поље. Али практичног мировања електрона нема у природи. Сви се они крећу по кружним путањама око језгара својих атома тако да поред електричног формирају и магнетно поље. Ерстед (Hans Christian Oersted, 1777 – 1851) је својим огледом доказао да када се огроман број слободних електрона покрене у проводнику, чинећи електричну струју, око њега се поред електричног формира и магнетно поље. Изглед магнетног поља може се установити помоћу опиљака гвожђа. Проводником се прободе картон, кроз проводник се пропушта струја а на картон се бацају опиљци гвожђа.



Слика 2.3. Магнетно поље праволинијског проводника

Магнетно поље које постоји око проводника са струјом усмериће опиљке да се на правилан начин распореде по површини картона. Опиљци формирају концентричне кругове. Линије сила магнетног поља проводника са струјом су затворене линије у облику концентричних кругова, са центром у проводнику, и налазе се у равнима које су нормалне на проводник. Ако би на картон ставили мале магнетне игле (лако покретне) њихов северни пол би био окренут увек у једном смеру а јужни у другом (слика 2.4.). Смер северних полова магнетних игала по договору је узет за смер линија сила магнетног поља проводника.



Слика 2.4. Одређивање смера линија сила магнетног поља праволинијског проводника помоћу магнетних игала

Променом смера струје у проводнику променио би се и смер магнетних полова магнетних иглица. Заправо линије сила магнетног поља су такве да ако ставимо малу магнетну иглу на било коју тачку линије она ће увек заузимати правац тангенте на дату линију у датој тачки. При томе кроз сваку тачку простора око наелектрисаног проводника може се провући само једна линија силе и зато се линије сила магнетног поља никде не секу. Смер линија сила магнетног поља проводника са струјом се дефинише правилом десне руке: проводник се обухвати десном шаком тако да испружени палац показује смер струје при чему ће савијени прсти показивати смер линија сила магнетног поља проводника са струјом.

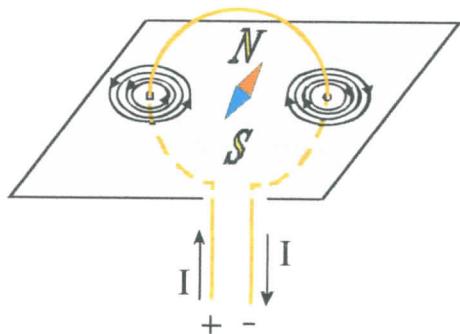


Слика 2.5. Одређивање смера линија сила магнетног поља правилом десне руке

Пошто око проводника са струјом постоји и електрично поље може се извучи закључак да магнетно поље и електрично поље увек постоје заједно. У природи никде нема електричне струје без магнетног поља и магнетног поља без електричне струје.

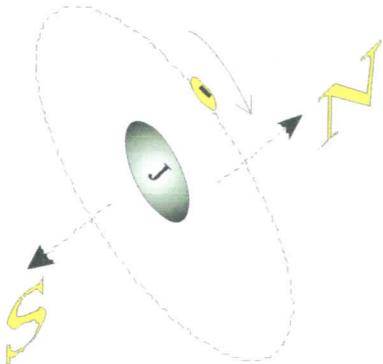
## 2.1.6. Линије сила магнетног поља проводника са струјом савијеног у круг

Ампер (André – Marie Ampère, 1775 – 1836) је 1820. године утврдио да се проводник савијен у круг понаша као магнетни лист када се кроз њега пропусти струја. Линије сила магнетног поља, у виду концентричних кругова обухватају цео проводник. Смер линија сила је такав да уколико се са једне стране посматра кружни проводник линије сила извиру из њега, а на супротној страни увиру у њега.



Слика 2.6. Линије сила магнетног поља проводника са струјом савијеног у круг

Место где линије сила увиру представља јужни магнетни пол а где извиру северни магнетни пол. Слика магнетне игле само симболизује како се понаша овај проводник. Даља размишљања довела су научника Ампера до логичког закључка да је најмања струја која се креће по кружној путањи струја коју чини електрон. Пошто свака кружна струја формира магнетно поље то се и сваки електрон, док се креће око језгра, понаша као мали магнет са северним и јужним магнетним полом.

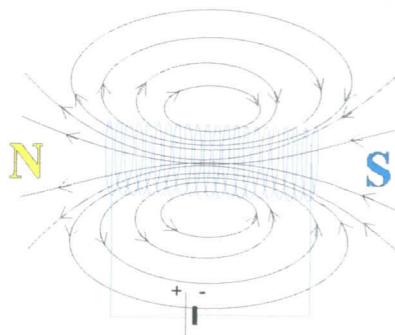


Слика 2.7. Елементарни магнет

Овакав магнет формира поље које се у садејству са осталим елементарним магнетима најчешће поништава па се не примећује намагнетисање код већине тела састављених од најразличитијих елемената. Али код неких елемената (гвожђе, кобалт, никал...) ова садејства се појачавају и тело у целини показује магнетне особине.

### 2.1.7. Линије сила магнетног поља соленоида

Ако проводник савијемо у више кругова онда се сваки круг понаша као мали магнет. Тако савијени проводник зовемо соленоид а магнетно поље соленоида има исти облик као магнетно поље магнета у облику магнетне шипке. Линије сила извиру из северног магнетног пола, савијају, увиру у јужни магнетни пол и пролазе кроз соленоид.



Слика 2.8. Магнетно поље соленоида

## 2.2. Електромагнетна индукција

### 2.2.1. Мајкл Фарадеј



Мајкл Фарадеј (Michael Faraday, 1791 – 1867), енглески физичар, од радника у књижари и разносача новина, уздигао се до великог научника и члана Лондонског краљевског друштва. Инспирисан Ерстедовим огледом којим је откривен утицај проводника са струјом на магнетну иглу, Фарадеј

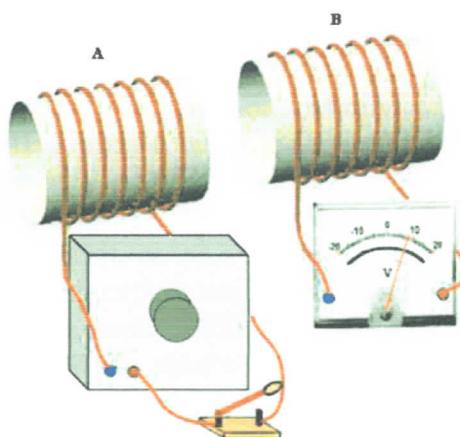
је поставио себи циљ: „Претворити магнетизам у електрицитет“. Фарадеј је установио основни закон електромагнетне индукције (1831), објаснио појаву самоиндукције и тиме утемељио основе електротехнике. Открио је законе електролизе, постулирао постојање јона и увео појмове електролит, електрода, катода и анода, због чега се сматра оснивачем електрохемије. Фарадеј је био први који је увео појам поља и његово сликовито приказивање линијама силе, па се са правом сматра зачетником учења о електромагнетном пољу. У знак захвалности и поштовања Фарадеја као научника јединица електричног капацитета је названа фарад (F).

## 2.2.2. Фарадејев експеримент. Електромагнетна индукција у непокретном проводнику

До појаве електричне струје у проводнику долази при дејству електростатичке сile која делује на слободне електроне у том проводнику. На сличан начин и електродинамичке сile, које делују на електроне могу да проузрокују електричне струје.

Мајкл Фарадеј је чврсто веровао да електрична струја у једном проводнику може преко свог магнетног поља да изазове појављивање струје у другом, оближњем проводнику, слично појављивању наелектрисања на телу које се налази у близини другог наелектрисаног тела. Резултати Фарадејевог рада отворили су пут новој технолошкој револуцији.

По Ерстедовом открићу магнетног поља електричне струје, Фарадеј је 1821. године конструисао експериментални уређај за који се може рећи да је први електромотор. Принцип рада је био заснован на појави електромагнетне индукције, чији закон је сам Фарадеј открио 1831. године, која настаје приликом кретања проводника у магнетном пољу или када се проводник налази у променљивом магнетном пољу. Фарадеј је до открића дошао покушавајући да докаже једну погрешну научну хипотезу. Следи Ерстеда и очекује експеримент супротног смера. Фарадеј полази од следеће аналогије: ако статички електрицитет на неком телу индукује такав електрицитет на суседном телу, зашто то не би био случај и са електричном струјом.

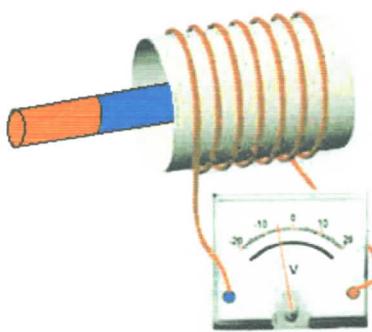


Слика 2.9. Индуковање електричне струје променљивим магнетним пољем калема са једносмерном струјом

У свом експерименту покушао је да индукује електричну струју у једном калему тако што је пропуштао једносмерну струју у другом калему који се налазио у близини првог калема. Очекивао је да магнетно поље које се ствара у калему А изазове појаву једносмерне струје у калему В, али се то није десило. Међутим, Фарадеј је уочио краткотрајну појаву струје у калему В која настаје приликом укључивања и искључивања

струје у калему А. Струје које настају у калему В приликом укључивања и искључивања једносмерне струје у калему А су супротног смера.

Фарадеј затим остварује индукцију на други начин. Кроз један калем пропушта једносмерну струју, а затим му приближава и одаљава други калем повезан са галванометром. Не наводећи разлоге, у свој експеримент укључује гвожђе. Галванометар је одмах реаговао и то много јаче него када су само навојнице биле везане за десетоструко јачу батерију. Фарадеј је појаву струје могао да објасни једино дејством магнетног поља калема кроз који је пропуштао једносмерну струју. Због тога је поједноставио експеримент и уместо калема А користио је магнет који је провлачио кроз калем В.



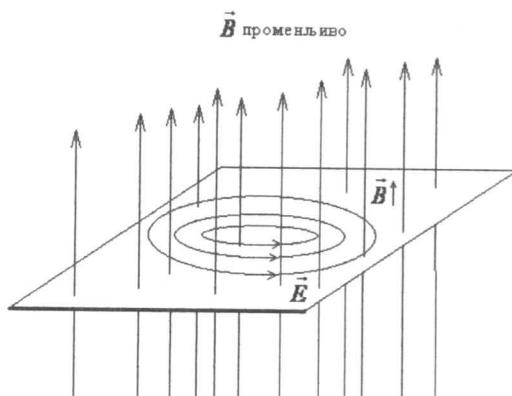
Слика 2.10. Индуковање електричне струје провлачењем магнета кроз калем

Запазио је исти ефекат као у претходном огледу. До појаве струје у калему је долазило једино приликом померања магнета. Фарадеј је дошао до закључка да до индуковања струје долази услед промене магнетног флукса кроз проводну контуру, а интензитет индуковане струје сразмеран је брзини промене флукса.

Фарадејев експеримент се може извести помоћу два проводника у облику навојака који се налазе један близу другога. Први навојак је повезан са извором једносмерне струје преко променљивог отпорника и прекидача, док је на крајеве другог прикључен галванометар. Када кроз први проводни рам противе стална струја, галванометар показује да се у другом раму не индукује никаква струја. Међутим, уколико се мења јачина струје у првом проводном раму путем променљивог отпорника, у другом раму долази до индуковања струје. Индукована струја ће се јавити и у случају када се струјно коло у првом раму прекида или затвара или када се два рама међусобно приближавају или удаљавају. У свим овим случајевима се друга проводна контура са галванометром налази у временски променљивом магнетном пољу које узрокује индуковање струје односно електромоторне силе. Индуковану струју није проузроковало магнетно поље непосредно, јер Лоренцова (Hendrik Antoon Lorentz, 1853 – 1928) сила делује само на наелектрисане честице (електроне) који се крећу. По томе се и разликује магнетно поље од електричног, јер на непокретна наелектрисања може да делује само електрично поље. Отуда следи закључак да су слободна наелектрисања у непокретном проводнику приморана да се уређено крећу под дејством електричног поља које је створено променљивим магнетним пољем. До овог објашњења је дошао Максвел чиме је открио фундаменталну особину магнетног поља: када се магнетно поље мења у току времена, ствара се електрично поље. Односно, у простору променљивог магнетног поља истовремено постоји електрично поље. При томе није битно да ли се у променљивом магнетном пољу налази проводник јер се електрично поље ствара независно од присуства проводника.

Електрично поље настало усред промена магнетног поља има сасвим другачије особине од електростатичког поља које потиче непосредно од наелектрисања, јер линије сила тог електричног поља не почињу и не завршавају се на наелектрисањима. Оне су

сличне линијама сила магнетног поља које се формирају око струјног проводника, затворене су, без почетка и краја.



Слика 2.11. Линије сила вртложног електричног поља

Одавде се види да је електрично поље које настаје услед промена магнетног поља вртложисно. Карактеристика вртложног електричног поља, по чemu се разликује од електростатичког, је да рад који то поље врши при померању наелектрисања дуж затворене путање није једнак нули, већ је једнак величини индуковане електромоторне сile.

Ако се за време  $\Delta t$  магнетна индукција  $B$  промени за  $\Delta B$ , тада количник  $\frac{\Delta B}{\Delta t}$  представља брзину промене магнетног поља. Експериментално је утврђено да је индукована електромоторна сила сразмерна тој брзини промене магнетног поља:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta B}{\Delta t} S = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (2.8)$$

где је  $S$  површина ограничена затвореном проводном линијом, односно контуром која обухвата магнетно поље. Негативни предзнак је у вези са поларитетом индуковане електромоторне сile. У случају када површина није константна, индукована електромоторна сила је:

$$\varepsilon = -\left[ \frac{\Delta B}{\Delta t} S + \frac{\Delta S}{\Delta t} B \right] = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (2.9)$$

Када је цела контура дужине  $l$  у хомогеном магнетном пољу у равни нормалној на линије индукције, јачина индукованог вртложног електричног поља има у свим тачкама контуре исти интензитет  $E$ . Рад који ово поље изврши при померању јединичног наелектрисања дуж целе контуре износи  $A = El = \varepsilon$ . Одатле је

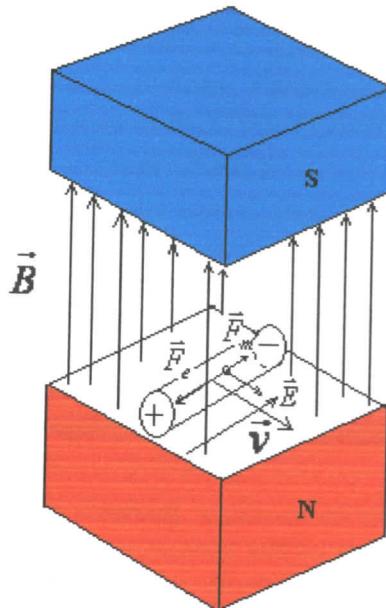
$$E = \frac{\varepsilon}{l} = -\frac{1}{l} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (2.10)$$

Према томе, јачина индукованог електричног поља сразмерна је брзини промене магнетног флукса.

### 2.2.3. Индукована електромоторна сила у проводнику који се креће у хомогеном магнетном пољу

До исте појаве долази и приликом кретања проводника у хомогеном магнетном пољу. Нека се проводник креће константном брзином  $\vec{v}$  нормално на линије сила магнетног поља. Тада се и сви слободни електрони крећу брзином  $\vec{v}$  у правцу нормалном

на линије сила магнетног поља. Том приликом на сваки електрон делује Лоренцова сила интензитета  $F = evB$  у правцу нормалном на раван коју формирају вектори  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ . Ово има за последицу да на једном крају проводника долази до нагомилавања слободних електрона, тако да тај крај проводника постаје негативно наелектрисан, а други крај проводника постаје позитивно наелектрисан.



Слика 2.12. Кретање проводника у хомогеном магнетном пољу

Разлика потенцијала на крајевима проводника доводи до образовања електричног поља унутар проводника. Раздавање наелектрисања ће престати када сила којом ово електрично поље делује на електроне постане истог интензитета као Лоренцова сила, јер су ове две силе истог интензитета а супротних смерова. Тада је

$$\vec{F}_m = -\vec{F}_e \quad (2.11)$$

Пошто је вектор  $\vec{v}$  нормалан на вектор  $\vec{B}$ , интензитет Лоренцове силе која делује на све покретљиве електроне чије је укупно наелектрисање  $q$  износи

$$F = qvB \quad (2.12)$$

У случају равнотеже, интензитет електричног поља је тада дат релацијом

$$E = \frac{F_e}{q} = -vB \quad (2.13)$$

Разлика потенцијала између крајева покретног проводника када нису спојени (отворено коло) бројно је једнака индукованој електромоторној сили. Њена величина једнака је раду по јединичном наелектрисању који се врши када се оно помера насупрот пољу  $\vec{E}$  од једног до другог краја покретног проводника. Ако је дужина проводника  $l$ , за случај  $n$  електрона рад износи  $A = neEl = -nevBl = -qvBl$ . У проводнику се индукује електромоторна сила, која је по дефиницији  $\epsilon = \frac{A}{q}$ , на основу чега је електромоторна сила дуж целог проводника дужине  $l$ :

$$\epsilon = -vBl \quad (2.14)$$

Оваква електромоторна сила се назива индукована електромоторна сила. Када вектор брзине  $\vec{v}$  проводника није нормалан на вектор  $\vec{B}$ , индукована електромоторна

сила је мања јер је за настанак електромоторне сile одговорна компонента  $\vec{v}_n$  брзине  $\vec{v}$  нормалне на правац вектора  $\vec{B}$ . Ако је  $\theta$  угао између  $\vec{v}$  и  $\vec{B}$ , претходна релација добија следећи облик:

$$\varepsilon = -vBl \sin \theta \quad (2.15)$$

Из ове релације се види да до електромагнетне индукције неће доћи уколико се проводник креће у правцу линија индукције.

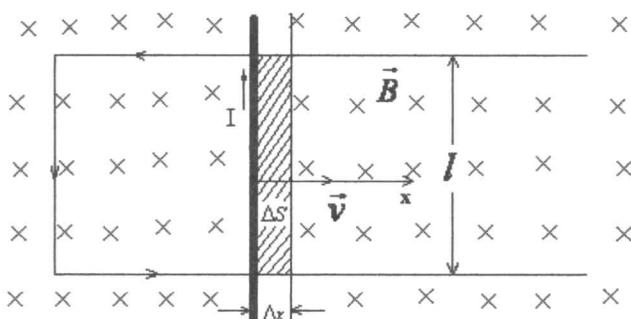
У општем случају, за произвољне правце за  $\vec{v}, \vec{B}$  и  $l$ , узимајући да  $l$  лежи у правцу x-осе правоуглог координатног система, да  $\vec{B}$  лежи у равни xy и заклапа угао  $\theta$  са x-осом а да  $\vec{v}$  заклапа неки угао  $\varphi$  са z-осом, израз за електромоторну силу има облик

$$\varepsilon = v \cos \varphi \cdot B \sin \theta \cdot l \quad (2.16)$$

Према томе, процес настајања електричне струје у затвореном проводнику, односно електромоторне сile услед кретања проводника у магнетном пољу, или у проводнику у стању мировања у променљивом магнетном пољу, назива се **електромагнетна индукција**, а одговарајућа струја **индукована струја**.

## 2.2.4. Фарадејев закон електромагнетне индукције

На основу својих експеримената Фарадеј је дошао до опште формуле која повезује случајеве када се проводник налази у променљивом магнетном пољу и када се проводник креће кроз хомогено магнетно поље. Теоријски, формула се може извести посматрајући проводник у хомогеном магнетном пољу који се креће дуж x-осе нормално на линије сила магнетног поља по проводном раму, правоугаоног облика, који затвара електрично коло.



Слика 2.13. Индуковање струје у проводнику услед промене магнетног флуksа

Електромоторна сила која се индукује у проводнику је дата изразом  $\varepsilon = -vBl$ , где је  $l$  дужина проводника. За време  $\Delta t$  проводник се помери за  $v\Delta t$ , при чему се површина  $S$  коју обухвата контура у магнетном пољу промени за  $v\Delta t l$ . Магнетни флуks  $\Phi = BS$  који обухвата контура се промени за  $\Delta\Phi = B\Delta S = Blv\Delta t$ , па се за брзину промене магнетног флуksа може писати:

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = vBl \quad (2.17)$$

У случају проводника који се налази у променљивом магнетном пољу, производ  $vBl$  једнак је индукованој електромоторној сили, па се и овде може писати:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2.18)$$

Овај општи образац који се односи на све облике електромагнетне индукције представља **Фарадејев закон електромагнетне индукције: Индукована електромоторна**



*сила у затвореној проводној контури једнака је негативној брзини промене магнетног флукса.*

Фарадејев закон у облику  $\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$  важи за затворену контуру коју чини само

један навојак. У случају калема са више намотаја, електромоторна сила се индукује у сваком навојку и пошто све електромоторне силе у појединим навојцима имају исти смер оне се сабирају тако да се на крајевима калема добија електромоторна сила једнака збиру електромоторних силе свих навојака. За калем од  $n$  истоветних навојака електромоторна сила на крајевима калема дата је обрасцем:

$$\varepsilon = -n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (2.19)$$

Негативан предзнак на десној страни представља Ленцов закон према коме индукована струја увек има такав смер да својим пољем тежи да спречи промену флукса која доводи до индукције.

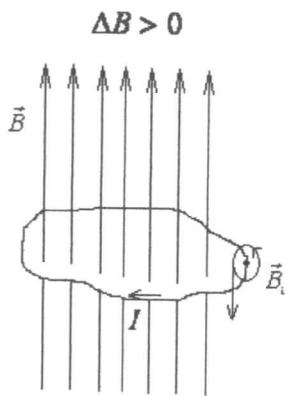
Одавде се може видети да до појаве електромоторне силе долази при промени магнетног флукса, што значи да ће се електромоторна сила индуковати и у случају када магнетно поље није хомогено и у случају када се проводник креће под произвољним углом у односу на линије сила магнетног поља (осим када је вектор брзине колинеаран са вектором магнетне индукције, јер је тада промена флукса једнака нули). Такође, образац за индуковану електромоторну силу не зависи од облика проводника. При индукцији је битна промена магнетног флукса кроз раван ограничена проводником. Ако је проводник непокретан, до промене флукса може доћи или променом интензитета магнетног поља, или променом правца поља.

## 2.2.5. Ленцово правило

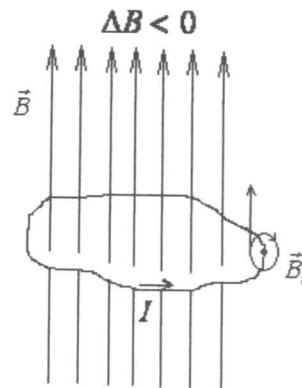
Негативан знак у Фарадејевом закону у вези је са смером индуковане струје, односно са поларитетом индуковане електромоторне силе. Ако електромоторна сила настаје услед смањења флукса ( $\Delta\Phi$  је негативно), имаће знак плус, а ако настаје као последица повећања флукса ( $\Delta\Phi$  је позитивно), имаће знак минус. Међутим, одатле се још увек не може видети у ком смеру тече индукована струја. После Фарадејевог открића електромагнетне индукције, Хајнрих Ленц врши низ експеримената и утврђује смер индуковане струје, које по њему добило назив **Ленцово правило**:

*Индукована струја има увек такав смер да својим магнетним пољем компензује промене магнетног флукса услед којих је дошло до електромагнетне индукције.*

Може се рећи да индукована струја тежи да поништи узрок свог настанка. Када до индуковане струје долази услед повећања магнетног флукса кроз затворену проводну контуру, смер индуковане струје је такав да њено магнетно поље има унутар контуре супротан смер од смера спољашњег магнетног поља чије су промене условиле индуковану струју. Ова два поља се међусобно поништавају тако да резултујући флукс кроз контуру спорије расте него кад индукције не би било. Ако је индукована струја резултат смањења магнетног флукса кроз затворену проводну контуру онда су смерови магнетног поља индуковане струје и спољашњег поља исти. Електромагнетна индукција дешава се тако да резултујући флуекс кроз контуру остане непромењен. Позитиван поларитет (знак) електромоторне силе значи да индукована струја има такав смер да је њено магнетно поље унутар контуре истог смера као спољашње поље. Ако се индукује електромоторна сила чији је знак негативан, струја има такав смер да је њено магнетно поље унутар контуре супротног смера од смера спољашњег магнетног поља.

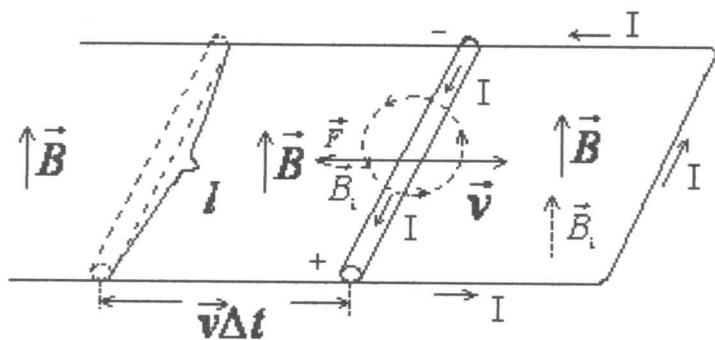


Слика 2.14. Затворена проводна контура у магнетном пољу чији интензитет расте у току времена



Слика 2.15. Затворена проводна контура у магнетном пољу чији се интензитет смањује у току времена

Када се проводник веже у струјно коло под утицајем електромоторне сile ће кроз коло потећи електрична струја. Ако покретни проводник клизи по раму од жице, све време током кретања се одржава електрични контакт и кроз коло тече струја чији смер је одређен индукованом електромоторном силом. Када кроз покретни проводник противиче струја, а проводник се налази у магнетном пољу, онда то поље на проводник делује силом  $F = liB$ , која има исти правца као брзина  $v$  а супротан смер. Ова сила, дакле, супротставља се померању проводника и за померање проводника мора се вршити рад насупрот ове сile. Тај рад се онда преводи у рад електричне струје.

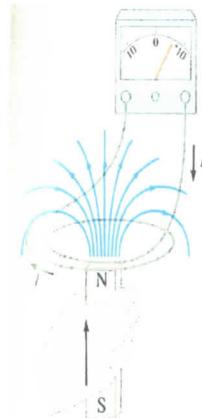


Слика 2.16. Индуковање струје у проводнику при кретању у хомогеном магнетном пољу

У случају проводника у облику прстена до промене магнетног флуksa, самим тим и појаве електромоторне сile у самом проводнику, долази приликом пресецања линија сила магнетног поља проводником. Ово доводи до закључка да се индукована електромоторна сила у проводнику јавља *само ако он у току времена пресеца магнетне линије сила*, одакле следи да је интензитет електромоторне сile пропорционалан броју магнетних линија сила које проводник пресече у јединици времена. Ово се може проверити помоћу магнета који се уноси у калем чији су крајеви везани за галванометар, као што је то Фарадеј радио у својим огледима. Струја се јавља само док се магнет креће у односу на калем. Свеједно је да ли се креће магнет или калем, битно је само релативно кретање које условљава промену флуksa. Што је кретање брже, већа је промена флуksa и већа је индукована електромоторна сила. Електромоторна сила има супротне смерове при увлачењу и при извлачењу магнета. При томе, ако се магнет помера према калему, у

калему се индукује електромоторна сила која по Ленцовом правилу има такав смер да својим магнетним пољем тежи да поништи узрок свог настанка. То значи да се на страни калема где се се јужни пол магнита помера према калему формира јужни магнетни пол. Ако би се магнет удаљавао од калема, према Ленцовом правилу струја кроз калем би текла у супротном смету па би се на страни калема где се јужни пол магнита удаљава од калема формирао северни магнетни пол који би спречавао удаљавање магнита од калема.

Уместо калема, за одређивање смера струје може послужити проводник савијен у круг и повезан са галванометром



Слика 2.17. Индуковање струје у проводнику провлачењем магнета

## 2.2.6. Електромагнетна индукција и закон одржања енергије

Ленцово правило је последица закона о одржању енергије. При стварању електромоторне сile мора се вршити рад, односно електрична енергија се добија на рачун кинетичке енергије, у случају када се проводник креће у хомогеном магнетном пољу, или на рачун енергије магнетног поља, у случају када проводник мирује у променљивом магнетном пољу. Ако би индукована струја имала супротан смер од смера дефинисаног Ленцовым правилом, проводник би непрекидно убрзавао, што би значило да се електромагнетном индукцијом може добити више енергије него што се уложи.

Када се проводник са струјом налази у електричном пољу, на сваку наелектрисану честицу у проводнику делује Лоренцова сила. Ова сила се преноси на проводник па се каже да магнетно поље делује на проводник са струјом Амперовом силом која је једнака резултантама свих Лоренцовых сила које делују на појединачне наелектрисане честице у проводнику:

$$F = iBl \sin \theta \quad (2.20)$$

$I$  - јачина електричне струје,  $l$  - дужина проводника,  $B$  - интензитет магнетне индукције,  $\theta$  - угао између проводника и правца магнетне индукције.

Ако проводник није прав или ако магнетно поље није хомогено, ралација

$$dF = iBdl \sin \theta \quad (2.21)$$

даје силу  $dF$  која дејствује на елемент проводника дужине  $dl$  у тачки где је индукција  $B$ , а угао између  $dl$  и  $B$  једнак  $\theta$ . У општем случају ће  $B$  и  $\theta$  да се мењају од тачке до тачке дуж проводника. Правац сile  $dF$  је нормалан на раван одређену са  $dl$  и  $B$ , и он се може пронаћи помоћу „правила леве руке“, где средњи прст показује смер конвенционалне струје у проводнику. Претходна једначина се може записати у векторском облику:

$$d\vec{F} = id\vec{l} \times \vec{B} \quad (2.22)$$

Вектор  $d\vec{l}$  има правац и смер струје, а правац и смер вектора  $d\vec{F}$  су дати векторским производом из  $d\vec{l}$  и  $\vec{B}$ .

Док смер Лоренцове силе зависи од знака наелектрисања, смер Амперове силе не зависи од знака наелектрисања чије усмерено кретање чини електричну струју, јер се при одређивању смера Амперове силе увек узима да струја тече од "+" ка "-". Услед кретања проводника, у њему се индукује електромоторна сила сразмерна брзини проводника. Ако његови крајеви нису спојени другим проводницима, кроз проводник неће протицати струја и он ће се кретати константном брзином. Када се коло затвори (као на слици 2.16.), кроз проводник ће почети да тече индукована струја, и на њега ће деловати Амперова сила у истом правцу а супротном смеру од смера кретања тела. Ова сила кочи проводник јер се кинетичка енергија проводника претвара у енергију електричне струје која тече све време од када је коло затворено па до заустављања проводника, те се он после одређеног времена, када се целокупна кинетичка енергија претвори у енергију електричне струје, зауставља.

Да би у проводној контури стално протицала струја потребно је надокнађивати проводнику изгубљену енергију, односно потребно је на проводник деловати неком спољашњом силом, наспрот Амперовој. Ако је спољашња сила једнака Амперовој, проводник ће се кроз хомогено магнетно поље кретати константном брзином, а кроз њега ће притицати индукована струја константног интензитета. Одавде се може видети да уколико се жели добити константна вредност електромоторне силе мора се константно улагати рад за савлађивање Амперове силе односно за раздавање наелектрисања.

## 2.2.7. Самоиндукција

Када кроз неки проводник протиче струја тада се око проводника успоставља магнетно поље. Због тога ће у било каквом проводнику у коме долази до промене јачине струје доћи до електромагнетне индукције и појаве индуковане електромоторне силе, услед промене његовог сопственог поља. Таква електромоторна сила назива се *електромоторна сила самоиндукције* или *контра-електромоторна сила*. Услед те индуковане електромоторне силе јавиће се у калему индукована струја.

*Настајање електромоторне силе (индуковане струје) у проводнику услед промене струје у њему назива се самоиндукција, а одговарајућа електромоторна сила – електромоторна сила самоиндукције.*

Број линија флукса који обухвата неко дато коло, а потиче од струје у самом том колу, зависиће од геометрије кола, то јест његовог облика, величине, броја навојака. Без обзира на геометрију, густина флукса у некој тачки је директно сразмерна са струјом која га производи, сем у случају када су присутни феромагнетни материјали, па ће и флукс бити сразмеран са струјом:

$$\Phi = Ki \quad (2.23)$$

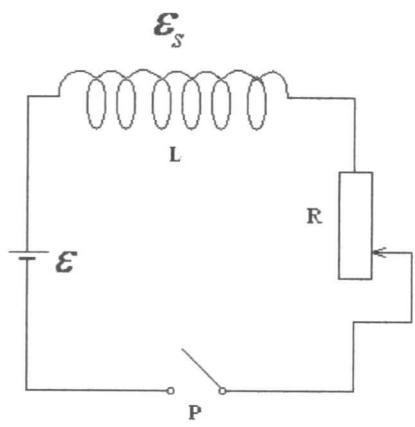
где је  $K$  - геометријски фактор.

У случају кола са  $N$  навојака и ако је сав флукс обухваћен сваким навојком, индукована електромоторна сила износи:

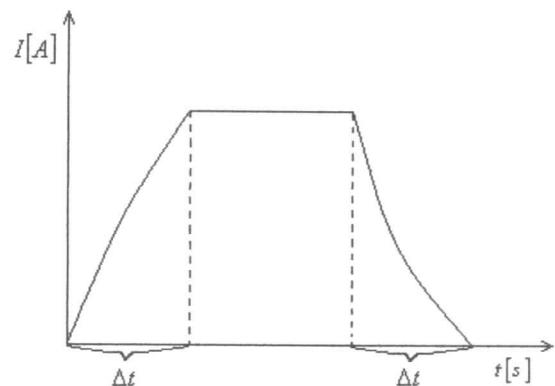
$$\varepsilon = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -NK \frac{\Delta i}{\Delta t} = -L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (2.24)$$

Константа  $L$  ( $L = NK$ ) назива се *кофицијент самоиндукције* или *индуктивност* проводне контуре, односно проводника. Кофицијент самоиндукције не зависи од јачине струје, већ је карактеристика самог проводника и зависи само од његове величине и облика. Јединица кофицијента самоиндукције је хенри  $[L] = \left[ \frac{\text{At}}{\text{i}} \right] = \frac{Vs}{A} = H$ .

Проводник има кофицијент самоиндукције један хенри ако се у њему индукује електромоторна сила самоиндукције од једног волта при брзини промене струје од једног ампера. Кофицијент самоиндукције праволинијског проводника је веома мали и најчешће се може занемарити. Ако се исти проводник намота тако да има облик завојнице са густо распоређеним навојцима (соленоид), кофицијент самоиндукције постаје доволно велики да се појава самоиндукције може лако запазити. У случају да су за извор једносмерне струје редно везани соленоид, променљиви отпорник и прекидач (слика 2.18.), при укључивању и искључивању електричног кола долази до појаве самоиндукције.



Слика 2.18. Индуковање струје у калему



Слика 2.19. Временска зависност јачине струје у колу са индуктивним отпором

При укључивању електричног кола струја не достиже тренутно максимум вредности, већ после одређеног времена  $\Delta t$ . У пракси, ово време је веома кратко и тешко се региструје. Ова појава се може објаснити тиме што је струји потребно неко коначно време да порасте до максималне вредности, при чему долази до наглог пораста њеног магнетног поља, чиме се нагло повећава флукс кроз завојницу. Ово узрокује појаву електромоторне силе самоиндукције односно индуковане струје, која сходно Ленцовом правилу мора имати такав смер да тежи да поништи узрок свог настанка, па ће према томе имати смер супротан смеру примарне струје. Другим речима, јачина струје касни за напоном.

Када електрична струја у колу достигне константну вредност, тада и магнетно поље достиже вредност која се не мења у току времена па се електрична енергија више не троши на стварање магнетног поља.

Када се електрично коло прекине, јачина струје не пада тренутно на нулу, већ после временског интервала  $\Delta t$ . Ово се објашњава појавом електромоторне силе самоиндукције, односно индуковане струје, која се појављује на рачун енергије магнетног поља које ишчезава, и сходно Ленцовом правилу сада има смер који се поклапа са смером струје електричног извора.

Самоиндукција у проводнику кроз који противе наизменична струја смањује јачину те струје, па изгледа као да постоји неки додатан отпор. Утицај самоиндукције на јачину наизменичне струје у проводнику описује се посебном величином која се назива индуктивни отпор, а обележава се са  $X_L$ . Што је већа контра-електромоторна сила јачина наизменичне струје је мања, односно индуктивни отпор је већи.

## 2.2.8. Енергија и густина енергије магнетног поља

Од тренутка када се коло (слика 2.18.) затвори прекидачем, до тренутка када струја у колу достигне коначну вредност, у колу постоји и електромоторна сила самоиндукције  $\varepsilon_s$ , па на основу Омовог закона јачина струје у колу износи:

$$i = \frac{\varepsilon + \varepsilon_s}{R} = \frac{\varepsilon - L \frac{di}{dt}}{R} \quad (2.25)$$

Одакле је

$$\varepsilon = iR + L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (2.26)$$

Множењем леве и десне стране са  $i\Delta t$  добија се:

$$\varepsilon i\Delta t = i^2 R\Delta t + Li\Delta i \quad (2.27)$$

$\varepsilon i\Delta t$  - електрична енергија коју даје извор

$i^2 R\Delta t$  - Цулова топлота

$Li\Delta i$  - енергија која се троши на стварање магнетног поља струје

Одавде се може видети да се део електричне енергије коју даје извор троши на загревање проводника, а део електричне енергије се троши на стварање магнетног поља струје, тако да овај образац представља закон одржања енергије. Када струја престане да се повећава ( $Li\Delta i = 0$ ), енергија се више не троши на стварање магнетног поља.

Претходна релација може се записати у диференцијалном облику:

$$\varepsilon idt = i^2 Rdt + Lidi \quad (2.28)$$

Одакле следи једначина одржања енергије у интегралном облику:

$$\int_0^I \varepsilon idt = \int_0^I i^2 Rdt + \int_0^I Lidi = \frac{LI^2}{2} + \int_0^I i^2 Rdt \quad (2.29)$$

Члан на левој страни ове релације приказује енергију која је за време  $t$  потребна за успостављање струје од 0 до  $I$  и за развијање топлоте у колу. Први члан на десној страни

$$W = \frac{LI^2}{2} \quad (2.30)$$

представља енергију доведену калему за време док се струја повећава од 0 до  $I$ , док други члан представља топлоту развијену у колу за то време. С обзиром да се енергија доведена калему утроши на стварање магнетног поља, она се мора налазити у магнетном пољу, и стога представља енергију магнетног поља. Када се струјно коло прекине, јачина струје пада на нулу, али услед самоиндукције која настаје на рачун енергије магнетног поља то се не дешава тренутно, већ после одређеног времена. Коефицијент самоиндукције  $L$

према својој природи приказује инерцију калема, односно кола. Тако се израз  $\frac{LI^2}{2}$  може

упоредити са изразом за кинетичку енергију  $E_k = \frac{mv^2}{2}$ , но ово представља само аналогију.

Енергија магнетног поља је у случају хомогеног поља равномерно распоређена у простору, док у случају нехомогеног поља има неравномерну просторну расподелу. Због тога се за описивање расподеле енергије магнетног поља уводи физичка величина густина енергије магнетног поља, која представља магнетну енергију у јединици запремине:

$$w = \frac{W}{V} \quad (2.31)$$

Уколико се енергија магнетног поља веже за калем или торус, где је  $l$  обим средњег круга торуса или дужина калема, а  $S$  површина пресека, може се сматрати да је магнетна енергија распоређена у запремини  $Sl$ . За  $N$  навојака, узимајући у обзир да је  $\Phi = NI$ , а  $L = KN$  следи:

$$L = \frac{N\Phi}{I} \quad (2.32)$$

За магнетно коло важи

$$\Phi = \frac{NI}{R} = \frac{NI}{l} = \frac{BS}{\mu S} \quad (2.33)$$

Одакле је енергија магнетног поља

$$W = \frac{LI^2}{2} = \frac{N\Phi I}{2} = \frac{\Phi^2 l}{2\mu S} = \frac{B^2}{2\mu} Sl \quad (2.34)$$

Одавде следи образац за запреминску густину енергије

$$w = \frac{W}{V} = \frac{W}{Sl} = \frac{B^2}{2\mu} \quad (2.35)$$

С обзиром да је  $B = \mu H$ , густина енергије може се изразити и у следећем облику

$$w = \frac{\mu H^2}{2} \text{ или } w = \frac{BH}{2} \quad (2.36)$$

## 2.2.9. Енергија електромагнетног поља

Електромагнетно поље чине електрично и магнетно поље која постоје истовремено у истој области простора. У свакој тачки таквог поља вектори  $\vec{E}$  и  $\vec{B}$  имају одговарајуће вредности којима се описује електромагнетно поље. Такво поље ствара наелектрисана честица која се креће.

Енергија електромагнетног поља се, према томе, састоји из два дела: енергије електричног и енергије магнетног поља, чији збир представља енергију електромагнетног поља и у вакууму има облик:

$$W_{em} = W_e + W_m = \frac{qU}{2} + \frac{B^2 V}{2\mu_0} \quad (2.37)$$

Стога је густина енергије електромагнетног поља једнака збиру густина енергија електричног и магнетног поља, и у вакууму има облик:

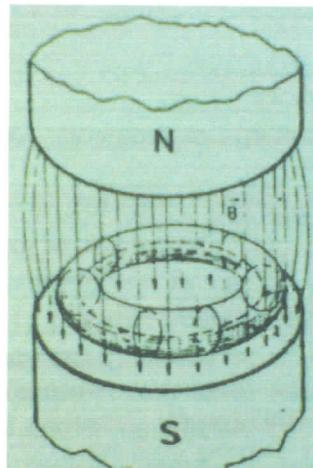
$$w_{em} = w_e + w_m = \frac{\epsilon_0 E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (2.38)$$

Енергија која на Земљу стиже са Сунца је пример енергије електромагнетног поља које чине електромагнетни таласи.

## 2.2.10. Бетатрон

Вртложно електрично поље које се индукује услед промена магнетног поља, користи се за убрзавање електрона у бетатрону, акцелератору који је изумео амерички физичар Kerst (Donald William Kerst, 1911 – 1993). Уколико се кружни проводник постави у променљиво магнетно поље нормално на линије сила магнетног поља, у проводнику ће се индуковати електромоторна сила, услед које ће у проводнику настати кретање електрона, односно индуковаће се електрична струја. С обзиром да се електрони крећу

кроз метал, услед отпора при кретању им се не може саопштити велико убрзање. Отпор средине кроз коју се крећу електрони се може значајно смањити уколико се уместо металног проводника узме стаклена комора и из ње се извуче ваздух.



Слика 2.20. Бетатрон

Главни делови бетатрона су електромагнет и стаклена комора. У безвоздушни простор стаклене коморе се убаце слободни електрони, односно катодни зраци. Магнетно поље се постепено појачава повећавањем јачине струје у електромагнету. Јачина магнетног поља се подеси тако да се електрони који описују кружну путању (пошто се крећу нормално на линије сила магнетног поља) крећу тако да се полу пречник њихове путање поклапа са полу пречником стаклене цеви. На електроне делује електромагнетна сила у правцу тангенте на њихову путању, и пошто је отпор њиховом кретању веома мали, они се могу убрзати до великих брзина. Када расте магнетно поље, полу пречник путање електрона би требало да се смањује, али се то не дешава јер се истовремено врши и убрзавање електрона при чemu центрифугална сила компензује пораст јачине поља. На тај начин се електрони убрзавају докле год поље расте, кружећи у безвоздушном простору у цеви. Када достигну доволно велику енергију, након обиласка исте кружне путање неколико стотина хиљада пута, електрони скрену са путање и излазе из бетатрона. При томе, електрони достижу брзине блиске релативистичким вредностима. Ово представља принцип рада бетатрона који се често назива и индукциони акцелератор. Брзи електрони који се добијају у бетатрону користе се за испитивање структуре атомског језгра, у медицини и технички и за добијање рендгенских зрака.

### **3. Обрада наставне теме: Електромагнетна индукција**

#### **3.1. Методичке напомене**

Настава је организовани облик поучавања (делатност наставника) и учења (делатност ученика).

Наставник у учионици мора бити предавач, организатор и мотиватор. Квалитет знања ученика зависи од тога колико је наставник успешан у свом послу. Због тога наставник мора извршити адекватну припрему за сваки час. На часу мора подсетити ученике на одговарајуће садржаје које су раније прешли и мора на конкретним примерима демонстрирати теоријске ставове и закључке.

Наставне методе могу бити вербално-текстуалне, демонстрационо-илустрационе и лабораторијско-експерименталне. Приликом извођења наставних часова на којима се обрађује тема „Електромагнетна индукција“ могу се комбиновати вербална метода (монолошки и дијалошки метод) и илустрационо-демонстрационе методе (демонстрациони огледи, показивање и приказивање модела, шема, слика, скица, прибора, уређаја, инструмената, телевизијских емисија, филмова и друге врсте пројекција). На тај начин стечено знање је трајније и применљивије, лакше се повезује са искуством и новим знањима.

Дидактички принципи указују на то како да рад наставника буде рационалан и ефикасан, како да се обезбеде најбоља решења образовних и васпитних задатака. Они обухватају обраду и тумачење наставног садржаја, рад наставника, организоване облике образовно-васпитног рада, рад ученика, њихово усвајање знања, контролу, проверавање и оцењивање квалитета знања. У дидактичким принципима синтетизују се предавање и учење и развој личности ученика. Дидактички принципи се не могу посматрати и примењивати изоловано, већ у одређеној међусобној повезаности и систему. Они произилазе не само из дидактичке теорије, него и из наставне праксе. У настави физике посебан значај имају следећи дидактички принципи: принцип научности, принцип поступности и систематичности, принцип очигледности, принцип повезаности теорије и праксе, принцип свесне активности ученика, принцип трајности усвојеног знања, навика и вештина, принцип индивидуализације наставног рада, принцип примерености наставе, принцип хуманизма, принцип идејне усмерености, принцип антиципације, принцип интегралности.

Општи циљ наставе физике јесте да ученици упознају природне појаве и основне природне законе, да стекну основну научну писменост, да се оспособе за уочавање и распознавање физичких појава у свакодневном животу и за активно стицање знања о физичким појавама, да кроз истраживање оформе основу научног метода и да се усмере према примени физичких закона у свакодневном животу и раду.

Остали циљеви и задаци наставе физике су:

- развијање функционалне писмености
- упознавање основних начина мишљења и расуђивања у физици
- разумевање појава, процеса и односа у природи на основу физичких закона
- развијање способности за активно стицање знања о физичким појавама кроз истраживање
- развијање радозналости, способности рационалног расуђивања, самосталности у мишљењу и вештине јасног и прецизног изражавања
- развијање логичког и апстрактног мишљења
- схватање смисла и метода остваривања експеримента и значаја мерења
- решавање једноставних проблема и задатака у оквиру наставних садржаја
- развијање способности за примену знања из физике

- схватање повезаности физичких појава и екологије и развијање свести о потреби заштите, обнове и унапређивања животне средине
- развијање радних навика и склоности ка изучавању наука о природи
- развијање свести о сопственим знањима, способностима и даљој професионалној оријентацији

Наставни час чине уводни, главни и завршни део часа. У уводном делу часа се остварује психолошка припрема ученика и интелектуална радозналост за обраду нових садржаја. Све што се ради у овом делу часа мора бити у функцији обраде нових наставних садржаја. Може се поновити градиво које је претходило оном које је предвиђено за тај час у циљу праћења и бољег разумевање новог градива. Затим се, после кратког теоријског увода, ученици упознају са задацима које је потребно остварити на часу, са начинима рада, својим обавезама, о томе како ће се радити, а могу се задати примери – проблемске ситуације (огледи, задаци и питања) које ће ученици решавати у паровима или групама. Када ученици реше задате примере, различити резултати до којих су дошли могу се, опет вођењем дијалога, изложити пред целим разредом. У обради наставних садржаја треба да доминира активност ученика и ова етапа треба да траје најдуже на часу. Завршни део часа представља утврђивање обрађеног градива и сумирање резултата рада. Може се организовати петминутно проверавање да би се утврдило да ли су ученици и у којој мери разумели и савладали градиво.

У оквиру наставне теме „Електромагнетна индукција“ предвиђа се обрада следећих наставних јединица: појава електромагнетне индукције, електромагнетна индукција и Лоренцова сила, Фарадејев закон електромагнетне индукције, Ленцово правило, самоиндукција, енергија електромагнетног поља, бетатрон. Пре обраде наведених јединица потребно је поновити градиво другог разреда везано за магнетно поље.

### **3.2. Једноставни експерименти у настави физике**

Школски експеримент из физике је извор знања, метода учења, потврда, истина, полазиште за успостављање логичких и математичких операција, веза теорије и праксе и средство за остваривање очигледности у настави. Школски експеримент обухвата демонстрационе експерименте, лабораторијске вежбе, лабораторијске експерименталне задатке, домаће експерименталне задатке и израду учила и апаратса. Демонстрационе огледе претежно изводи наставник и због тога се често наглашава да је то посебан вид изражавања наставника у току извођења наставе. Међутим, веома је значајно укључивање ученика у реализацију самог огледа. Са становишта теорије наставе сврха демонстрационог експеримента може бити: очигледност у изучавању градива, конкретизација примене теоријског знања, стицање умешавања и вештина на конкретном примеру, мотивација, повећавање интересовања за изучавање градива, изазивање посматране физичке појаве, илустрација принципа и закона или развијање критичког мишљења.

Једна слика вреди хиљаду речи па не чуди чињеница да ученици увек више воле реалне појаве и објекте и оно што могу да виде него апстрактне појаве и оно што морају да замисљају. Стога су демонстрациони огледи нешто што наставу чини занимљивијом и интересантнијом.

Општи захтеви за извођење демонстрационих огледа су:

- Правилан избор демонстрационог огледа – сврсисходност
- Темељно припремање наставника уз обавезно испробавање – поузданост
- Обезбеђење средстава и поступака који доприносе да се демонстрациони оглед лако прати и уочавају сви његови битни елементи – видљивост пре свега

- Апаратуре и средства којима се експеримент изводи треба да су што је могуће једноставнији – приступачност и очигледност
- Поступци и интерпретација резултата морају бити у складу са достигнућима дидактике и физике као науке – научна заснованост
- При извођењу огледа морају бити предузете све мере заштите ученика од повреда као и заштита средстава рада од оштећења – безбедност и заштита

Одређена појава се може приказати на различите начине, путем различитих огледа. На наставнику је да одабере огледе којима ће описати одређене појаве, придржавајући се општих захтева за извођење демонстрационих огледа. Једноставни експерименти представљају веома битан део наставног часа физике и карактеришу се тиме да се могу реализовати помоћу материјала који се налази свуда око нас, па је стога њихово извођење доступно свим ученицима. Улога једноставних експеримената се не огледа само у демонстрацији одређене физичке појаве, већ ови експерименти могу представљати и тест спремности ученика да на бази познавања физичких феномена и одређеног математичког апарата дубље образложе једноставно демонстриране појаве.

## **4. Демонстрациони огледи**

### **4.2.1. Магнетни топ**

#### **ЦИЉ**

Поновити основне особине магнета рађене претходне школске године.

#### **ПОТРЕБАН МАТЕРИЈАЛ**

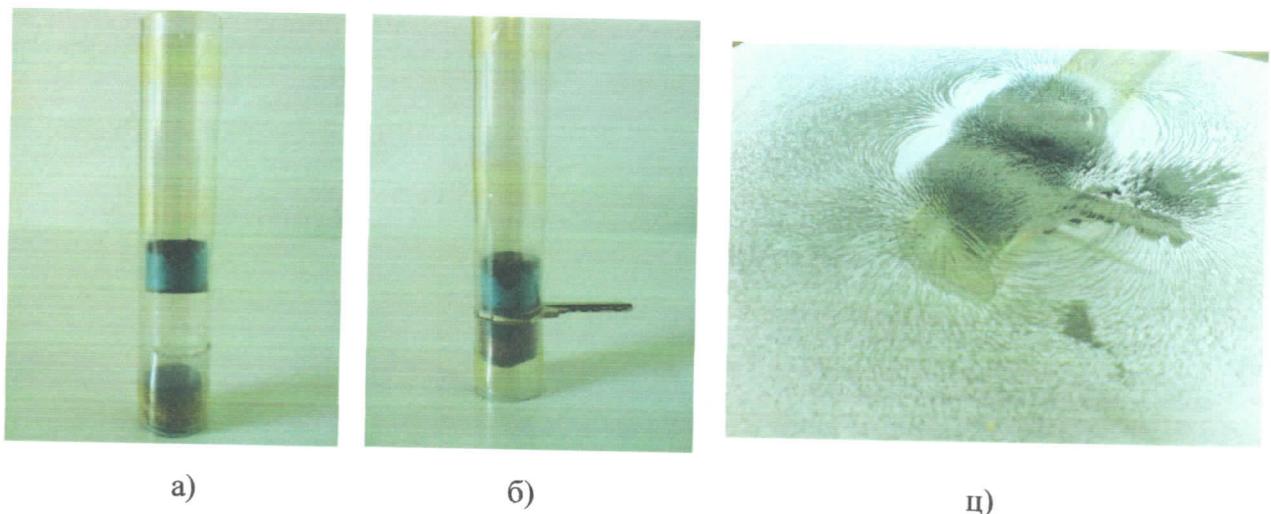
- два магнета
- гвоздени кључ
- маказе
- скалпел
- лепљива трака
- пластична флаша

#### **ПРИПРЕМА И ИЗВОЂЕЊЕ ЕКСПЕРИМЕНТА**

Исећи средишњи део флаше, савити у цилиндар и залепити траком. При дну цилиндра скалпелом исећи прорез за кључ. Убацити магнет у цилиндар са једне стране прореза. Други магнет убацити са друге стране прореза, тако да се два магнета одбијају (слика 4.1.а). Убацити кључ у прорез и привући магнете на што ближе међусобно растојање (слика 4.1.б). Извући кључ, прво полако, затим брзо.

#### **ЗАПАЖАЊЕ**

Два магнета се одбијају у цилиндру и не могу се приближити један до другог а да се не делује неком спољашњом силом. Када се кроз прорез убацити кључ, растојање између магнета се смањи. Уколико се оба магнета приближе тако да додирују кључ, они остају у том положају и то представља једну стабилну конфигурацију. Када се кључ полако уклони, а магнет при дну цилиндра придржава руком, други магнет се враћа на висину на којој је био пре убаџивања кључа. Уколико се кључ уклони великом брзином, магнет се пење на већу висину и излеће из цилиндра.



Слика 4.1. Магнетни топ

#### ОБЈАШЊЕЊЕ

Када се магнети убаце у цилиндар тако да су два истоимена магнетна пола окренута један ка другом, они се одбијају. Магнети се могу приближити на мање међусобно растојање само деловањем неком спољашњом силом. По престанку деловања силе, магнети се враћају на првобитно растојање. Магнетно дејство се веома слабо „осећа“ кроз гвожђе, јер се кроз њега линије сила магнетног поља затварају. Због тога се међусобно растојање магнета смањи по убацивању кључа од гвожђа у прорез. Када се магнети приближе тако да додирују кључ са различитих страна, они остају у том положају јер сила којом магнети привлаче гвоздени кључ постаје већа од сile којом се међусобно одбијају. Када се кључ полако изведи из цилиндра, линије сила се више не затварају кроз кључ тако да се магнети опет одбијају. При брзом вајењу кључа, долази до наглог повећања магнетног флукса у простору између два магнета, што има за последицу избацивање магнета из цилиндра. Линије сила за случај када се између два магнета која се одбијају стави гвоздени кључ приказане су на слици 4.1. под ц.

#### УСВОЈЕНИ ПОМЛОВИ

Магнетни полови, линије сила магнетног поља, магнетна својства материјала.

#### 4.2.2. Ерстедов оглед

##### ЦИЉ

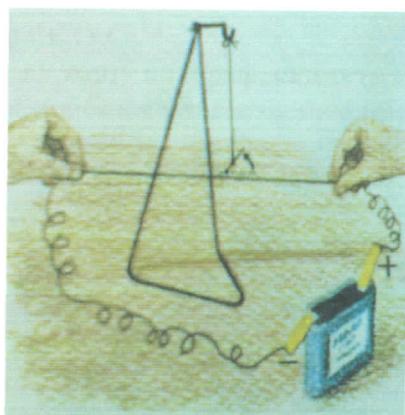
Демонстрирати повезаност електричних и магнетних појава.

##### ПОТРЕБАН МАТЕРИЈАЛ

- батерија око 9 V
- око 30 см бакарне жице
- намагнетисана чиода или челична чиода и магнет
- конац
- статив

##### ПРИПРЕМА И ИЗВОЂЕЊЕ ЕКСПЕРИМЕНТА

Уколико чиода није намагнетисана, потребно је намагнетисати провлачењем поред једног пола магнета, увек у истом правцу, или неко време држати у додиру магнета. Од батерије и бакарне жице саставити коло као на слици. Концем везати чиоду и окачiti је на статив. Испод намагнетисане чиоде приближити део проводника, кроз који протиче струја, паралелно са чиодом. Посматрати шта се дешава.



Слика 4.2. Ерстедов оглед

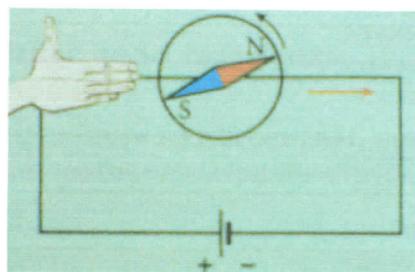
### ЗАПАЖАЊЕ

Када кроз проводник противе електрична струја намагнетисана чиода скреће. Када се промени смер електричне струје у колу мења се и смер скретања чиоде. Уколико се при истом смеру протицања струје проводник постави изнад а потом испод намагнетисане чиоде, чиода мења смер скретања. По прекиду струјног кола чиода се враћа у првобитан положај.

### ОБЈАШЊЕЊЕ

Наелектрисања у кретању стварају магнетно поље. Када кроз проводник противе струја, око проводника се ствара магнетно поље, и он се понаша као магнет. Због тога се интеракција проводника са чиодом може посматрати као интеракција два магнета.

За одређивање смера скретања магнетне игле у магнетном пољу проводника са струјом користи се правило десне руке (слика 4.3.). Уколико се шака десне руке држи изнад проводника са прстима испруженим у смеру електричне струје тако да је длан окренут према проводнику, палац показује смер скретања северног пола магнетне игле. Код овог правила рука се поставља увек са оне стране магнетне игле са које је и проводник.



Слика 4.3. Правило десне руке

### УСВОЈЕНИ ПОДАЦИ

Правило десне руке.

### 4.2.3. Електромагнет

#### ЦИЉ

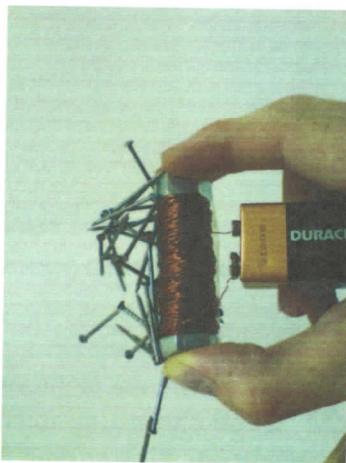
Демонстрирати утицај електричног струја на магнетизам.

#### ПОТРЕБАН МАТЕРИЈАЛ

- батерија од 9 V
- неколико метара изоловане бакарне жице
- гвоздени шраф
- ситни гвоздени предмети

#### **ПРИПРЕМА И ИЗВОЂЕЊЕ ЕКСПЕРИМЕНТА**

Намотати изоловану бакарну жицу на шраф, скинути изолацију са крајева жице, прикључити крајеве на батерију и приближити гвозденим предметима.



Слика 4.4. Електромагнет

#### **ЗАПАЖАЊЕ**

Када кроз жицу тече струја, шраф привлачи гвоздене предмете. По прекиду кола шраф више не привлачи гвоздене предмете.

#### **ОБЈАШЊЕЊЕ**

Када кроз проводник протиче струја, око проводника се ствара магнетно поље чији изглед је приказан на слици 2.8. Шраф се понаша као магнет и привлачи ситне гвоздене предмете. По прекиду струјног кола магнетно поље ишчезава, шраф губи магнетна својства и више не привлачи гвоздене предмете.

#### **УСВОЈЕНИ ПОМВОВИ**

Магнетне особине проводника са струјом.

#### **4.2.4. Линије сила магнетног поља соленоида**

#### **ЦИЉ**

Демонстрирати утицај електричитета на магнетизам, приказати изглед линија сила магнетног поља соленоида кроз који протиче електрична струја.

#### **ПОТРЕБАН МАТЕРИЈАЛ**

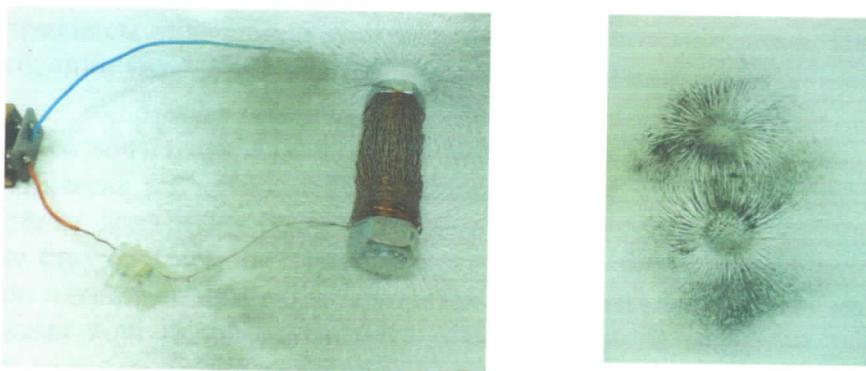
- батерија од 9 V
- неколико метара изоловане бакарне жице
- гвоздени шраф
- опиљци гвожђа
- папир или стакло

#### **ПРИПРЕМА И ИЗВОЂЕЊЕ ЕКСПЕРИМЕНТА**

Намотати жицу на шраф, као у претходном огледу. Поставити шраф испод папира или стакла и на папир (стакло) посuti опиљке гвожђа.. Прикључити крајеве жице на батерију и посматрати шта се дешава.

#### **ЗАПАЖАЊЕ**

Опиљци гвожђа се прераспоређују и групишу као што је приказано на слици 4.5.



Слика 4.5. Линије сила магнетног поља соленоида

#### ОБЈАШЊЕЊЕ

Када се крајеви жице прикључе на извор једносмерне струје, кроз коло противе струја која изазива појаву магнетног поља око жице. Магнетно поље је појачано језгром од гвожђа. Гвоздени опиљци се постављају на правац линија сила магнетног поља јер поље у тим тачкама има највећу вредност.

#### УСВОЈЕНИ ПОЈМОВИ

Линије сила магнетног поља.

#### 4.2.5. Индуковање струје у непокретном калему

##### ЦИЉ

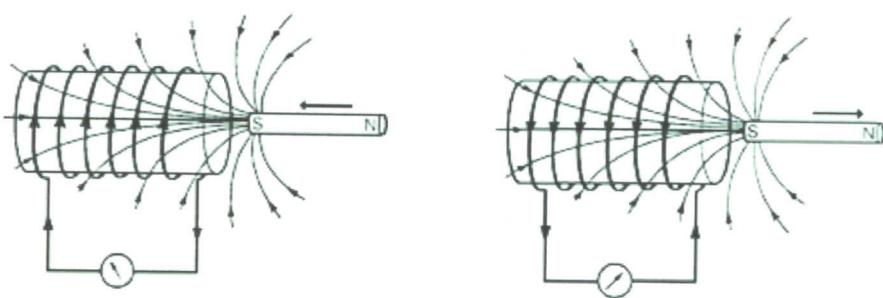
Демонстрирати појаву електромагнетне индукције, повезати са линијама сила магнетног поља, указати на смер индуковане струје.

##### ПОТРЕБАН МАТЕРИЈАЛ

- калем
- галванометар
- магнет

##### ПРИПРЕМА И ИЗВОЂЕЊЕ ЕКСПЕРИМЕНТА

Спојити крајеве калема са галванометром. Увлачiti и извлачiti један крај магнета у калем, затим исто то поновити и са другим крајем магнета и посматрати шта се дешава.



Слика 4.6. Индуковање струје у калему

#### ЗАПАЖАЊЕ

Приликом увлачења једног краја магнета у калем (на пример јужног магнетног поља), галванометар показује да у калему долази до појаве електричне струје. Када се магнет не креће у калему, тада галванометар показује да кроз калем не противе струја, а када се исти крај магнета извлачи из калема галванометар показује да се у калему јавља електрична струја, која има супротан смер од струје која се јављала приликом увлачења магнета у калем. Када се у калем увлачи супротан крај магнета (северни пол магнета),

долази до исте појаве, с тим што струја сада има супротне смерове у односу на струју која се јавља приликом увлачења и извлачења јужног магнетног пола. Интензитет струје је сразмеран брзини увлачења и извлачења магнета из калема.

#### ОБЈАШЊЕЊЕ

Када се магнет увлачи у калем повећава се флукс кроз површину обухваћену калемом. Промена магнетног флукса изазива појаву вртложног електричног поља под чијим дејством долази до усмереног кретања наелектрисаних честица, односно појаве индуковане струје. Сходно Ленцовом правилу смер индуковане струје ће бити такав да смер њеног магнетног поља буде супротан смеру магнетног поља магнета, па ће се са стране калема која је ближа магнету образовати исти магнетни пол као ближи пол шипкастог магнета. Смер индуковане струје се одређује на основу смера скретања казаљке галванометра, која увек скреће ка вишем потенцијалу. Када магнет мирује у калему, магнетно поље у којем се налази калем се не мења у току времена, и пошто нема услова за стварање електричног поља у калему, кроз калем не протиче струја. Приликом извлачења магнета из калема, вртложно електрично поље, које настаје услед промене магнетног поља, сада има супротан смер јер у овом случају долази до смањивања јачине магнетног поља. Ово има за последицу да струја која се јавља у калему сада има супротан смер, јер ће тежити да својим магнетним пољем спречи слабљење магнетног флукса. Смер магнетног поља индуковане струје биће исти као смер магнетног поља шипкастог магнета. Повећањем брзине померања магнета или употребом два магнета, повећава се брзина промене флукса, па се сходно Фарадејевом закону електромагнетне индукције  $\varepsilon = -\frac{\Delta B}{\Delta t} S = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ , када је  $S=const$ , индукује већа електромоторна сила. Приликом увлачења супротног kraja магнетне шипке у калем, линије сила магнетног поља имају супротан смер од првобитног, тако да и вртложно електрично поље има супротан смер, што има за последицу да струја која се јавља у калему приликом увлачења супротног магнетног поља има супротан смер од струје која се јавља у калему у првом случају. Такође, приликом извлачења магнета из калема, струја мења смер услед смањивања јачине магнетног поља.

#### НАПОМЕНА

Оглед се може реализовати и тако што се у калем увуче језгро од меког гвожђа, а затим се шипкасти магнет приближава или удаљава од језгра. Може се реализовати и следећи оглед: У калем се увуче шипкасти магнет, а крајеви калема се повежу са галванометром. Када се шипка од меког гвожђа приближава калему, казаљка галванометра скреће на једну страну, а када се удаљава, казаљка галванометра скреће на другу страну. Ако се повећа брзина померања шипке, повећава се и скретање казаљке.

#### УСВОЈЕНИ ПОМВОИ

Фарадејев закон електромагнетне индукције, Ленцово правило.

#### 4.2.6. Прстен који прати магнет

##### ЦИЉ

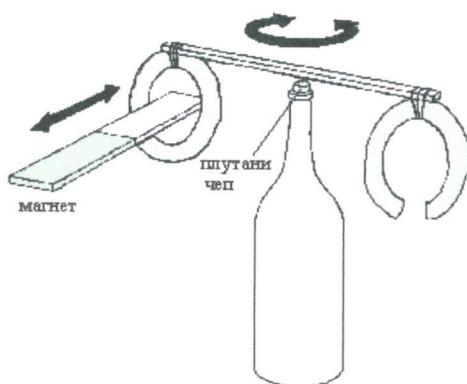
Демонстрирати Ленцово правило.

##### ПОТРЕБАН МАТЕРИЈАЛ

- магнетна шипка
- два алуминијумска прстена, један затворен, други засечен
- танак дрвени штап
- боца са плутаним чепом
- танак ексер
- лепак или конац
- део дугмета или копче за одело које служи као подлога

## ПРИПРЕМА И ИЗВОЂЕЊЕ ЕКСПЕРИМЕНТА

У тежишту штапа направити мало удубљење у које се постави део копче. Поставити чеп са чиодом окренутом врхом на горе у грлић боце. Забости чиоду у тежиште штапа тако да се штап лако обрће око игле. Причврстити алуминијумске прстенове на крај дрвеног штапа лепком или концем. Један пол шипкастог магнета полако увлачiti у затворен прстен. Затим исти пол извлачiti из прстена. Исто то поновити са засеченим прстеном.



Слика 4.7. Демонстрација Ленцовог правила

## ЗАПАЖАЊЕ

Када се магнет увлачи у незасечен прстен, прстен бежи од магнета, а када се магнет извлачи из прстена, прстен иде за магнетом. Када се магнет увлачи и извлачи из засеченог прстена, прстен мирује. Уколико се оглед понови са супротним магнетним полом, ефекти ће бити исти.

## ОБЈАШЊЕЊЕ

У овом огледу је битно да прстенови буду од алуминијума, односно материјала који је проводник и који не поседује феромагнетне особине тако да га магнет не може привући. Уколико се, на пример, северни пол магнета увлачи у прстен, услед повећања магнетног флукса кроз површину обухваћену прстеном индуковаће се магнетно поље супротног смера. Северни пол индукованог магнетног поља ће бити до северног магнетног поља шипкастог магнета, и због тога прстен бежи од магнета. Када се магнет извлачи из прстена, смер индуковане струје је такав да је њено магнетно поље истог смера као поље магнета, због компензације магнетног флукса. Сада је јужни пол индукованог магнетног поља до северног поља шипкастог магнета и прстен иде за магнетом. Када се увлачи или извлачи јужни пол шипкастог магнета, ефекти су исти, само се мења смер индуковане струје. Приликом увлачења или извлачења магнета у прстен са процепом, такође се индукује електромоторна сила, али због прекида кола неће течи индукована струја па се неће индуковати ни магнетно поље. Због тога прстен остаје у стању мировања, без обзира на кретање магнета.

## УСВОЈЕНИ ПОДАЦИ

Електромагнетна индукција, Ленцово правило, магнетно поље.

### 4.2.7. Заустављено падање

#### ЦИЉ

Демонстрирати дејство вртложних струја.

## **ПОТРЕБАН МАТЕРИЈАЛ**

- бакарна цев дужине 1 м - 1,5 м
- јак округли магнет који неће запињати приликом падања кроз цев
- предмет од гвожђа истог облика и димензија као и магнет

## **ПРИПРЕМА И ИЗВОЂЕЊЕ ЕКСПЕРИМЕНТА**

На бакарној цеви избушити рупе тако да леже на правој линији, а растојање између рупа треба да буде 5-6 см. Пустити предмет од гвожђа да пада кроз цев и мерити време падања, а потом исто урадити са магнетом.



Слика 4.8. Заустављено падање

## **ЗАПАЖАЊЕ**

Када се кроз вретикално постављену цев пусти да пада предмет од гвожђа, време падања није дуже од једне секунде. Уколико се кроз цев пусти магнет, време падања је знатно дуже.

## **ОБЈАШЊЕЊЕ**

Када се кроз бакарну цев пусти предмет од гвожђа, на њега поред силе Земљине теже делује само сила отпора ваздуха, и због тога он веома брзо пада. У случају када се кроз бакарну цев креће магнет, долази до индуковања вртложних струја чије се магнетно поље, сходно Ленцовом правилу, супротставља пољу магнета које изазива вртложне струје. Магнетно поље индуковане струје делује на магнет силом која се супротставља његовом кретању и због тога магнет знатно дуже пада кроз бакарну цев.

## **УСВОЈЕНИ ПОМВОИ**

Вртложне струје, Ленцово правило.

### **4.2.8. Самоиндукција**

#### **УСВОЈЕНИ ПОМВОИ**

Самоиндукција, електромоторна сила самоиндукције.

#### **ЦИЉ**

Демонстрирати појаву самоиндукције, објаснити зашто се јавља варница приликом искључивања кућних апаратова.

#### **ПОТРЕБАН МАТЕРИЈАЛ**

- калем са много намотаја постављен на рам од гвожђа или бакарна жица и рам од гвожђа
- сијалица од 12 V
- извор једносмерне струје, акумулатор око 2 V, или две редно везане батерије од по 1,5 V

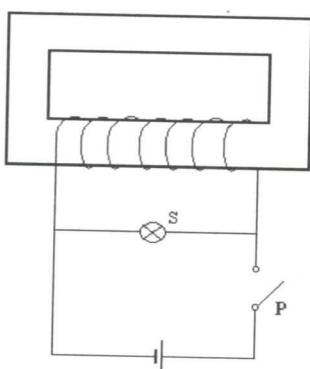
#### **НАПОМЕНА**

Самоиндукција се може демонстрирати помоћу апаратуре са слике 4.9. под б). Карактеристика једноставних огледа је да се могу реализовати помоћу материјала који се налази свуда око нас. Због тога се за демонстрацију самоиндукције може искористити

шема са слике 4.9. под а), где се користе горе наведени материјали који су свима лако доступни.

#### ПРИПРЕМА И ИЗВОЂЕЊЕ ЕКСПЕРИМЕНТА

Намотати бакарну жицу на рам од гвожђа и саставити коло као на слици 4.9. под а). Затворити коло. Затим прекинути коло и посматрати шта се дешава.



а)



б)

Слика 4.9. Демонстрација самоиндукције

#### ЗАПАЖАЊЕ

Када се струјно коло затвори, сијалица не гори или гори врло слабо. У моменту када се прекине струјно коло сијалица тренутно засветли великом интензитетом.

#### ОБЈАШЊЕЊЕ

По затварању струјног кола сијалица не гори или гори врло слабо јер је њен отпор предвиђен за напон од 12 V. С обзиром да је сијалица прикључена на напон од 2 V, кроз њу противе струја чија јачина није доволјна да усија влакно сијалице. Када се струјно коло прекине, сијалица засветли великом интензитетом јер кроз њу пролази струја самоиндукције. Ову струју ствара брза промена магнетног флукса. При протицању струје, кроз калем је пролазио велики магнетни флукс. По прекиду струјног кола тај флукс веома брзо пада на нулу. Велика и брза промена магнетног флукса изазива појаву индуковане електромоторне сile у калему која је већа од 2 V и због тога сијалица јаче светли. Ова струја је краткотрајна јер се електромоторна сила самоиндукције ствара на рачун енергије магнетног поља које веома брзо ишчезава. Калем се поставља на рам од гвожђа да би се појачало магнетно поље и ефекат био што јачи.

#### УСВОЈЕНИ ПОЈМОВИ

Самоиндукција, електромоторна сила самоиндукције.

#### 4.2.9. Једноставан генератор

##### ЦИЉ

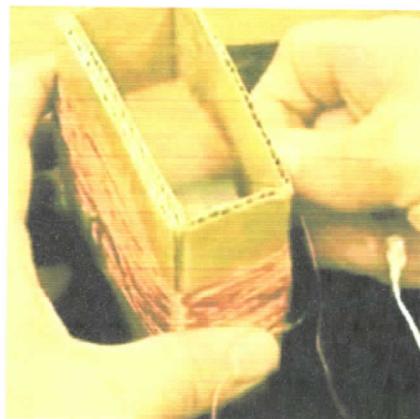
Демонстрирати појаву и примену електромагнетне индукције.

##### ПОТРЕБАН МАТЕРИЈАЛ

- два магнета
- изолована бакарна жица
- дебела жица или ексер
- сијалица
- картон

## **ПРИПРЕМА И ИЗВОЂЕЊЕ ЕКСПЕРИМЕНТА**

Од картона направити кутију као на слици. Пробушити кутију са стране, провући жицу и унутар кутије закачити магнете за жицу, тако да се могу окретати заједно са жицом. На картонску кутију намотати танку бакарну жицу као на слици 4.10. Са крајева жице скинути изолацију и прикључити сијалицу. Завртети жицу на којој су прикачени магнети.



Слика 4.10. Једноставан генератор

### **ЗАПАЖАЊЕ**

Када се жица за коју су закачени магнети заврти, сијалица светли.

### **ОБЈАШЊЕЊЕ**

До паљења сијалице долази због појаве индуковане струје у бакарној жици. Услед промене флукса линија сила магнетног поља, у жици се индукује електромоторна сила која је узрок појаве индуковане струје.

### **УСВОЈЕНИ ПОМВОИ**

Електромагнетна индукција.

### **4.2.10. Лебдећи прстен**

#### **ЦИЉ**

Демонстрирати појаву електромагнетне индукције и Ленцовог правила.

#### **ПОТРЕБАН МАТЕРИЈАЛ**

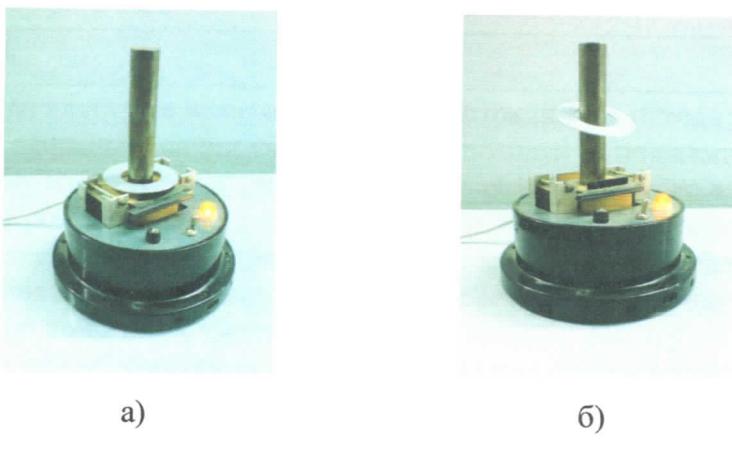
- уређај који ствара променљиво магнетно поље
- гвоздени ваљак
- два гвоздена прстена, један зарезан
- сијалица прикључена на крајеве калема

#### **ПРИПРЕМА И ИЗВОЂЕЊЕ ЕКСПЕРИМЕНТА**

Поставити гвоздени ваљак на уређај. Кроз ваљак провући засечен прстен и укључити уређај. Затим исто то поновити са незасеченим прстеном. Потом кроз ваљак провући сијалицу прикључену на крајеве калема.

#### **ЗАПАЖАЊЕ**

Када се кроз ваљак од гвожђа провуче засечен прстен и укључи уређај, прстен остаје у положају у којем је и био, а када се провуче незасечен прстен и укључи уређај, прстен излеће из цилиндра. Уколико се укључи уређај па се потом кроз ваљак провлаче прстенови, запажа се да засечени прстен пада а незасечени лебди. Када се кроз ваљак провуче сијалица прикључена на крајеве калема долази до њеног паљења. Ако се ваљак уклони и сијалица приближи уређају, запажа се да сијалица много слабије светли.



Слика 4.11. Лебдећи прстен



Слика 4.12. Индуковање струје у калему

## ОБЈАШЊЕЊЕ

У незасеченом прстену се, услед променљивог магнетног поља, индукује струја која по Ленцовом правилу у прстену ствара магнетно поље супротно оријентисано од спољашњег поља, па услед нагле промене магнетног флукса долази до излетања прстена. Уколико се прстен накнадно убаци кроз ваљак не долази до његовог избацивања, већ прстен лебди на одређеној висини. У случају када се оглед врши са засеченим прстеном, не запажа се овакав ефекат зато што у прстену долази само до раздвајања наелектрисања а не и до појаве индуковане струје која би требало да створи магнетно поље супротно усмерено од спољашњег поља. До паљења сијалице долази услед појаве индуковане струје у калему под утицајем променљивог магнетног поља. Гвоздени ваљак појачава магнетно поље па због тога сијалица јаче светли у његовом присуству.

## УСВОЈЕНИ ПОЈМОВИ

Електромагнетна индукција, Ленцово правило.

## 5. Закључак

Овај рад треба да илуструје велики значај демонстрационих огледа у настави физике, да покаже како се на занимљив начин ученици могу упознати са појавама које су садржане у теми „Електромагнетна индукција“, и како да боље разумеју и усвоје битне појмове из ове наставне теме. Кроз једноставне огледе ученици веома лако уочавају везу између електричитета и магнетизма. Демонстрациони оглед као што је „лебдећи прстен“ може се извести на почетку часа. Тако упечатљив оглед неће никога оставити равнодушним. Скренуће се пажња не само оних ученика који боље познају физику, већ свих оних који гледају у прстен који лебди опирнући се гравитационој сили. Затим се кроз гвоздени ваљак провуче сијалица прикључена на крајеве калема. Ученици треба да објасне због чега сијалица светли. Ово подстиче ученике на размишљање и они покушавају да објасне ове појаве. На тај начин утврђују појаву електромагнетне индукције и Ленцовог правила. У овом раду су наведени само неки огледи помоћу којих се могу демонстрирати појаве које се у оквиру појединих наставних јединица обрађују, а који такође доприносе и повишеном степену заинтересованости ученика, њиховој креативности и подстицању њиховог истраживачког рада.

Циљ рада је да се тема „Електромагнетна индукција“ обради како са теоријског, тако и са експерименталног аспекта. Часови на којима се физичке појаве демонстрирају једноставним огледима, у великој мери олакшавају увођење основних појмова из области теме која се обрађује и омогућују увођење научног метода у свакодневну школску праксу.

За остваривање основних образовних и васпитних циљева, приликом обраде појединих наставних јединица је потребно комбиновати различите наставне методе уз обавезно придржавање општих принципа педагошког рада.

У свему овоме пресудну улогу има наставник, као предавач, организатор и мотиватор. Наставник мора инсистирати на логичком редоследу увођења нових појмова и физичких величина. Свака тема би требало да буде равноправно обрађена са свих аспекта, како теоријског тако и експерименталног. Од ученика се након обраде наставне теме „Електромагнетна индукција“ очекује да усвоје појмове везане за ову наставну тему, да схвате појаве електромагнетне индукције, самоиндукције, Ленцовог правила, да објасне везу електричитета и магнетизма, принципе рада генератора, електромотора, електромагнета, бетатрона и да покушају да дају што више примера из свакодневног живота који су у вези са електромагнетном индукцијом.

## **6. Литература**

1. Божин Светозар, Распоповић Милан, Даниловић Емило, Физика за III разред гимназије, Завод за уџбенике и наставна средства, Београд 2000
2. Димић др Гојко, Илић Душан, Томић Јездимир, Физика за VIII разред основне школе, Завод за уџбенике и наставна средства Србије, Београд 1972
3. Жданов Л.С, Жданов Г.Л, ФИЗИКА для средних специальных заведений, Наука, Москва 1981
4. Ивановић др инж. Драгиша М, Вучић инж. Властимир М, Физика II, Грађевинска књига, Београд 1965
5. Костантини Феручио, Учим на огледима, Књига друга, Техничка књига, Загреб 1972
6. Млађеновић Милорад, Јакшић Мирко, Историја класичне физике, Завод за уџбенике и наставна средства, Београд-Нови Сад 1993
7. Млађеновић Милорад, Развој физике - електромагнетизам, ИРО Грађевинска књига, Београд 1986
8. Обадовић Душанка Ж, Једноставни огледи у настави физике, ПМФ Департман за физику, Нови Сад, 2007 (скрипта)
9. Попов др Слободан, Јукић др Степан, Педагогија, CNTI, WILLY, Нови Сад 2006
10. Распоповић Милан О, Методика наставе физике, Завод за уџбенике и наставна средства, Београд 1992
11. Распоповић Милан О, Физика за III разред гимназије, Завод за уџбенике и наставна средства, Београд 2007
12. F. W. Sears, Elektricitet i magnetizam, Naučna knjiga, Beograd 1963
13. Хенбест Нигел, Експлозија високоне, Глобус, Загреб 1983
14. [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

## **Кратка биографија кандидата**



Ненад Павловић, рођен 21.11.1985. године у Вршцу. Завршио основну школу „Душан Јерковић“ у Банатском Карловцу и гимназију „Борислав Петров Браца“ у Вршцу. Године 2004. уписао Природно-математички факултет у Новом Саду, смер професор физике.

**УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ  
ПРИРОДНО-МАТЕМАТИЧКИ ФАКУЛТЕТ  
КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА**

*Редни број:*

**РБР**

*Идентификациони број:*

**ИБР**

*Тип документације:*

**ТД**

*Тип записа:*

**ТЗ**

*Врста рада:*

**ВР**

*Аутор:*

**АУ**

*Ментор:*

**МН**

*Наслов рада:*

**НР**

*Језик публикације:*

**ЈП**

*Језик извода:*

**ЈИ**

*Земља публиковања:*

**ЗП**

*Уже географско подручје:*

**УГП**

*Година:*

**ГО**

*Издавач:*

**ИЗ**

*Место и адреса:*

**МА**

*Физички опис рада:*

**ФО**

*Научна област:*

**НО**

*Научна дисциплина:*

**НД**

*Предметна одредница/кључне речи:*

**ПО**

**УДК**

*Чува се:*

**ЧУ**

*Важна напомена:*

**ВН**

*Извод:*

**ИЗ**

*Датум прихватања теме од НН*

*већа:*

**ДП**

*Датум одбране:*

**ДО**

*Чланови комисије:*

**КО**

*Председник:*

др Божидар Вујичић, редовни проф.

*члан:*

др Душанка Обадовић, редовни проф.

*члан:*

др Мaja Стојановић, доцент

Монографска документација

Текстуални штампани материјал

Дипломски рад

Ненад Павловић

др Душанка Обадовић, редовни проф.

Обрада наставне теме: „Електромагнетна индукција“ за средње школе

српски (Ћирилица)

српски/енглески

Република Србија

Војводина

2009

Ауторски репринт

Природно-математички факултет, Трг Доситеја Обрадовића 4, Нови

Сад

6/41/14/0/32/0/0

Физика

Демонстрациони експерименти у настави

Електромагнетна индукција, самоиндукција, Ленцово правило,

енергија и густина енергије магнетног поља

Библиотека департмана за физику, ПМФ-а у Новом Саду

нема

У овом раду приказана је обрада теме „Електромагнетна индукција“ за средње школе. У циљу бољег разумевања ове теме, поред теоријског објашњења и примера, приказана је имплементација једноставних огледа у процес образовања.

29.06.2009.

17.07.2009.

UNIVERSITY OF NOVI SAD  
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS  
KEY WORDS DOCUMENTATION

<i>Accession number:</i>	
<b>ANO</b>	
<i>Identification number:</i>	
<b>INO</b>	
<i>Document type:</i>	Monograph publication
<b>DT</b>	
<i>Type of record:</i>	Textual printed material
<b>TR</b>	
<i>Content code:</i>	Final paper
<b>CC</b>	
<i>Author:</i>	Nenad Pavlović
<b>AU</b>	
<i>Mentor/comentor:</i>	Ph.D. Dušanka Obadović, full prof.
<b>MN</b>	
<i>Title:</i>	Treatment theme: "Electromagnetic induction" in High School
<b>TI</b>	
<i>Language of text:</i>	Serbian (Cyrillic)
<b>LT</b>	
<i>Language of abstract:</i>	English
<b>LA</b>	
<i>Country of publication:</i>	Republic of Serbia
<b>CP</b>	
<i>Locality of publication:</i>	Vojvodina
<b>LP</b>	
<i>Publication year:</i>	2009
<b>PY</b>	
<i>Publisher:</i>	Author's reprint
<b>PU</b>	
<i>Publication place:</i>	Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad
<b>PP</b>	
<i>Physical description:</i>	6/41/14/0/32/0/0
<b>PD</b>	
<i>Scientific field:</i>	Physics
<b>SF</b>	
<i>Scientific discipline:</i>	Demonstrative experiments in teaching
<b>SD</b>	
<i>Subject/ Key words:</i>	Electromagnetic induction, self-inductance, Lenz's law, magnetic field energy and magnetic field energy density
<b>SKW</b>	
<b>UC</b>	
<i>Holding data:</i>	Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4
<b>HD</b>	
<i>Note:</i>	none
<b>N</b>	
<i>Abstract:</i>	Paper deals with analysis of the treatment of teaching unit "The Electromagnetic induction" on a high school level. In order to understand better concepts of Electromagnetic induction, besides theoretical explanation, the implementation of simple experiments into the educational process is shown.
<b>AB</b>	
<i>Accepted by the Scientific Board:</i>	
<b>ASB</b>	29.06.2009.
<i>Defended on:</i>	
<b>DE</b>	17.07.2009.
<i>Thesis defend board:</i>	
<b>DB</b>	
<i>President:</i>	Ph.D. Božidar Vujičić, full prof.
<i>Member:</i>	Ph.D. Dušanka Obadović, full prof.
<i>Member:</i>	Ph.D. Maja Stojanović, assistant prof.

