

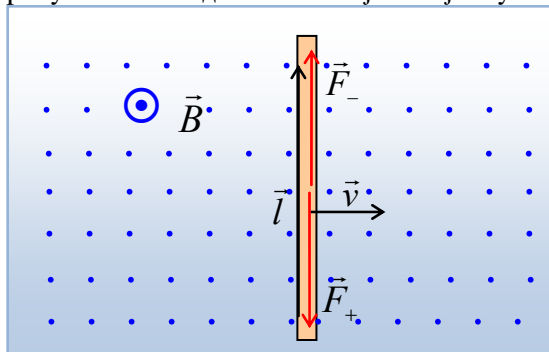
13. ЕЛЕКТРОМАГНЕТНА ИНДУКЦИЈА

13.1. ОСНОВЕН ЗАКОН ЗА ЕЛЕКТРОМАГНЕТНА ИНДУКЦИЈА. ЛЕНЦОВО ПРАВИЛО

Досега ги изучувавме само магнетните полиња на струите кои се временски константни, па во таа смисла и магнетното поле, опишано со векторот на магнетната индукција $\vec{B}$ е временски константно.

Временски променливи струи, односно временски променливите магнетни полиња предизвикуваат низа нови појави. Една од најважните појави е **електромагнетната индукција**.

Најголема заслуга за откритието и примената на електромагнетната индукција му припаѓа на Мајкл Фарадеј (Michael Faraday, 1791-1867). Тој ја има откриено оваа појава во 1831 година, а нешто малку подоцна за појавата независно публицирал труд и Џозеф Хенри (Henry Joseph, 1797-1878). За одбележување е дека, според некои извори, Хенри дури и порано ја открил појавата, но Фарадеј порано ги публицирал резултатите и дал поопстојно објаснување.



Сл. 13.1

Даден е спроводник со должина l поставен нормално на магнетните силиви линии (на сликата 13.1 полето е со насока кон читателот $\odot$) којшто започнуваме да го движиме со брзина v во насока нормална на магнетните силиви линии. Дефиниран е и на векторот $\vec{l}$ чиј што правец се поклопува со правецот на спроводникот, којшто е

нормален на на силивите линии.

На секој полнеж што се наоѓа во внатрешноста на спроводникот дејствува Лоренцова сила, чијашто големина е дадена со $F=QvB$. Бидејќи секој полнеж ја има брзината на спроводникот $\vec{v}$, тогаш оваа сила дејствува нормално на $\vec{B}$ и на $\vec{v}$ т.е:

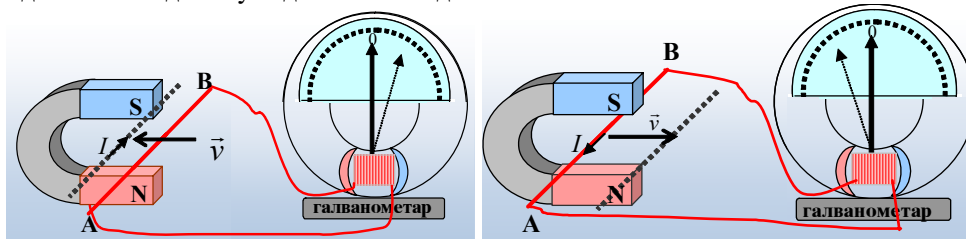
$$\vec{F} = Q(\vec{v} \times \vec{B}) . \quad (13.1)$$

Со оваа релација е дадена силата со која магнетното поле дејствува на позитивните полнежи. Лоренцовата сила која дејствува на негативните полнежи е дадена со :

$$\vec{F}_- = -Q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (13.2)$$

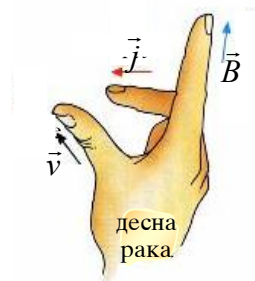
Под влијание на овие сили полнежите би се придвижиле во правец нормален на магнетната индукција, по должината на спроводникот, на едната страна се движат позитивните полнежи (стрелка надолу на сликата), а на другата страна негативните (стрелка нагоре на сликата). Ваквото магнетно поле на спроводникот му делува исто како тој да се нашол во електрично поле со насока одгоре надолу. Слободните електрони ќе се движат во спроводникот во насока на силата $\vec{F}_-$ сè дотогаш додека вишокот на електроните што ќе се натрупаат на едната страна не создадат толкаво електрично поле што ќе го спречи натамошното движење на електроните.

Дека навистина доаѓа до вакво одвојување на полнежите може едноставно да се убедиме со следниов опит.



Сл.13.2

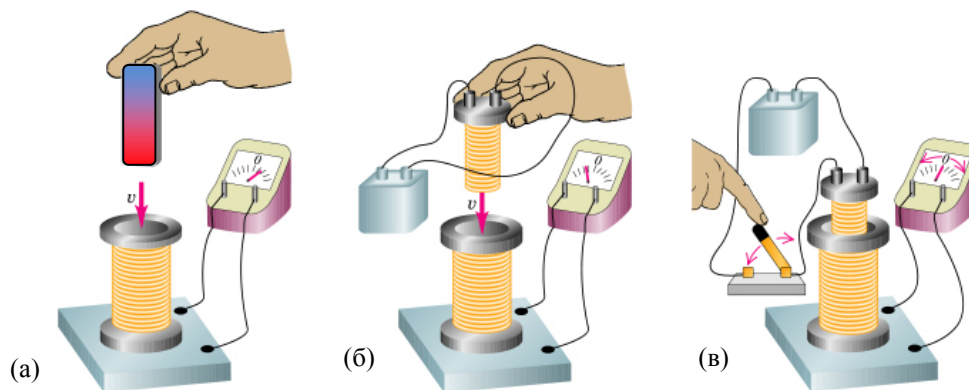
Ако една права жица што е дел од затворена контура која е поврзан еден галванометар се движи меѓу половите на потковичест магнет, меѓу точките А и В ќе се јави потенцијална разлика, поради која низ галванометарот ќе потече струја. Ако се смени насоката на движењето, ќе се промени и насоката на струјата, па галванометарот ќе се отклони на спротивната страна. Всушност насоката на индуциранта струја се определува според “правилото на трите прста на десната рака”,



Сл.13.3

при што, ако насоката на движењето на спроводникот $\vec{v}$ е во насока на палецот, а магнетната индукција $\vec{B}$ е во насока на показалецот, средниот прст ја покажува насоката на индуцираната струја (Сл. 13.3). Притоа, електромоторната сила што се создава се нарекува **индуцирана електромоторна сила**, а самата појава е **електромагнетна индукција**.

Индуцирањето струја е многу поефектно ако наместо еден спроводник се користи соленид (сл.13.4 (а)). Инструментот ќе покаже дека насоките на струите при внесувањето и при вадењето на магнетот се спротивни. Насоката зависи и од тоа кој магнетен пол се внесува, северниот или јужениот. Колку е бројот на навивките поголем, толку ќе биде поголем и отклонот.



Сл. 13.4. Неколку начини за индуцирање струја: (а) внесување-изнесување на перманентен магнет (б) внесување-изнесување на електромагнет и (в) електромагнет статичен а вклучување и исклучување на колото на електромагнетот.

Галванометарот ќе покажува отклон сè додека постои движењето. Притоа е неопходно спроводникот да ги сече силовите линии на магнетот. Ако спроводникот го движиме во насока на магнетните силиви линии, во случајот од сликата 13.2, горе-долу, галванометарот не покажува отклон. Тоа значи дека е важен и аголот помеѓу насоката на поместувањето на спроводникот и магнетните силиви линии. Најголем отклон галванометарот ќе покаже тогаш кога движењето на спроводникот е нормално на силовите линии. Притоа е многу важно дека овде постои *релативно движење* помеѓу магнетното поле и жицата. Имено, истиот ефект ќе се добие ако спроводникот АВ го држиме во мирување, а магнетот го движиме. Исто така може да се покаже дека *отклонот на галванометарот е толку поголем колку што е брзината на движењето поголема*. Но, ако спроводникот и магнетот заедно ги движиме, не се добива отклон на галванометарот. Ако сега перманентниот магнет го замениме со електромагнет (сл.13.4 (б)) тогаш повторно галванометарот ќе ни покаже течење на струја. И, на крајот, ако ниту перманентниот магнет, ниту намотката се движат еден во однос на друг, туку со помош на еден прекинувач (сл.13.4 (в)) се вклучува и прекинува колото на електромагнетот, и тогаш на галванометарот ќе се појави отклон.

13.1. 1. Закон за електромагнетна индукција

За да ја пресметаме големината на индуцираната електромоторна сила ќе се вратиме повторно на сликата 13.1.

ЕМС е дадена со односот помеѓу работата што се врши од надворешните сили за пренесување на полнеж и со големината на тој полнеж Q . Тоа значи дека треба да ја пресметаме работата на

надворешната сила што го движи спроводникот. Оваа работа е еднаква на скаларниот производ од надворешната сила $\vec{F}_{nd}$ по поместувањето $d\vec{s}$:

$$dW = \vec{F}_{nd} d\vec{s} \quad (13.3)$$

Претходно објаснивме дека при движењето се создава струја, тоа значи дека оваа сила $\vec{F}_{nd}$ е во рамнотежа со Амперовата сила со која што на спроводник со струја му дејствува магнетното поле, па следува дека:

$$\vec{F}_{nd} = -\vec{F}_A$$

или бидејќи $\vec{F}_A = I(\vec{l} \times \vec{B})$ за работата се добива:

$$dW = -I(\vec{l} \times \vec{B}) d\vec{s} \quad (13.4)$$

каде што $d\vec{s}$ е поместувањето. Индуцираната електромоторна сила тогаш е:

$$\mathcal{E}_{ind} = \frac{dW}{dQ} = -\frac{dt}{dQ} (\vec{l} \times \vec{B}) d\vec{s} = -(\vec{l} \times \vec{B}) \frac{d\vec{s}}{dt} = -(\vec{l} \times \vec{B}) \vec{v} \quad (13.5)$$

Релацијата (13.5) претставува мешан производ. Бидејќи за мешаниот производ важи: $(\vec{a} \times \vec{b})\vec{c} = (\vec{c} \times \vec{a})\vec{b}$, тогаш ќе биде:

$$dW = -I(\vec{l} \times \vec{B}) d\vec{s} = -I(d\vec{s} \times \vec{l})\vec{B} = -\frac{dQ}{dt} (d\vec{s} \times \vec{l})\vec{B} \quad (13.6)$$

а индуцираната ЕМС $\mathcal{E}_i$ е тогаш

$$\mathcal{E}_i = \frac{dW}{dQ} = -\frac{\vec{B}(d\vec{s} \times \vec{l})}{dt} \quad (13.7)$$

Што всушност претставува векторскиот производ $(d\vec{s} \times \vec{l})$?

Тоа е вектор, нормален на површината определена со векторот на поместувањето и должината на спроводникот, а по големина еднаков на плоштината на таа површина. Како што веќе знаеме тоа е векторот на површината $d\vec{A}$. Според тоа за индуцираната ЕМС се добива релацијата:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\vec{B}d\vec{A}}{dt} \quad (13.8)$$

а бидејќи $\vec{B}d\vec{A} = d\Phi$, каде што $d\Phi$ е промена на магнетниот флукс при движење на спроводникот, па:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (13.9)$$

Оваа релација е математичка формулација на **законот за електромагнетната индукција**. Ако промената на магнетната индукција се изрази во вебери, а времето во секунди, тогаш индуцираната електромоторна сила ќе биде изразена во волти.

На прв поглед релацијата (13.9) изгледа само како поинаква форма на равенката (13.5), меѓутоа, опитите покажуваат дека релацијата (13.9) е многу поопшта, бидејќи укажува дека **електромоторна сила $\mathcal{E}_i$ се јавува во сите случаи кога се менува магнетниот флукс, независно од тоа дали спроводникот се движи или не.**

Видовме дека опитот од слика 13.4 (в) укажува на тоа дека индуцираната ЕМС може да настане и без движење на спроводникот, односно кога не доаѓа до промена на плоштината A , туку кога се менува магнетната индукција B . Во таа смисла, законот за електромагнетната индукција може да се прикаже и во уште една форма.

Имено, бидејќи е $\vec{B}d\vec{A} = d\Phi$ следува дека:

$$\Phi = \int_A \vec{B}d\vec{A} = \int_A B \cos\alpha \, dA \quad (13.10)$$

каде што $\alpha = (\vec{B}, d\vec{A})$, па ако не се менува површината $\vec{A}$, туку само магнетната индукција, законот за електромагнетната индукција може да се прикаже во уште една форма:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \left[\int_A B \cos\alpha \, dA \right] = -\int_A \frac{d(B \cos\alpha)}{dt} dA \quad (13.11)$$

Оваа релација е позната како **Фарадеева форма на законот за електромагнетната индукција**.

13.1.2. Ленцово правило

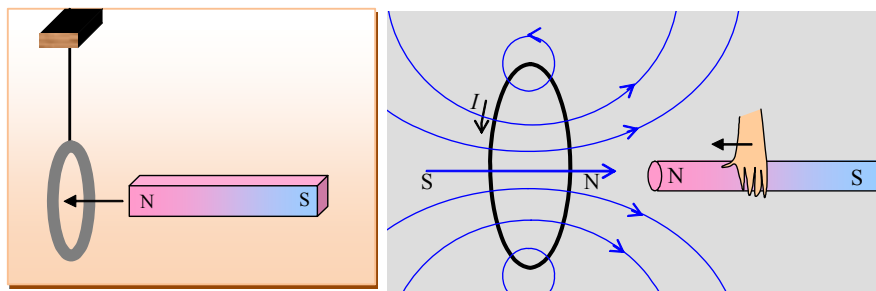
Да се позанимаваме подетално со знакот во релацијата (13.9), односно (13.10) и (13.11). Тој знак е објаснет од Ленц (Емилий Христианович Ленц, 1804-1864) академик од Петроград, кој независно од Фарадеј и Хенри, дошол до низа слични заклучоци поврзани со електромагнетните појави. Според него: **насоката на индуцираната електромоторна сила (струја) е таква што индуцираната струја со своето магнетно поле се спротивставува на промената на магнетниот флукс која е причина за нејзиното создавање.**

Ако причина за индуцирање на струјата е движење на спроводникот, струјата што се индуцира има таква насока што Амперова сила се спротивставува на тоа движење.

Ако електромоторната сила што се индуцира е предизвикана со промена на магнетната индукција, индуцираната струја создава сопствено магнетно поле чијашто магнетна индукција се спротиставува на промената. Ако причина за индуцирање на струјата е растење на магнетната индукција, магнетната индукција на индуцираната струја има спротивна насока, па ќе создаде поле што е обратно насочено за да го намали полето-причинител. Меѓутоа, ако причина за индуцирање на струјата е опаѓање на магнетната индукција, тогаш магнетната индукција на индуцираната струја е со иста насока со полето што ја создава, па на тој начин се спротиставува на опаѓањето на полето. Тоа значи дека општо земено: **индуцираната електромоторна сила има знак кој се спротиставува на временската промена на магнетниот флукс**. Тоа е суштината на Ленцовото правило. Ова правило доаѓа до израз кај сите експерименти кои ги опишавме, но најјасно се демонстрира со следниов експеримент.

Експеримент 1

Еден лесен алуминиумски прстен (може да се направи од лименка од сок) слободно виси закачен на конец (слика 13.5). При внесување на



Сл. 13.5 а) Алуминиумски прстен. При внесување на магнетот, прстенот бега од него (се отклонува налево). При изнесување, прстенот се приближува кон магнетот (се отклонува надесно). б) Објаснение на опитот

магнетот во прстенот, прстенот се одбива. Тоа значи дека во алуминиумскиот прстен се индуцира струја која се спротиставува на порастот на бројот на магнетните силиови линии, на порастот на флуксот, па затоа во прстенот се индуцира таква струја што создава такво магнетно поле што има истоимен магнетен пол (сл.13б) на страната на магнетот, поради што доаѓа до одбивање на прстенот. Ако потоа почекаме да се смири нишањето, и магнетот го извлекуваме, тогаш поради тоа што сега доаѓа до намалување на бројот на магнетните силиови линии, на прстенот од кај страната на магнетната прачка се индуцира струја што создава разноимен магнетен пол, па прстенот ќе биде повлечен од прачкестиот магнет. Значи, индуцираната струја се спротиставува на

доближувањето на магнетот (причина за нејзиното создавање), но се спротиставува и на оддалечувањето на магнетот, бидејќи и тоа е причина за нејзината појава.

Ако истото се направи со прстен кој е прекинат, нема да дојде до оддалечување и приближување на прстенот. Во тој случај индуцираната струја е со многу мала јачина, бидејќи прстенот е прекинат, па поради тоа ефектот не е видлив.

Експеримент 2

Ефект што го опишавме погоре се изведува и со помош на уредот од сликата 13.6. кој претставува двоен лесен алуминиумски прстен кој



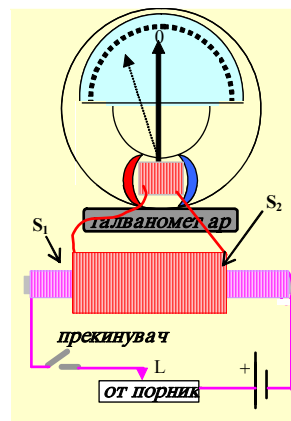
слободно може да ротира околу тежиштето. Притоа, левиот прстен е пресечен, а десниот е непрекинат. При внесување на магнет во непрекинатиот прстен уредот се завртува. Ако истото се направи со прекинатиот прстен, нема да дојде до ротација околу оската. Причината за ротацијата при внесување е индуцираната струја што тече низ струјната контура што тежнее да создаде поле што ќе се спротисти на промената

на магнетниот флукс. Кај левата (прекинатата) контура не може да дојде до течење на струја низ затворена контура бидејќи не може да се затвори струјното коло.

ПРАШАЊА И ПРОБЛЕМИ

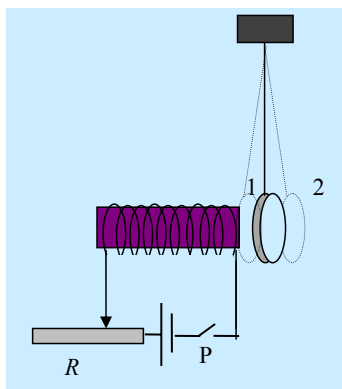
1. Ќе се појави отклон на галванометарот од сликата 13.2 ако спроводникот АВ го движиме во насока горе-долу? Објаснете го вашиот одговор.

2. На сликата 13.7 во внатрешноста на соленоидот S_2 е вметнат соленоидот S_1 во кој има и железно јадро. Овој соленоид е поврзан со извор на прав напон преку прекинувач и отпорник. Ако при вклучување на струјното коло галванометарот регистрирал отклон во насока прикажана на сликата, каков ќе биде отклонот на галванометарот при исклучување на колото?



Sl.13.7

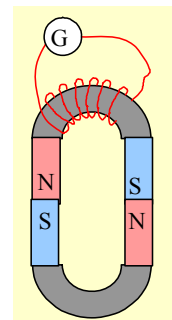
3. Дали ќе се појави отклон на галванометарот од сликата 13.7 ако лизгачот на отпорникот се придвижи во насока према десно? Каква ќе биде насоката на отклонот на галванометарот? Ќе се индуцира ли струја ако железното јадро од соленоидот се извади? Објаснете ги вашите одговори.



Сл.13.8

4. На сликата 13.8 е даден еден електромагнет поврзан со струјно коло. До крајот на електромагнетот е обесен лесен алуминиумски прстен. Кога струјата во колото се вклучува, прстенот се одбива од јадрото (положба 2). Кога колото се исклучува прстенот се доближува до јадрото (положба 1). Објаснете го ефектот!

5. Два потковичести магнета се споени со спротивните полови како на сликата 13.9. На едниот од нив е наденат соленоид чии краеви се споени со галванометар. Во моментот на одво-



Сл.13.9

јувањето на магнетите, како и во моментот на нивно спојување, стрелката на галванометарот ќе покаже отклон и тоа во спротивни насоки. Укажете на причината за појавата на отклоните.

Пример задачи

6. Авион лета со брзина од 1000 km/h во област каде што магнетната индукција на Земјата е речиси вертикална и еднаква на $5 \cdot 10^{-5}$ T. Колкава е потенцијалната разлика што се создава меѓу краевите на авионските крила ако растојанието меѓу нив е 70 m.

Решение:

$$\mathcal{E}_i = -Blv = -\frac{5 \cdot 10^{-5} \cdot 70 \cdot 1000 \cdot 10^3}{3600} = 0,97 \text{ V.}$$

7. Во хомогено магнетно поле со магнетска индукција $1 \cdot 10^{-1}$ T е поставена рамка со плоштина од $A = 10^{-3} \text{ m}^2$. Површината на рамката е нормална на магнетните силиови линии, а нејзиниот отпор е $R = 1 \Omega$. Колкаво количество електричество протнекува низ спроводникот на рамката, ако магнетното поле исчезне?

Решение:

Во почетокот магнетниот флуks изнесува:

$$\phi = B \cdot A = 1 \cdot 10^{-1} \cdot 10^{-3} = 10^{-4} \text{ Wb}$$

а по исчезнувањето магнетниот флуks станува еднаков на нула. Според тоа, при исчезнувањето на флуksот во спроводникот се индуцира електромоторна сила

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}$$

поради која низ спроводникот ќе протече струја :

$$I = \mathcal{E}_i / R$$

Количество електричество што ќе протече низ спроводникот ќе биде:

$$Q = Idt = -\frac{1}{R} \frac{d\phi}{dt} dt = -\frac{d\phi}{R} = \frac{\phi}{R} = \frac{10^{-4}}{1} = 10^{-4} \text{ C}.$$

8. Две хоризонтално поставени бакарни шини се наоѓаат на меѓусебно растојание од $l=20 \text{ cm}$, се поврзани со извор на електромоторна сила со $\mathcal{E}=0,8 \text{ V}$. Шипките се поставени во хомогено поле со магнетна индукција $B=1 \text{ T}$, насочено вертикално. По шините под дејството на Амперовата сила се движи праволиниски спроводник со брзина $v=2 \text{ m/s}$. Отпорот на спроводникот е $0,2 \Omega$. Да се определи индуцираната електромоторна сила $\mathcal{E}_i$ и јачината на струјата во контурата: ако спроводникот се движе (б) ако спроводникот мирувал.

Решение:

На краевите на спроводникот при негово движење во магнетно поле ќе се создаде индуцирана електромоторна сила:

$$|\mathcal{E}_i| = Blv = 0,4 \text{ V}$$

Јачината на струјата ќе ја определиме од законот за запазување на енергијата. Општата работа, извршена од изворот се троши како:

$$\mathcal{E} Id\phi = I^2 R dt + Id\phi$$

Или ако оваа равенка се реши по I , се добива:

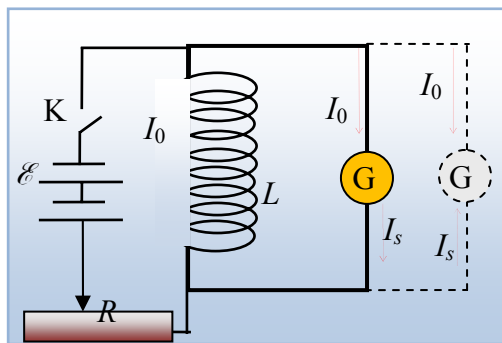
$$I = \frac{\mathcal{E} - Blv}{R} = 2 \text{ A}$$

Се покажува дека јачината на струјата при движењето на спроводникот под влијание на магнетното поле е помала, отколку при мирување на спроводникот, кога изнесува

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = 4 \text{ A}.$$

13.2 САМОИНДУКЦИЈА. ИНДУКТИВИТЕТ

Појавата електромагнетна индукција се јавува во сите случаи кога доаѓа до промена на магнетниот флуks што ја понижува дадената контура. Тоа може да е и магнетниот флуks кој се создава со самото течење на струјата низ контурата. Тоа значи дека при секое менување на јачината на струјата во која и да било контура, во самата се создава индуцирана електромоторна сила која предизвикува да потече дополнителна струја. Оваа појава се вика **самоиндукција**, а дополнителната струја предизвикана со неа, се вика *ексцита сѝруја на самоиндукцијата*.



Сл.13.10

Со експериментот прикажан на сликата 13.10 може да се демонстрира појавата самоиндукција. Калем со неколку илјади навивки е вклучен во струјно коло како на сликата. Паралелно со калемот L е вклучен и груб неосетлив галванометар.

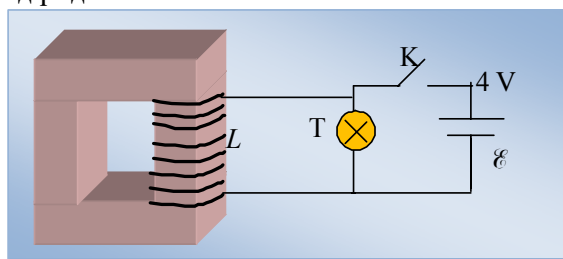
Ако струјното коло е затворено, струјата од изворот на електромоторна сила ($\mathcal{E}$) се

разгранува, па дел од неа врви низ галванометарот, а дел низ калемот. Ако се исклучи прекинувачот K , поради намалување на флуксот, во калемот ќе се јави екстра струја на самоиндукција I_s . Согласно Ленцовото правило, бидејќи причината за индуцирањето струја е намалувањето на флуксот, тогаш и самоиндуцираната струја низ калемот ќе биде во насоката на првобитната струја I_0 .

Обратно, при вклучувањето на прекинувачот K , струјата низ калемот расте од нула, па поради растечкиот флукс се јавува екстра струја што ќе помине и низ галванометарот. Сега нејзината насока е спротивна со насоката на првобитната струја (како што е прикажано на испрекинатиот дел од колото на сликата 13.10), но бидејќи вкупната струја е со иста насока како и првобитната струја, нејзиното присуство не може посебно да се покаже.

Експеримент

Ако во еден калем се постави железно јадро, тогаш екстра струјата на самоиндукција може многукратно се засили, па ако наместо галванометар се постави тлеечка ламба T (сл. 13.11) ќе дојде до нејзино палење при исклучување на прекинувачот K . Тлеечката ламба обично има многу поголем напон на палење, на пример 220 V, а батеријата што се користи како извор е од напон од 4 V, тоа значи дека самоиндуцираната ЕМС е од редот на големина на напонот на палење на тлеечката ламба.



Сл.13.11

Од што зависи ЕМС на самоиндукцијата?

Знаеме дека големината на магнетната индукција (густината на магнетниот флукс) во која и да било точка од полето секогаш е пропорционална со јачината на струјата што го создава

тоа поле. Според тоа, и магнетниот флукс ќе биде пропорционален со јачината на струјата:

$$\Phi = LI \quad (13.12)$$

Коефициентот на пропорционалноста L се вика **коэффициент на самоиндукција**, или почесто **индуктивност (индуктивитет)** на дадената контура. Од релацијава може да се дефинира оваа величина : *индуктивносѝ на една контура е бројно еднаква на магнетниот флукс шѝто го создава струја од еден ампер кога тече низ таа контура.* Индуктивноста на контурата е карактеристика врзана со геометријата на контурата и со нејзините димензии.

Единица за мерење на индуктивитетот е **хенри (Н)**. Тоа е индуктивитет на такава контура која создава магнетен флукс од 1 вебер кога низ неа тече струја од 1 ампер: $1\text{H}=1\text{Wb}/1\text{A}$.

Ако изразот (13.12) се замени во законот за електромагнетната индукција, за електромоторната сила на самоиндукцијата се добива:

$$\mathcal{E}_{\text{si}} = - \frac{d\Phi}{dt} = - L \frac{dI}{dt} \quad (13.13)$$

Електромоторната сила на самоиндукцијата е пропорционална со брзината на временската промена на јачината на струјата. Константата на пропорционалноста е индуктивност на дадената контура во која настанува временската промена на јачината на струјата.

Индуктивноста на дадена контура зависи од нејзините димензии, нејзината форма, а исто така и од својствата на околната средина.

13.2.1. Индуктивност на соленоид

Да претпоставуваме дека станува збор за долг соленоид, така што може да се смета дека неговата должина е многу поголема од неговиот дијаметар. Во случај, кога низ соленоидот тече струја може да се земе дека во неговата внатрешност полето е хомогено. Ги занемаруваме нехомогеностите на полето кои се јавуваат на неговите краеве. При таквата конфигурација, магнетната индукција во сите точки од внатрешноста на соленоидот е еднаква, т.е.

$$B = \mu_0 nI = \mu_0 \frac{NI}{l} , \quad (13.14)$$

каде што N е вкупниот број навивки, l должината на соленоидот, а I јачината на струјата што низ него тече. Ако A е плоштината на напречниот пресек на соленоидот, тогаш магнетниот флукс што ја пронижува една од навивките е:

$$\Phi_1 = BA = \mu_0 \frac{NI}{l} A \quad (13.15)$$

додека вкупниот флукс што ги пронижува сите N навивки е N пати поголем, т.е.

$$\Phi = \mu_0 \frac{N^2 A}{l} I \quad (13.16)$$

Ако оваа релација се спореди со (13.12), за индуктивноста на солениодот кој се наоѓа во вакуум (воздух) се добива:

$$L = \mu_0 \frac{N^2 A}{l} \quad (13.17)$$

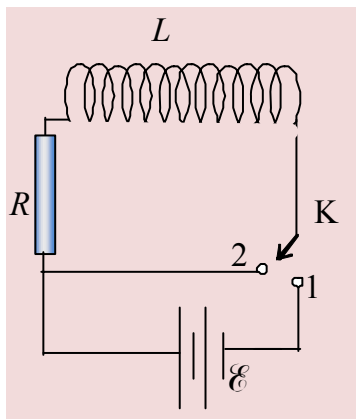
Преку релацијата (13.17) може да се види дека единицата со која се искажува магнетската константа μ_0 има димензија на магнетската константа е:

$$[\mu_0] = 1 \frac{\text{H}}{\text{m}}.$$

Експериментите потврдуваат дека индуктивноста на која и да било контура зависи уште и од средината во која се наоѓа. Ако наместо вакуум имаме некоја друга средина со релативна магнетска пермеабилност μ_r и ако индуктивноста во вакуум ја обележиме со L_0 , а во некоја средина со L , тогаш исто како и кај односот на магнетските индукции и овде $\frac{L}{L_0} = \mu_r$.

13.2.3. Самоиндукција при влучување и исклучување на струја

Екстра струја на самоиндукција се јавува секогаш кога во дадено коло доаѓа до промена на јачината на струјата. Тоа се случува и при вклучување и при исклучување на струјата. Притоа, со вклучувањето на струјата самоиндуцираната ЕМС се стреми да го намали растењето на струјата, па екстра струјата е насочена спротивно од струјата што се воспоставува, додека при исклучувањето, самоиндуцираната ЕМС се стреми да го намали опаѓањето на јачината на струјата па е затоа исто насочена како и струјата што постоела во струјното коло.



Сл.13.12

како на сликата 13.12.

Ако преклопникот K е во положбата 1, тогаш низ струјното коло потекува струја, а ако K се вклучи во положбата 2, тогаш изворот на ЕМС се исклучува и струјата се прекинува. Да видиме најпрво што

станува при прекинувањето. Нека во моментот пред прекинувањето низ колото тече струја I . При прекинувањето ќе се јави ЕМС на самоиндукцијата еднаква на $\left[-L \frac{dI}{dt}\right]$ која според II Кирхофово правило е еднаква на падот на напонот RI . Значи:

$$RI = -L \frac{dI}{dt} \quad \text{следува} \quad \frac{dI}{I} = -\frac{R}{L} dt \quad (13.18)$$

Ако ова равенство се интегрира, се добива дека $\ln I = -\frac{R}{L}t + C$, при што константата C се определува од почетниот услов дека при $t=0$ струјата $I=I_0$, па следува $C = \ln I_0$, или :

$$\ln I = -\frac{R}{L}t + \ln I_0 \quad ; \Rightarrow \quad \ln \frac{I}{I_0} = -\frac{R}{L}t \quad ; \quad \Rightarrow \quad \frac{I}{I_0} = e^{-\frac{R}{L}t} \quad (13.19)$$

Ако се воведе константа

$$\tau = L/R \quad (13.20)$$

тогаш за временската промена на струјата конечно се добива:

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (13.21)$$

Константата τ има димензии на време и се вика временска константа за дадената контура. Од последнава релација се гледа дека таа е, всушност, времето за кое првобитната струја ќе се намали е-пати (е-основа на природен логаритам). Колку е поголем индуктивитетот L на контурата, толку е тоа време подолго. Но, колку е поголем отпорот R , толку е покусо е времето τ .

Од равенката (13.21) следува дека кога $t \rightarrow \infty$ тогаш $I \rightarrow 0$. Но, всушност, исчезнувањето е релативно брзо.

Ако во истото струјно коло со префрлување на преклопникот во положбата 1 се вклучи струја, ќе дојде до растење на струјата. Повторно ќе го примениме II Кирхофово правило:

$$\mathcal{E} - L \frac{dI}{dt} = IR \quad (13.22)$$

Овде е R вкупниот отпор во колото вклучувајќи го и внатрешниот отпор на изворот. Од релацијата (13.22) може понатаму да се запише:

$$\frac{dI}{\mathcal{E} - IR} = \frac{dt}{L} \quad (13.23)$$

За да може равенкава полесно да се интегрира се множи лево и десно со $(-R)$ па се добива:

$$-\frac{d(IR)}{\mathcal{E} - IR} = -\frac{R}{L} dt \quad \text{што со интеграција дава}$$

$$\ln(\mathcal{E} - IR) = -\frac{R}{L}t + C \quad (13.24)$$

Ако во времето $t=0$ струјата $I=0$, тогаш следува дека константа $C = \ln \mathcal{E}$.

Со замена на (13.20) во (13.24), се добива:

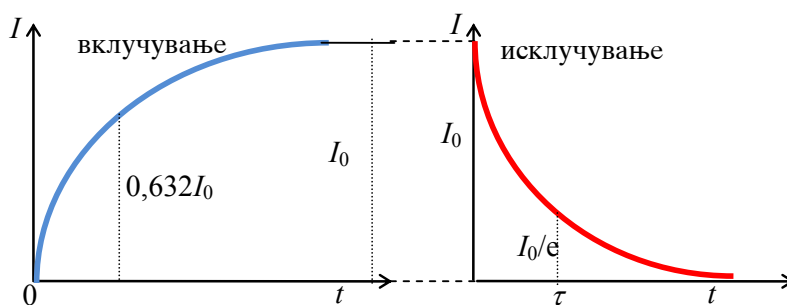
$$\ln \frac{(\mathcal{E} - IR)}{\mathcal{E}} = -\frac{t}{\tau}; \quad \frac{\mathcal{E} - IR}{\mathcal{E}} = e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad 1 - \frac{IR}{\mathcal{E}} = e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (13.25)$$

Ако $\mathcal{E}/R$ е максималната струја што се добила по воспоставувањето I_0 , тогаш релацијата (13.25) се сведува на

$$\frac{I}{I_0} = 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \text{или} \quad I = I_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \quad (13.26)$$

Гледаме дека и во оваа релација е важен факторот τ . Тоа е времето за кое струјата ја добива вредноста $I = I_0(1 - e^{-1}) = I_0 0,632$, т.е. времето за кое струјата ќе постигне 0,632 дел од максималната струја I_0 .

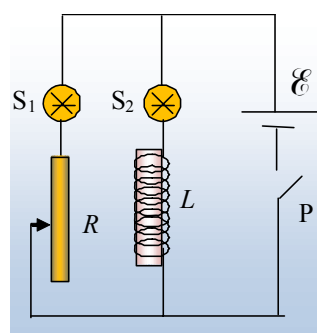
На сликата 13.13 се дадени графичките прикази на зависностите (13.26) и (13.21).



Сл.13.13

Експеримент

Влијанието на индуктивноста на една контура врз брзината на воспоставувањето на струјата и нејзиното прекинување може да се демонстрира со опит чија што шема е дадена на сликата 13.14. Тоа се две светилки со иста моќност, врзани паралелно со извор на ЕМС, само што едната е врзана преку отпорник R , а другата преку калем L . Направено е така што отпорите во двете гранки се еднакви. Инаку, индуктивноста на калемот L е неколку десетици хенри.



Сл.13.14

При вклучување на струјата, светилката S_1 почнува прва да свети, додека светилката S_2 светењето во полн сјај го постигнува нешто подоцна. При прекинувањето, пак светилката S_2 останува да свети нешто подолго.

Кај некои уреди е потребно да се одбегнат струите на самоиндукцијата. Така за да се одбегне влијанието на индуктивноста, жиците кај жичаните отпорници се мотаат бифиларно (сл. 13.15). Магнетното поле на вака мотаниот калем, всушност отпорник е еднакво на нула, па и индуктивитетот е $L=0$. Вакво мотање се прави и кај некои други уреди каде што е потребно да се одбегне самоиндукцијата.

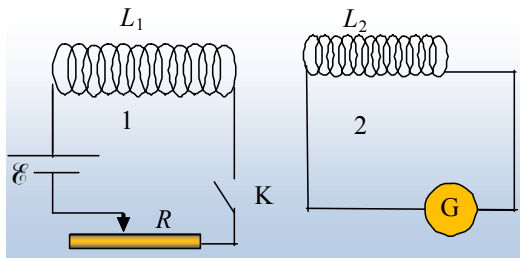


Сл.13.15

13.3. ЗАЕМНА ИНДУКЦИЈА

Појавата електромагнетна индукција укажува на фактот дека ако постои спроводник низ којшто тече променлива струја, тогаш ќе се индуцира ЕМС во секоја контура што ќе се најде во неговата околина. Заемното влијание помеѓу две контури се јавува поради појава на индуцирано електрично поле, па затоа се вели дека таквите две контури се магнетно спрегнати.

Кај магнетно спрегнати контури се јавува појавата заемна (меѓусебна) индукција. На сликата 13.16 дадени се две такви контури. Во колото (1) -примарно се создава магнетен флуks Φ_1 , даден со:



Сл.13.16

$$\Phi_1 = B_1 A_1 = \mu_0 A_1 \frac{N_1}{l_1} I_1 \quad (13.27)$$

од каде што е јасно дека е

$$\Phi_1 \sim I_1$$

Така, може да се запише:

$$\Phi_1 = \alpha I_1 \quad (13.28)$$

Создадениот флуks делумно врви и низ навивката 2, па е:

$$\Phi_2 = C \Phi_1 \quad (13.29)$$

Коефициентот C зависи од меѓусебната положба, формата и големина-та на калемите. Тој според својата големина има вредности меѓу 0 и 1 :

$$0 \leq C \leq 1$$

Ако C еднакво на 1 тогаш целиот флуks го пронижува и вториот калем. Имајќи предвид (13.28) и (13.29) магнетниот флуks

$$\Phi_2 = \alpha C_1 I_1 = L_{12} I_1 \quad (13.30)$$

каде што $L_{12} = \alpha C_1$ е **коефициент на меѓусебна индукција**. Тој зависи од геометриската форма, големината, меѓусебната положба, како и од магнетната пермеабилност на супстанцијата во кој се наоѓаат калемите.

Ако изворот на ЕМС сега се поврзе во колото 2, флуksот во првиот калем би бил :

$$\Phi_1 = L_{21} I_2 \quad (13.31)$$

За иста меѓусебна положба на калемите, во неферромагнетична средина коефициентите на заемната индукција се исти и еднакви на M :

$$L_{12} = L_{21} = M \quad (13.32)$$

Ако јачината на струјата I_1 се менува, тогаш во вториот калем се создава ЕМС на заемна индукција :

$$\mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{d\Phi_2}{dt} = -\frac{d(MI_1)}{dt} = -M \frac{dI_1}{dt} \quad (13.33)$$

Сосема аналогно и во колото 1, ако I_2 се менува се индуцира ЕМС на меѓусебна индукција:

$$\mathcal{E}_1 = -M \frac{dI_2}{dt} \quad (13.34)$$

Ако 1 и 2 се наоѓаат во *ферромагнетична средина*, тогаш L_{12} и L_{21} зависат од јачините на струите I_1 и I_2 . Во тој случај за индуцираната електромоторна сила имаме:

$$\mathcal{E}_2 = -N_2 \frac{d\Phi_2}{dt} \quad ; \quad \mathcal{E}_1 = -L_{12} \frac{dI_1}{dt} \quad . \quad (13.35)$$

За заемната индукција може да се запише:

$$L_{12} = \frac{-\mathcal{E}_2}{\frac{dI_1}{dt}} = \frac{-\left(-N_2 \frac{d\Phi_2}{dt}\right)}{\frac{dI_1}{dt}} = N_2 \frac{d\Phi_2}{dI_1} \quad . \quad (13.36)$$

Коефициентот на заемната индукција, $L_{12} = L_{21}$ и M е величина која има иста димензијаа како и индуктивитетот L . И тој се мери во единицата хенри (Н). Коефициент на меѓусебна индукција на две кола е еднаков на 1 хенри ако во едното од колата се индуцира ЕМС од еден волт, кога во другото коло струјата се менува за еден ампер во секунда. За голем број кола, еден хенри е многу голема единица, па почесто се користат mH, μ H, nH.

Пример 1

Да се најде коефициентот на меѓусебна индукција на два коааксијални калема. Примарот има N_1 навивки и пресек A , а секундарот има скоро ист пресек како и примарот, но бројот на навивките му е N_2 .

Бидејќи магнетниот флуks на првиот калем сосема го понижува вториот, тогаш ќе биде:

$$\Phi_2 = \Phi_1 = \mu_0 A \frac{N_1}{l} I_1 \quad (13.37)$$

а бидејќи :

$$L_{12} = N_2 \frac{d\Phi_2}{dI_1} \quad (13.38)$$

а со користење на (13.37) се добива дека $\frac{d\Phi_2}{dI_1} = \mu_0 A \frac{N_1}{l}$. Тогаш последнава равенка поминува во:

$$L_{12} = \mu_0 N_1 N_2 \frac{A}{l} \quad (13.39)$$

Во случај кога во внатрешноста на калемите постои јадро од супстанција со магнетска пермеабилност μ_r , бидејќи магнетскиот флукс се зголемува μ_r пати, толку пати ќе се зголеми и коефициентот на меѓусебната индукција.

$$L_{12} = \mu_r \mu_0 N_1 N_2 \frac{A}{l}$$

13.4. ЕНЕРГИЈА НА МАГНЕТНО ПОЛЕ. ГУСТИНА НА ЕНЕРГИЈАТА

Магнетното поле како и електричното има некоја енергија.

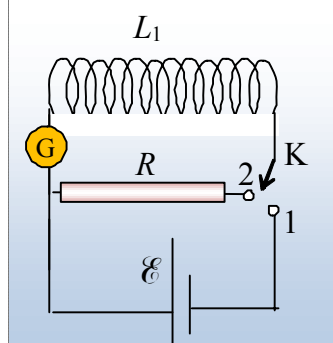
Експеримент

Дека магнетното поле има енергија можеме да се убедиме со експериментот скициран на сликата 13.17. Додека прекинувачот К е во положба 1 низ колото тече струја која во соленоидот создава магнетно поле. Од моментот на префрлувањето во положба 2, изворот на ЕМС е исклучен, меѓутоа струјата продолжува да тече уште некое време, паѓајќи експоненцијално како што тоа беше прикажано на сликата 13.13. Тоа укажува дека во колото постоела некоја енергија.

Со опаѓањето на струјата, се намалува магнетната индукција низ соленоидот, т.е. опаѓа магнетниот флукс, поради што се индуцира ЕМС на самоиндукцијата :

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt} \quad (13.40)$$

која што го спречува опаѓањето на струјата. Работата што за време dt ја врши оваа струја е еднаква на :



Сл.13.17

$$dW = \mathcal{E}_s dQ = \mathcal{E}_s Idt = -L \frac{dI}{dt} Idt = -LI dI \quad (13.41)$$

Ако оваа равенка се интегрира, при што треба да се има предвид дека струјата се менува од I до 0, се добива:

$$W = -\int_I^0 LI dI = \frac{LI^2}{2} \quad (13.42)$$

Оваа работа се троши за зголемување на внатрешната енергија на спроводниците, т.е. за нивно загревање.

Оваа работа се врши како резултат на исчезнувањето на магнетното поле што постоело во соленоидот и околу него. Бидејќи никакви други промени во околината не настануваат, треба да се заклучи дека магнетното поле е носител на енергијата за чија сметка се врши оваа работа. Тоа значи дека контура со индуктивитет L низ која тече струја со јачина I има енергија U_m еднаква на :

$$U_m = \frac{LI^2}{2} \quad (13.43)$$

Да претпоставиме дека енергијата се добива во еден калем со индуктивитет L . Тогаш изразот $U_m = \frac{LI^2}{2}$, може да се прикаже и

поинаку. Бидејќи $L = \mu_r \mu_0 \frac{N^2 A}{l}$, се добива

$$U_m = \mu_r \mu_0 \frac{N^2 A}{2l} I^2 \quad (13.44)$$

Со оглед на тоа што магнетната индукција на соленоид е дадена со $B = \mu_r \mu_0 \frac{N}{l} I$, ако релацијата (13.44), се помножи и подели со $\mu_r \mu_0 l$ за магнетна енергија на соленоид ќе се добие:

$$U_m = \frac{B^2}{2\mu_r \mu_0} Al \quad (13.45)$$

каде што производот Al е всушност волумен на соленоидот, или поточно волумен на просторот во кој е полето хомогено и дадено до магнетската индукција B . Ако не интересира густина на енергијата, дефинирана како енергија на единица волумен, тогаш се добива релацијата:

$$\Omega_m = \frac{U_m}{Al} = \frac{B^2}{2\mu_r \mu_0} \quad (13.46)$$

Оваа релација може да се искаже преку големината на векторот на јачината на магнетното поле H , кој е со магнетната индукција поврзан

со релацијата $B = \mu_r \mu_0 H$. Оттука $H = \frac{B}{\mu_r \mu_0}$ па за густината на енергијата се добива:

$$\Omega_m = \frac{B^2}{2\mu_r \mu_0} = \frac{\mu_r \mu_0 H^2}{2} \quad (13.47)$$

Релацијата (13.47) е многу слична со равенката 4. 42 за густината на електричното поле, што беше дадена со:

$$\Omega_e = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 E^2}{2} \quad (13.48)$$

Ако магнетното поле не е хомогено, а се знае зависноста на густината на енергија од местоположбата, тогаш вкупната енергија на магнетното поле се добива со решавање на волуменскиот интеграл:

$$U_m = \int_V \Omega_m d\tau = \int_V \frac{B^2}{2\mu_r \mu_0} d\tau \quad (13.49)$$

13.5. ВРТЛОЖНИ (ФУКООВИ) СТРУИ

Ако во едно променливо магнетно поле се најде некој масивен спроводник, тогаш во него се индуцираат затворени струи кои, како што ќе покажеме подоцна, се последица на вртложни електрични полиња.

Бидејќи електричното поле $\vec{E}$ е затворено, неговите силиви линии се затворени во внатрешноста на спроводникот, па затоа и струите кои се предизвикуваат со таквото поле се викаат *вртложни струи*. Вртложните струи имаат густина која според Омовиот закон е определена со релацијата:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (13.50)$$

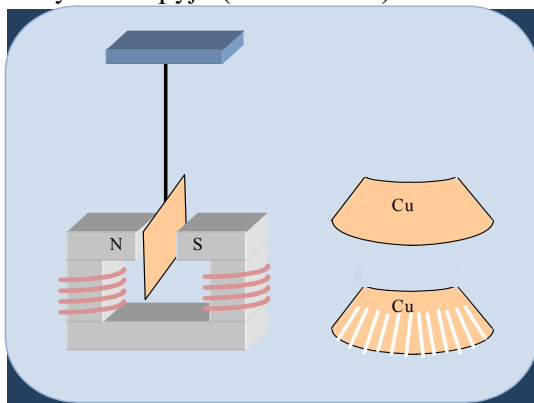
каде што σ е специфична спроводливост на дадениот масивен спроводник, $\vec{E}$ јачината на електричното поле, а $\vec{j}$ густина на струјата.

Вртложните струи предизвикуваат загревање на спроводникот во кој се индуцираат. Ако во внатрешноста на калем со променлива струја се постави еден спроводник, на пример диск, поставен нормално на оската на соленоидот, поради вртложните струи што ќе потечат во него тој може да се загрее до висока температура и да се растопи. Овој ефект се користи во техниката, кај индукционите металуршки печки, кои служат за топење на металите и подготовка на различни видови легури.

Вртложните струи се јавуваат и тогаш кога еден масивен спроводник се движи во магнетно поле. Таквиот ефект се јавува кај т.н. Валтенхофеново нишало.

Валтенхофеновото нишало претставува масивна бакарна плоча која може слободно да се ниша околу хоризонтална оска. Всушност, тоа претставува физичко нишало, со определен период на осцилирање.

Нишалото е поставено така, што при нишањето бакарната плоча поминува помеѓу половите на даден електромагнет низ којшто може да се пушта струја (слика 13.18).



Сл.13.18. Валтенхофеново нишало.

Ако бакарната плоча ја изместиме од рамнотежната положба, нишалото ќе започне слободно да осцилира.

Меѓутоа, ако се пушти да тече струја низ електромагнетот, тогаш ќе дојде до нагло придушување на осцилациите на нишалото. Ако се обидеме со рака да го придвижуваме нишалото, ќе почувствуваме отпор, како нишалото да поминува низ некоја вискозна течност.

Толкувањето е едноставно. Кога плочата се движи низ магнетното поле во неа се индуцираат Фукоови струи, кои при навлегување на плочката меѓу половите, кога доаѓа до растење до магнетниот флукс, создаваат магнетно поле што се спротивставува на растењето на флуксот, значи се спротиставува на навлегувањето на плочката. Во моментот кога плочката излегува надвор од полето, доаѓа до намалување на магнетниот флукс, па индуцираните струи, стремејќи се да ја намалат причината за нивното создавање, сега се стремат плочката да ја задржат меѓу половите.

Потоа експериментот се повторува со парче бакарна плоча која е пресечена на повеќе места. Придушувањето е многу послабо. Вртложните струи сега се многу послаби. Колку е еден спроводник помасивен толку се вртложните струи појаки. Во масивни спроводници вртложните струи може да имаат многу голема јачина.

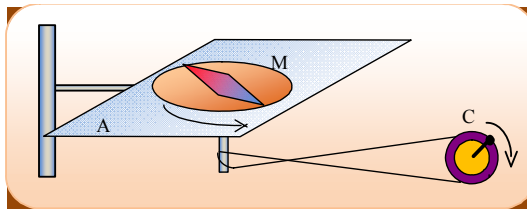
Како последица на појавата на вртложни струи, ако во магнетното поле на силен електромагнет се пушти да паѓа паричка, таа ќе се забавува.

Експеримент на Араго

Еден интересен и историски важен експеримент е **Арагоовиот експеримент**.

Еден бакарен диск М се врти со помош на центрифугална

машина С (слика 13.19). Ако коаксијално над дискот се постави магнетна игла, таа ќе почне да ротира **во истата насока** со дискот. Иглата, може да биде обесена или поставен врз стаклена плоча А, непосредно над дискот. И



Сл. 13.19

тука објаснението е преку универзалното Ленцово правило. Имено, причина за индуцирање на струја во масивниот бакарен диск е релативната ротација на дискот во однос на иглата. За да се намали таа ротација во дискот се индуцираат такви струи чии магнетни полиња се стремат да ја намалат релативната ротација меѓу дискот и магнетната игла.



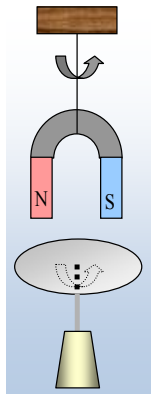
Рингла од шпорет на индукционен принцип. Низ бакарната жица што е намотана во спирала се пушта да тече периодично променлива струја што создава променливо магнетно поле, кое во бакарната жица се претвора во топлина.

Фукоовите струи, се употребуваат кај индукционите печки за топење на метали во металургијата. Во поново време се произведуваат и шпорети за домаќинствата со индуктивно загревање. Освен кај индукционите печки, вртложните струи се користат кај низа уреди во науката и техниката. Во електричните мотори, низата мерни инструменти (броила, тахометри и др) се користат Фукоовите струи. Но, понекогаш Фукоовите струи се штетни. Таков е случајот кај трансформаторот, за што ќе стане збор подоцна.

ПРАШАЊА И ПРОБЛЕМИ

1. Како ќе објасните зошто при брзо исклучување на некој потрошувач на струја помеѓу штеќерот и утикачот прескокнува искра?
2. Колку ќе се промени индуктивноста на еден соленидот ако соленидот го растегнеме така што неговата должина стане 1,3 пати поголема? (Да се занемари намалувањето на напречниот пресек)

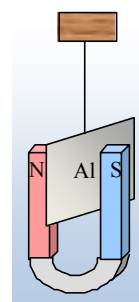
3. За колку ќе се промени индуктивноста на еден калем со внесувањето на железно јадро со магнетска пермеабилност $\mu_r=1000$?



Сл.13.20

4. Направете го следниов опит. Од алуминиумска фолија исечете кружен диск. Поставете вертикално игла, а врз неа ставете го дискот така што да биде потпрен во центарот на кругот (видете слика 13.20). Земете каков било магнет (најдобро е потковичест) и обесете го така што половите да му лежат над дискот. Потоа, завртете го магнетот. Во иста насока со магнетот ќе се заврти и кружниот алуминиумски диск. Објаснете го експериментот!

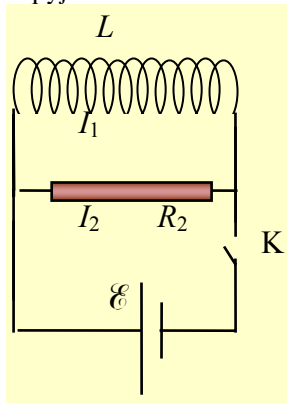
5. Обесете на конец правоаголна алуминиумска плочка (направете ја од подебела фолија). Поставете ја плочката помеѓу половите на посилен магнет (сл. 13.21). Ако магнетот го движите и плочката ќе се придвижи во иста насока. Зошто?



Сл.13.21

Пример задачи

6. Калем со отпор $R_1=5\ \Omega$ и индуктивитет $L=6\ \text{mH}$ е поврзан во струјно коло како на сликата 13.22, паралелно со отпорникот $R_2=25\ \Omega$. Кога струјата тече низ колото $I_2=0,4\ \text{A}$. Внатрешниот отпор на изворот $r=0,83\ \Omega$. Да се најде:
- Полнежот што протекува низ калемот кога ЕМС на изворот ќе се исклучи.
 - ЕМС на самоиндукцијата во функција од времето по прекинувањето на струјата



Сл.13.22

Решение

а) Според (13.21) низ калемот низ кој тече струја I_1 по прекинувањето ќе протече струја која се менува експоненцијално:

$$I = I_1 e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Струјата I_1 ќе ја најдеме од изразот:

$$I_2 R_2 = I_1 R_1 \text{ следува} \quad I_1 = \frac{R_2}{R_1} I_2.$$

Константата τ е:

$$\tau = \frac{L}{R},$$

каде што

$$R = R_1 + R_2$$

бидејќи по прекилот струјата тече само низ гранките. Полнежот Q ќе го добиеме со решавање на интегралот:

$$Q = I_1 \int_0^{\infty} e^{-\frac{t}{\tau}} dt = I_1 \tau = \frac{R_2}{R_1} I_2 \frac{L}{R} = \frac{25}{5} 0,4 \frac{6 \cdot 10^{-3}}{(25+5)} \approx 4 \cdot 10^{-4} \text{ C.}$$

б) При прекинувањето на струјата дошло и до промена на отпорот. Имено отпорот R_0 кој владеел претходно сега станува R .

Самоиндуцираната ЕМС станува еднаква на падот на напонот IR

$$-L \frac{dI}{dt} = IR$$

Бидејќи при $t=0$ струјата $I = I_0 = \mathcal{E}/R_0$ струјата е

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (*)$$

а отпорот R_0 е

$$R_0 = r + R_p \text{ каде што } R_p = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, R_0 = 5 \Omega.$$

Константата τ се добива од:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{L}{R_1 + R_2}. (**)$$

Ако релацијата (*) се диференцира по времето, се добива:

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{I_0}{\tau} e^{-t/\tau}$$

Саминдуцираната ЕМС ќе биде:

$$\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt} = -L \frac{I_0}{\tau} e^{-t/\tau} = -L \frac{\mathcal{E}}{R_0 \tau} e^{-t/\tau}.$$

Со внесување на (**) се добива:

$$\mathcal{E}_s = -\frac{R}{R_0} \mathcal{E} e^{-t/\tau}$$

или:

$$\frac{\mathcal{E}_s}{\mathcal{E}} = -\frac{R}{R_0} e^{-t/\tau}. (***)$$

Да ја определиме прво ЕМС ($\mathcal{E}$) се користиме со:

$$I = I_1 + I_2 = I_2 \left[1 + \frac{R_2}{R_1} \right]$$

$$\mathcal{E} = Ir + I_2 R_2 = I_2 \left[1 + \frac{R_2}{R_1} \right] r + I_2 R_2 = 0,4 [(1+5)0,83 + 25] = 12 \text{ V}$$

Со оглед на (***) за $\mathcal{E}_s$ се добива

$$\mathcal{E}_s = -\frac{30}{5} \mathcal{E} e^{t/\tau} = 6\mathcal{E} e^{t/\tau} \quad \text{или} \quad \mathcal{E}_s = 72 \cdot e^{t/\tau} \quad \text{каде што}$$

$$\tau = \frac{L}{R_1 + R_2} = \frac{6 \cdot 10^{-3}}{30} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ s.}$$

ЕМС на самоиндукцијата, во моментот на прекилот на струјното коло 6 пати е поголема од ЕМС на изворот.

7. На електричен извор со внатрешен отпор $r=2 \Omega$ е приклучен соленоид со отпор $R = 8 \Omega$ и индуктивитет $L = 0,05 \text{ H}$. Определете го времето за коешто струјата ќе достигне половина од нејзината максимална големина.

Решение:

$$I = I_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) ; \quad \tau = \frac{L}{R} = \frac{0,05}{R+r} = \frac{0,05}{10} = 0,005 \text{ s}$$

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{2} ; \quad \frac{1}{2} = \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) = 1 - e^{-t/0,005}$$

од каде за времето t се добива:

$$t = \ln 2 \cdot 0,005 = 3,46 \cdot 10^{-4} \text{ s}$$

8. а) Определете ја енергијата на магнетното поле на калем со $N=250$ навивки, ако неговата должина е 12 cm , напречниот пресек е со форма на квадрат со страница 6 cm и низ калемот тече струја од 5 A .

б) Колкава е енергијата на магнетното поле ако во калемот се внесе јадро со релативна магнетска пермеабилност 1000 ?

Решение:

Прво треба да се определи индуктивноста на калемот. Таа за калем во воздух е дадена со релацијата:

$$L = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{250^2 \cdot 0,06^2}{0,12} = 23,6 \mu\text{H}$$

Енергијата ќе биде:

$$W_m = \frac{LI^2}{2} = \frac{23,6 \cdot 10^{-6} \cdot 5^2}{2} = 295 \cdot 10^{-6} \text{ J}$$

б) Со внесувањето на јадро со магнетска пермеабилност $\mu_r=1000$, енергијата на магнетното поле ќе биде:

$$W_m = \frac{L_1 I^2}{2} = \frac{\mu_r L I^2}{2} = 295 \cdot 10^{-3} \text{ J.}$$