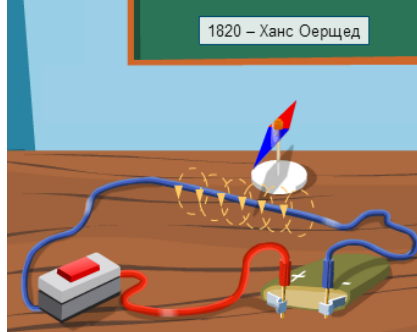


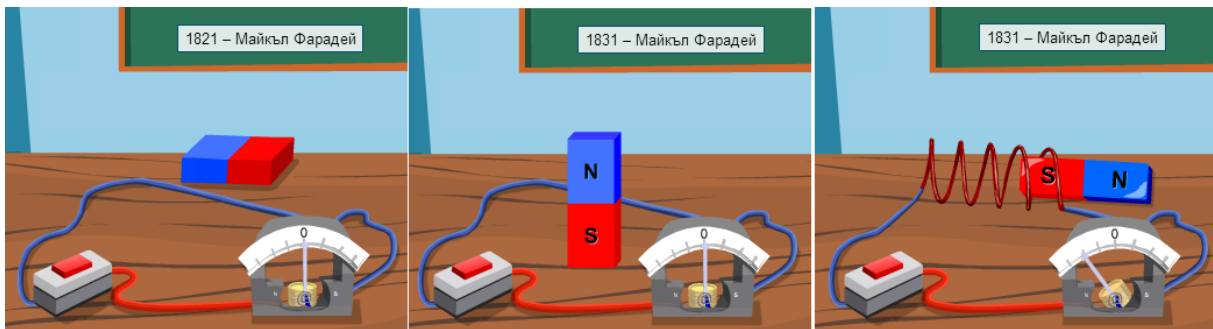
10. ЕЛЕКТРОМАГНИТНА ИНДУКЦИЯ

Опитът на Ханс Оерстед през 1820г. показва, че електричният ток, протичащ по проводник, създава магнитно поле, т.е. електричеството може да бъде източник на магнетизъм.



Може ли обаче магнетизмът да бъде източник на електричество?

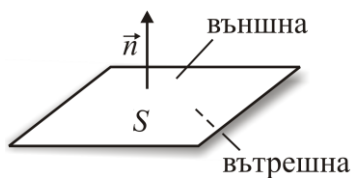
Английският физик Майкъл Фарадей, който е убеден в „единството на природните сили“, стига до извода, че трябва да съществува и обратното явление – *магнитното поле да предизвиква протичане на електричен ток*. Така въз основа на тези разсъждения и провеждането на серия от експериментални опити през 1831 г. Фарадей открива явлението електромагнитна индукция, което показва неразривната връзка между електричното и магнитно поле.



За да разгледаме това явление, трябва да въведем физичната величина магнитен поток.

1. Магнитен поток

Най-напред ще дефинираме понятията ориентирана повърхност и лицев вектор.

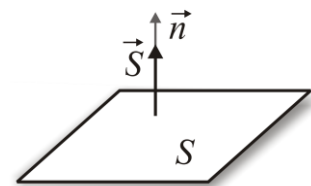


Повърхност, за която е указана нормалата \vec{n} ($|\vec{n}|=1$, единичен вектор, перпендикулярен на повърхността), се нарича **ориентирана повърхност**. Тази страна на повърхността, от която излиза нормалата \vec{n} се нарича **външна**, а тази, в която влиза – **вътрешна**.

Лицевият вектор \vec{S} има големина, равна на площта на повърхнинния елемент S и е насочен по нормалата \vec{n} към равнината:

$$\vec{S} = S \vec{n} .$$

(1)

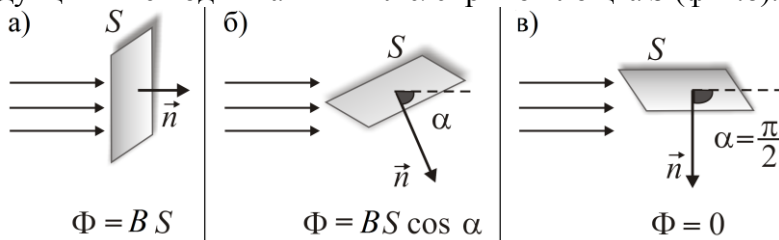


Магнитният поток през площ S се дефинира като скалярно произведение на векторите \vec{B} и \vec{S} :

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B S \cos(\vec{B}, \vec{S}). \quad (2)$$

Магнитният поток може да има положителна или отрицателна стойност. Когато посоките на векторите \vec{B} и \vec{n} са противоположни, т.е. когато индукционните линии на магнитното поле прободат площта S от външната към вътрешната страна, то магнитният поток е отрицателен. Когато двата вектора \vec{B} и \vec{n} са в една посока, то магнитният поток е положителен.

Магнитният поток Φ е максимален, когато магнитната индукция \vec{B} е перпендикулярна на площта S , т. е. $\cos(\vec{B}, \vec{S}) = \cos 0^\circ = 1$ (фиг.а). Магнитният поток е нула, когато магнитната индукция \vec{B} е успоредна на площта S , т. е. $\cos(\vec{B}, \vec{S}) = \cos 90^\circ = 0$ (фиг.в). Магнитният поток има междинни стойности, когато магнитната индукция \vec{B} е под някакъв ъгъл α спрямо площта S (фиг.б).



Ако при постоянна площ S увеличаваме магнитната индукция \vec{B} , то ще се увеличи гъстотата на индукционните линии през площта S . Ако при постоянна магнитната индукция \vec{B} увеличаваме площта S , то броят на индукционните линии също ще нарастне. Тогава може да се даде и следното определение:

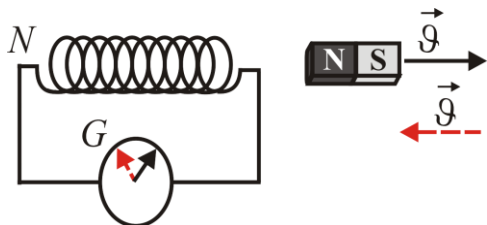
Магнитният поток Φ през повърхност с площ S е пропорционален на броя на индукционните линии, които я прободат.

Единицата за магнитен поток се нарича Вебер (Wb) и се въвежда от уравнение (2):

Един вебер (1Wb) е потокът на хомогенно магнитно поле с индукция $B = 1\text{T}$ през повърхност с площ $S = 1\text{m}^2$, поставена перпендикулярно на индукционните линии.

2. Опити на Фарадей

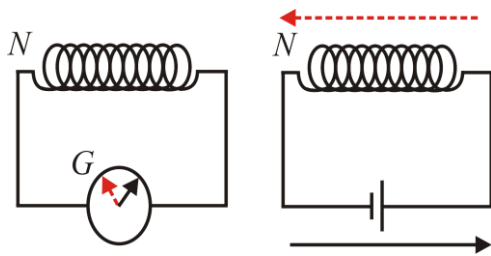
Проведените от Фарадей множество експерименти, чрез които се открива явлението електромагнитна индукция, могат да се обобщат в следните основни опита:



а) първи опит

Ако във веригата на една намотка N се включи чувствителен галванометър G и към нея бързо се приближи или отдалечи постоянен магнит, то в намотката ще протече краткотраен електричен ток (наречен индуциран) и ще се наблюдава отклонение на стрелката на галванометъра. Стрелката на галванометъра се отклонява наляво или надясно в зависимост от посоката на движение на магнита (посоката на скоростта на движението му \vec{v}). Ток не тече, ако магнитът е неподвижен. Установено е, че отклонението на

стрелката е толкова по-голямо, колкото по-голяма е скоростта на движение на магнита спрямо намотката.

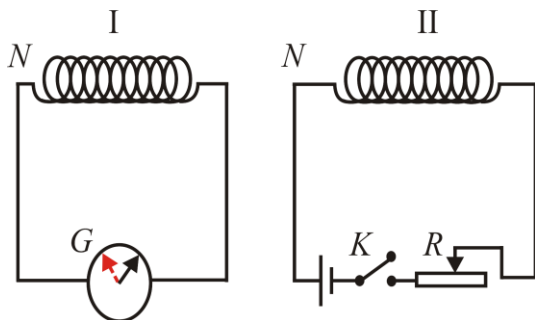


б) втори опит

Постоянният магнит от опит I се заменя с електромагнит - втора намотка, по която тече електричен ток. Получени били същите резултати – относителното движение на двете намотки една спрямо друга предизвикват протичане на индуциран ток.

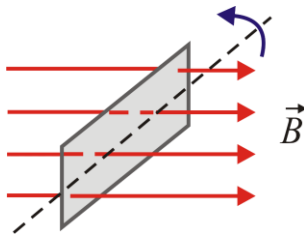
в) трети опит

Постоянен магнит се заменя с втора неподвижна намотка, включена чрез ключ към променливо съпротивление R и батерия.



Стрелката на галванометъра G на намотка I се отклонява в ляво или в дясно, ако:

- се включва или изключва ключът K на втората намотка (II);
- се намалява или увеличава токът във втората намотка (II), чрез реостата R при затворен ключ K . При по-голяма скорост на изменение на R , отклонението на галванометъра G е по-голямо.



г) четвърти опит

При равномерно въртене на рамка в магнитно поле се индуцира електродвижещо напрежение (ЕДН), което се изменя по хармоничен закон. Фарадей установява, че индуцираният ток се дължи на изменящия се поток на магнитната индукция.

3. Закон на Фарадей

Чрез обобщаване на резултатите от многобройните си опити Фарадей установява, че индуцираният ток възниква винаги, когато се изменя свързаният с проводящия контур поток на магнитната индукция. Опитно е установено, че големината на индуцирания ток не зависи от начина, по който се изменя потокът на магнитната индукция, а се определя само от скоростта на изменението му.

Така Фарадей извежда **закона за електромагнитната индукция**, който в негова чест е наречен **закон на Фарадей**.

Всяка промяна на магнитния поток с времето през площта на даден затворен неподвижен проводник (контур) е свързана с възникването в проводника на индуциран електричен ток (индуцирано електродвижещо напрежение):

$$\mathcal{E}_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} . \quad (3)$$

В уравнение (3) $\Delta\Phi$ е изменението на магнитния поток за интервал от време Δt .

Знакът „минус“ показва, че при нарастване на магнитния поток $\left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0\right)$ индуцираното ЕДН е отрицателно ($\mathcal{E}_i < 0$), т.е. полето на индуцирания ток е насочено противоположно на създаващото го поле;

При намаляване на магнитния поток $\left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0\right)$ индуцираното ЕДН е положително ($\mathcal{E}_i > 0$), т.е. полето на индуцирания ток е насочено по посока на създаващото го поле.

Знакът „минус“ е математичен израз на правилото на Ленц, обяснено в следващата точка 4.

Протичането на индуциран ток показва, че при електромагнитната индукция възниква електродвижещо напрежение, наречено индуцирано електродвижещо напрежение. Опитно е показано, че индуцираният ток I_i в намотка със съпротивление R и индуцираното електродвижещо напрежение \mathcal{E}_i са свързани със закона на Ом:

$$I_i = \frac{\mathcal{E}_i}{R} = -\frac{1}{R} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (4)$$

Силата на индуцирания ток се увеличава с увеличението на скоростта, с която приближаваме магнит към намотката или го отдалечаваме от нея. Силата на индуцирания ток също така ще бъде по-голяма, ако използваме по-силен магнит и когато намотката има повече навивки.

Когато магнитната индукция не се променя и площта, затворена от проводниковия контур, не се променя, то индуцираното ЕДН е пропорционално на скоростта на изменението на ъгъла α между магнитната индукция и площта, както и от техните големина.

$$\mathcal{E}_i = -\frac{SB\Delta \cos \alpha}{\Delta t}$$

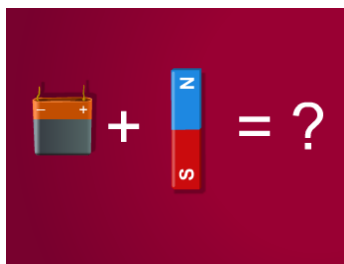
Когато магнитната индукция B не се променя и ъгълът α между магнитната индукция и площта не се променя, то индуцираното ЕДН \mathcal{E}_i е пропорционално на скоростта на изменението на площта, затворена от проводниковия контур и на големината на магнитната индукция и ъгъла α .

$$\mathcal{E}_i = -\frac{B\Delta S}{\Delta t} \cdot \cos \alpha$$

Когато площта S , затворена от проводниковия контур, не се променя и ъгълът α между магнитната индукция и площта не се променя, то индуцираното ЕДН е пропорционално на скоростта на изменението на магнитната индукция и на големината на площта и ъгъла α .

$$\mathcal{E}_i = -\frac{S\Delta B}{\Delta t} \cdot \cos \alpha$$

Каква е връзката между електричество и магнетизъм?



Неподвижен магнит не предизвиква протичане на ток в неподвижен проводник точно както и неподвижен електричен заряд не създава магнитно поле. Движението на магнита спрямо проводника предизвиква протичане на ток в проводника точно както движението на заряди в проводника създава магнитно поле.

4. Правило на Ленц

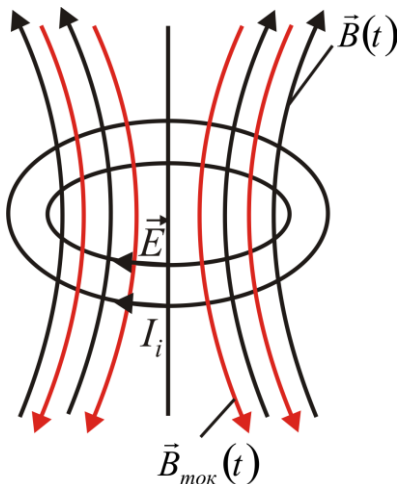
Руският физик Хайнрих Ленц установява общо правило, което позволява да се определи посоката на индуцирания ток. Изразява се със знака „минус“.

Посоката на индуцирания ток в затворен проводников контур е такава, че магнитното поле, създадено от него се стреми да компенсира измененията на външното магнитно поле, т.е. да компенсира причината, която го възбужда.

Потокут на индукцията на външното магнитно поле се изменя с времето:
 $\Delta\Phi = \frac{d(\vec{B} \cdot \vec{S})}{dt}$, като са възможни два случая, показани на фигурите по-долу.

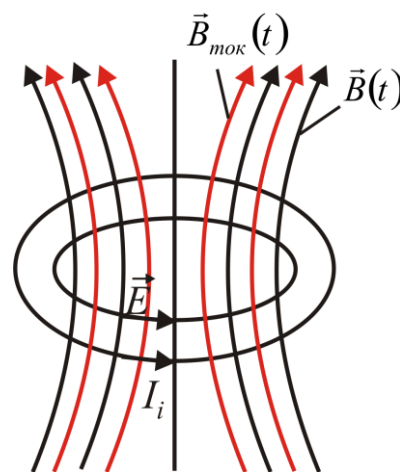
1) потокът нараства с времето

$$\left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0 \right)$$



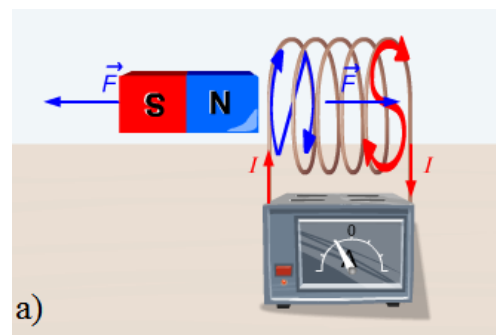
2) потокът намалява с времето

$$\left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0 \right)$$



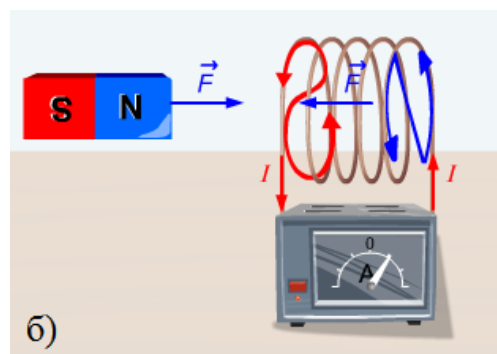
Системата проводници противодейства на външното въздействие на магнитното поле ($\Delta\Phi$), като чрез индуцирания ток I_i , създава магнитно поле $\vec{B}_{ток}(t)$ с поток ($\Delta\Phi_{ток}$). Магнитният поток $\Delta\Phi$ се компенсира от потока $\Delta\Phi_{ток}$.

а) Когато приближаваме северния полюс N на постоянен магнит към соленоид, свързан с амперметър, индуцираният ток ще започне да тече в такава посока, че северният полюс на соленоида ще е от страната на приближавания магнит. В резултат на това полето, създадено от индуцирания ток, ще се противопостави на движението на магнита и ще се стреми да го отдалечи от намотката.



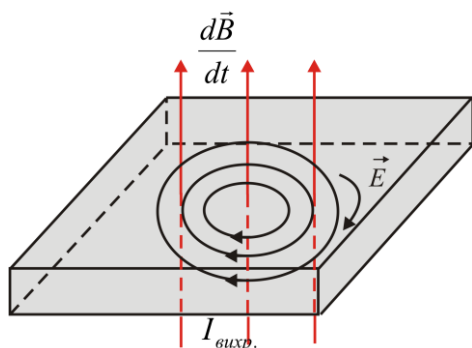
а)

б) Когато отдалечаваме северния полюс N на постоянен магнит от соленоида, свързан с амперметър, индуцираният ток ще започне да тече в обратна посока. Магнитното поле, създадено от индуцирания ток, също ще се противопостави на движението на магнита и ще се стреми да го привлече към намотката.



Аналогична ситуация ще се наблюдава, ако приближаваме и отдалечаваме към соленоида южния полюс S на соленоида.

5. Вихрови токове



Ако в масивен проводник се създаде изменящо се с времето магнитно поле, то в проводника протичат индуцирани токове, които се затварят във вътрешността на проводника и затова се наричат **вихрови токове** (наричат се също и **токове на Фуко**). Токовете им линии съвпадат със силовите линии на вихровото електрично поле.

Като се използва уравнението за индуцираното ЕДН, за вихровите токове се получава съответно:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(\vec{B} \cdot \vec{S}) = -S \frac{dB}{dt}$$

$$I_{вихр.} = -\frac{S}{R} \frac{dB}{dt}.$$

Поради вихровите токове $I_{вихр.}$, проводникът се загрява. За масивни проводници съпротивлението R е нищожно и вихровите токове $I_{вихр.}$ са големи.

Ако магнитното поле е бързоизменящо се с времето:

$$B = B_0 \sin \omega t$$

то за отделената мощност се получава:

$$W \sim \frac{\omega^2}{R}.$$

Следователно, отделената мощност при протичането на вихрови токове в масивен проводник е пропорционална на квадрата на честотата на изменящото се магнитно поле и е обратно пропорционална на съпротивлението.

Приложение на вихровите токове

1 – индукционни пещи

Нагриващите елементи на тези пещи представляват масивни проводници, по които се пропускат променливи високочестотни токове. Тъй като съпротивлението на масивните проводници е безкрайно малко ($R \rightarrow 0$) и честотата на променливото магнитно поле ω е висока, то съгласно уравнение (IX.17) се отделя голяма мощност и пещта силно се нагрива.

2 – трансформаторни сърцевини

Отделената мощност в сърцевината на трансформатора е източник на загуби на енергия и затова е необходимо да се отстраняват вихровите токове. Отделената мощност съгласно уравнение (IX.17) намалява, като се увеличава съпротивлението R на материала на сърцевините. За целта те се изготвят от отделни пластинки, изолирани една от друга и от материал (например силициева ламарина), който има голямо омическо съпротивление.

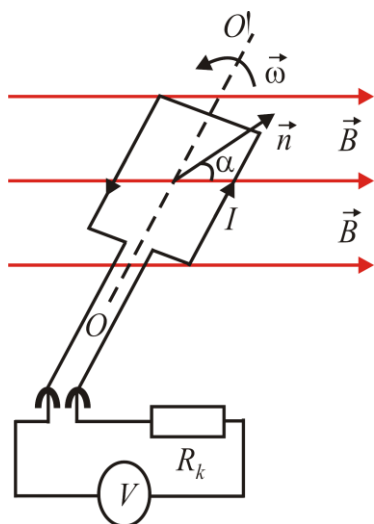
6. Приложения на електромагнитната индукция

Електромагнитната индукция намира широко приложение в редица устройства и системи в техниката. На това явление се основава действието на прибори за измерване на магнитната индукция (тесламетри), генератори на постоянен и променлив електричен ток, трансформатори, индукционни пещи и др.

Явлението електромагнитна индукция се използва за преобразуване на механичната енергия в електричен ток. За тази цел се използват генератори, чийто принцип на действие може да се обясни чрез въртене на плоска рамка в еднородно магнитно поле.

1) генератор на променлив ток

В генератора на променлив ток при равномерното въртене на рамка в магнитно поле се индуцира ЕДН, което се изменя по хармоничен закон.



В хомогенно магнитно поле \vec{B} рамка се върти около ос OO' , перпендикулярна на магнитното поле ($OO' \perp \vec{B}$) с ъглова скорост $\omega = const$, при което потокът през рамката Φ ще се изменя, тъй като ще се изменя ъгълът α с времето, т.е. $\alpha = \omega t + \alpha_0$. Ъгълът α е между нормалата на рамката \vec{n} и магнитната индукция \vec{B} , а α_0 е стойността на α в началния момент $t = 0$. Тогава според закона за електромагнитната индукция ще се индуцира ЕДН:

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{\partial (\vec{B} \cdot \vec{S})}{\partial t},$$

където магнитният поток е: $\Phi = BS \cos \alpha = BS \cos(\omega t + \alpha_0)$. Замества се и за индуцираните ЕДН и ток се получава съответно:

$$\mathcal{E}_i = BS \omega \sin(\omega t + \alpha_0)$$

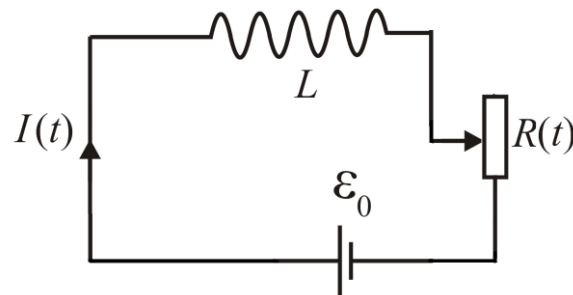
$$I_i = \frac{BS \omega}{R_k} \sin(\omega t + \alpha_0).$$

Следователно, ЕДН \mathcal{E}_i и индуцираният ток I_i ще се изменят с времето по синусоиден закон с честота ω и амплитуди съответно $\mathcal{E}_{\max} = BS\omega$ и $I_{\max} = \frac{BS\omega}{R_k}$:

$$\begin{cases} \mathcal{E}_{\text{инд.}} = \mathcal{E}_{\max} \sin(\omega t + \alpha_0) \\ I_{\text{инд.}} = I_{\max} \sin(\omega t + \alpha_0) \end{cases}.$$

Двата края на рамката са свързани с консуматора R_k към който се извежда променливият ток I_i . Напрежението може да се измери с волтметър V .

7. Самоиндукция



Ако в електрическата верига, показана на схемата, е включен източник на напрежение \mathcal{E}_0 , намотка (L) и потенциометър, чийто плъзгач се премества, т.е. изменя се съпротивлението му $R(t)$, то големината на тока $I(t)$ във веригата също ще се изменя с времето. Този, изменящ се с времето, ток $I(t)$ създава магнитно поле B и магнитен поток Φ през намотката, който също ще се изменя с времето и ще породи индуцирано електродвижещо напрежение (ЕДН) \mathcal{E}_{si} във веригата и съответно индуциран ток I_{si} .

Този вид индукция, породена от изменението на собственото магнитно поле, се нарича **самоиндукция**, а възникналото електродвижещо напрежение – **самоиндуцирано**.

Магнитният поток Φ през намотката е правопрпорционален на магнитната индукцията B на полето в намотката, а индукцията B е правопрпорционална на тока през нея. Следователно между потока Φ и тока I съществува следната зависимост:

$$\Phi = LI \tag{5}$$

Следователно, потокът на магнитната индукция Φ е пропорционален на тока, който го поражда (в случай, че магнитната проницаемост на средата не зависи от магнитното поле, т.е. $\mu = const$). Коефициентът L зависи от формата и размера на проводящия контура и от магнитните свойства на средата около него (μ).

Коефициентът L се нарича коефициент на самоиндукция или **индуктивност на контура**. От уравнение (5) се определя единицата за индуктивност - хенри (H).

$$[L] = \frac{[\Phi]}{[I]}; 1H(\text{Хенри}) = \frac{1Wb(\text{Вебер})}{1A(\text{Ампер})}.$$

Индуктивността на един проводник е един H (Хенри), когато магнитният поток, който се създава от проводник, по който тече ток $1 A$ (Ампер), е $1 Wb$ (Вебер).

Като се приложи законът на Фарадей за електромагнитната индукция към явлението самоиндукция, за самоиндуцираното ЕДН ще се получи:

$$\mathcal{E}_{Si} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (6)$$

Знакът „минус“ се обуславя от правилото на Ленц и показва, че поради индуктивността на контура, изменението на тока през него се забавя.

Самоиндуцираният ток $I_{Si} = \frac{\mathcal{E}_{Si}}{R}$ ще се наслагва с тока I , обусловен от външния източник \mathcal{E}_0 . Могат да се разгледат два случая:

1) токът I , обусловен от външния източник, нараства с времето, т.е. $\frac{\Delta I}{\Delta t} > 0$.

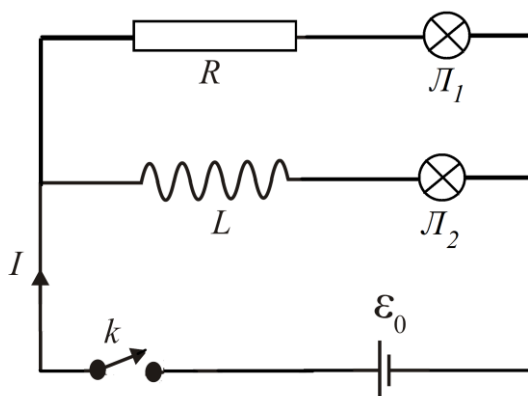
Тогава съгласно уравнение (6) $\mathcal{E}_{Si} < 0$ и самоиндуцираният ток I_{Si} ще е насочен в посока обратна на тока I и ще забавя неговото нарастване;

2) токът I , обусловен от външния източник, намалява с времето, т.е. $\frac{\Delta I}{\Delta t} < 0$.

Тогава съгласно уравнение (6) $\mathcal{E}_{Si} > 0$ и самоиндуцираният ток I_{Si} ще е насочен по посока на тока I и ще забавя неговото намаляване.

Извод: И в двата случая на външно въздействие, което изменя тока I с времето, системата проводници реагира (като създава самоиндуциран ток I_{Si}), така че да запази първоначалното си равновесно състояние.

В това се убеждаваме с експеримента, представен на схемата по-долу.

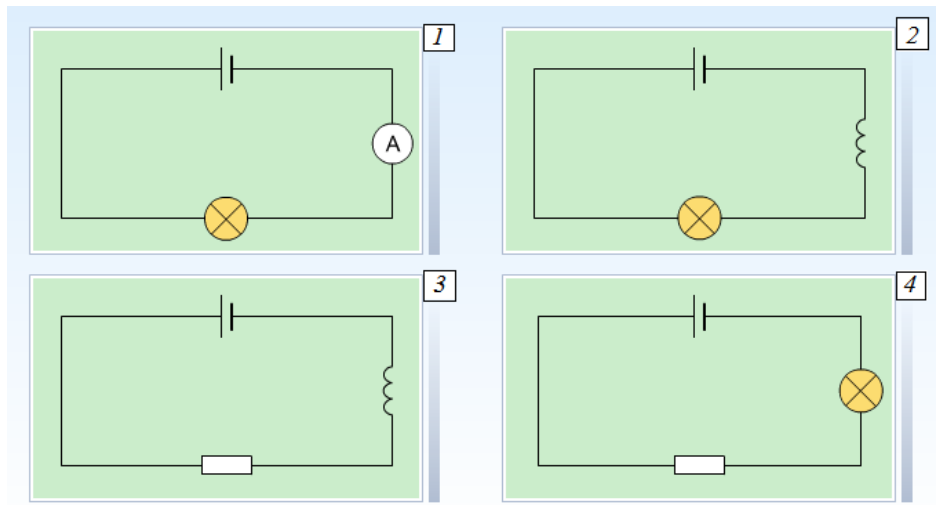


На две еднакви лампи L_1 и L_2 се подава едно и също напрежение \mathcal{E}_0 : на първата лампа – през резистор R , а на втората – през намотка L , чието омово съпротивление е равно на съпротивлението на резистора. При затваряне на ключа k първата лампа L_1 светва веднага, а втората лампа L_2 достига максималната си светимост постепенно.

Този резултат потвърждава, че когато токът през намотката нараства (при затваряне на веригата), самоиндуцираният ток има посока, обратна на тока, създаден от източника \mathcal{E}_0 и затова нарастването е забавено – L_2 светва със закъснение.

Задача

В кой от кръговете явлениято самоиндукция ще бъде най-силно?



Част от фигурите са взимствани от сайта <http://start.e-edu.bg/>, на който можете да наблюдавате и пълните анимации на някои от физичните явления.