

5. Вызначце, якую паскаральную рознасць патэнцыялаў павінна прайсці са стану спакою часціца, каб у аднародным магнітным полі, модуль індукцыі якога $B = 80$ мТл, на яе дзейнічала сіла Лорэнца, модуль якой $F = 20$ мкН. Маса часціцы $m = 12$ мг, яе зарад $Q = 3,0$ мкКл. У магнітнае поле часціца ўлятае перпендыкулярна лініям індукцыі.



§ 31. Магнітны паток.

З'ява електромагнітнай індукцыі

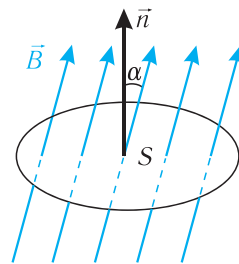
Доследы Эрстэда і Ампера дапамаглі зразумець, што электрычныя і магнітныя палі маюць адны і тыя крыніцы — электрычныя зарады, якія рухаюцца. Гэта дазволіла выказаць меркаванне, што палі нейкім чынам звязаны адно з адным. Фарадэй быў абсалютна ўпэўнены ў адзінстве электрычных і магнітных з'яў. Неўзабаве пасля адкрыцця Эрстэда Фарадэй запісаў у дзённіку ў снежні 1821 г.: «Ператворыць магнетызм у электрычнасць». На вырашэнне гэтай фундаментальнай задачы яму спатрэбілася дзесяць гадоў. Пасля шматлікіх эксперыментаў Фарадэй зрабіў эпахальнае адкрыццё: замыкаючы і размыкаючы электрычны ланцуг адной шпулі, ён атрымаў у замкнутым ланцугу другой шпулі электрычны ток. Назіраную з'яву Фарадэй назваў *электрамагнітнай індукцыяй*.

Магнітны паток. Індукцыя магнітнага поля характарызуе магнітнае поле ў канкрэтным пункце прасторы. Каб ахарактарызаваць магнітнае поле ва ўсіх пунктах паверхні, абмежаванай замкнутым контурам, увялі фізічную велічыню, якую назвалі *магнітным патокам* (патокам індукцыі магнітнага поля).

Магнітны паток праз плоскую паверхню, якая знаходзіцца ў аднародным магнітным полі, — фізічная скалярная велічыня, роўная здабытку модуля індукцыі магнітнага поля, плошчы паверхні і косінуса вугла паміж напрамкамі нармалі да гэтай паверхні і індукцыі магнітнага поля (мал. 173):

$$\Phi = BS \cos \alpha.$$

(31.1)



Мал. 173

Адзінкай магнітнага патоку ў СІ з'яўляецца вебер (Вб). 1 Вб — магнітны паток аднароднага магнітнага поля індукцыяй 1 Тл праз плоскую паверхню, размешчаную перпендыкулярна індукцыі магнітнага поля, плошча якой 1 м².

Формула (31.1) дазваляе зрабіць выснову, што магнітны паток залежыць ад узаемнай арыентацыі ліній індукцыі магнітнага поля і нармалі да плоскай паверхні. Магнітны паток максімальны, калі $\alpha = 0$, гэта значыць калі паверхня перпендыкулярная лініям індукцыі магнітнага поля:

$$\Phi_{\max} = BS.$$

Калі плоская паверхня паралельная лініям індукцыі ($\alpha = 90^\circ$), то магнітны паток праз яе роўны нулю.

На практыцы часта сустракаюцца сітуацыі, калі лініі індукцыі магнітнага поля перасякаюць паверхні, абмежаваныя не адным контурам, а некалькімі. Так, напрыклад, лініі індукцыі могуць перасякаць паверхні, абмежаваныя віткамі саленоіда, якія «паралельныя» адзін аднаму і маюць аднолькавую плошчу паверхні. У гэтым выпадку магнітны паток вызначаюць па формуле

$$\Phi = NBS,$$

дзе N — колькасць віткаў саленоіда; S — плошча паверхні, абмежаванай кожным вітком.

Змяніць магнітны паток праз паверхню, абмежаваную контурам, можна, змяняючы: 1) індукцыю магнітнага поля, у якім знаходзіцца контур; 2) памеры гэтага контуру; 3) арыентацыю контуру ў магнітным полі.

Ад тэорыі да практыкі

Квадратная драцяная рамка са стараной даўжынёй $a = 4$ см змешчана ў аднароднае магнітнае поле, лініі індукцыі якога перпендыкулярныя плоскасці рамкі, а модуль індукцыі $B = 0,5$ Тл. Якім будзе змяншэнне магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную рамкай, пры яе павароце на вугал $\beta = 90^\circ$?

З'ява электрамагнітнай індукцыі. У 1831 г. Фарадэй правёў серыю доследаў, якія дазволілі пацвердзіць наступныя факты:

1) пры руху пастаяннага магніта адносна шпулі, падключанай да гальванометра, у шпулі ўзнікаў электрычны ток (стрэлка гальванометра адхілялася). Прычым напрамак току змяняўся на супрацьлеглы пры змене напрамку руху магніта. Гэтая ж з'ява адбывалася, калі магніт быў нерухомы, а рухалі шпулю (мал. 174);

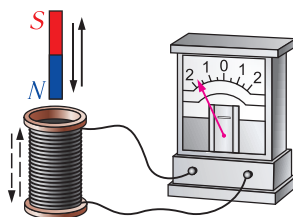
2) у шпулі, падключанай да гальванометра, узнікаў электрычны ток, калі адносна яе рухалі іншую шпулю, якая была падключана да крыніцы пастаяннага току (мал. 175);

3) калі дзве шпулі былі намотаныя на агульны каркас і адну падключалі да гальванометра, а другую — да крыніцы току, то ток у першай шпулі ўзнікаў пры змене току ў другой (мал. 176).

Ва ўсіх разгледжаных выпадках электрычны ток у ланцугу гальванометра ўзнікаў толькі пры змене магнітнага патоку праз паверхні, абмежаваныя віткамі шпулі, падключанай да гальванометра (мал. 177). Прычым значэнне сілы току, які ўзнікаў у контуры, не залежала ад спосабу змянення магнітнага патоку, а вызначалася толькі скорасцю яго змянення. Назвалі такі ток індукцыйным токам.

Індукцыйны ток — электрычны ток, які ўзнікае ў замкнутым праводным контуры пры любой змене магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную гэтым контурам.

Для існавання току ў замкнутым электрычным ланцугу неабходна, каб на свабодных зараджаных часціцы дзейнічалі пабочныя сілы, гэта значыць у ланцугу павінна быць крыніца ЭРС. Відавочна, што ў доследах Фарадэя крыніцай гэтых пабочных сіл з'яўляўся магнітны паток, змена якога стварала ў ланцугу ЭРС. Гэтую ЭРС назвалі *электрарухаючая сіла індукцыі* або *ЭРС індукцыі*. Калі ланцуг замкнуты, ЭРС індукцыі стварае індукцыйны ток, гэта значыць узнікненне індукцыйнага току з'яўляецца другасным эфектам.



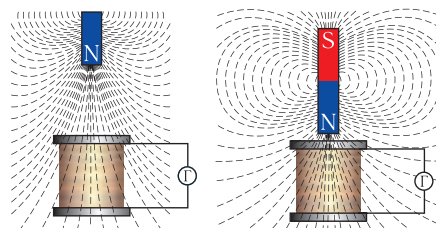
Мал. 174



Мал. 175



Мал. 176



Мал. 177

Электрамагнітная індукцыя — з’ява ўзнікнення ЭРС індукцыі ў контуры, які або знаходзіцца ў зменлівым у часе магнітным полі, або рухаецца ў пастаянным магнітным полі так, што магнітны паток праз паверхню, абмежаваную контурам, змяняецца.

Ад тэорыі да практыкі

1. Што змянілася б у доследах Фарадэя, калі б ён выкарыстаў шпулі з вялікай колькасцю віткоў?

2. Ці адрозніваецца электрычны ток, індукцыраваны ў правадніку, ад электрычнага току, які ствараецца любой іншай крыніцай, напрыклад гальванічным элементам?



«Пераварыць магетызм у электрычнасць»

Узнікненне электрычнага току пры адносным руху шпулі і магніта (другой шпулі)

Узнікненне электрычнага току ў адной шпулі пры змене току ў другой шпулі

Індукцыйны ток — электрычны ток, які ўзнікае ў замкнутым праводным контуры пры любой змене магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную гэтым контурам

Магнітны паток праз плоскую паверхню, якая знаходзіцца ў аднародным магнітным полі, — фізічная скалярная велічыня, роўная здабытку модуля індукцыі магнітнага поля, плошчы паверхні і косінуса вугла паміж напрамкамі нармалі да гэтай паверхні і індукцыі магнітнага поля:

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

Электрамагнітная індукцыя — з’ява ўзнікнення ЭРС індукцыі ў контуры, які або знаходзіцца ў спакоі ў зменлівым у часе магнітным полі, або рухаецца ў пастаянным магнітным полі так, што магнітны паток праз паверхню, абмежаваную контурам, змяняецца

3 гісторыі фізікі

Адзін з гісторыкаў навукі пісаў: «...працы іншых вучоных — Кулона, Гальвані, Эрстэда, Араго, Ампера — уяўлялі з сябе асобныя пікі, тады як Фарадэй узвёў “горны ланцуг” з узаемазвязаных работ».



1. Што называюць магнітным патокам? Што з’яўляецца адзінкай магнітнага патоку ў СІ?
2. Якімі спосабамі можна змяніць магнітны паток праз паверхню?
3. Пры якіх умовах у замкнутым праводным контуры ўзнікае індукцыйны ток?
4. Што галоўнае ў з’яве электромагнітнай індукцыі?

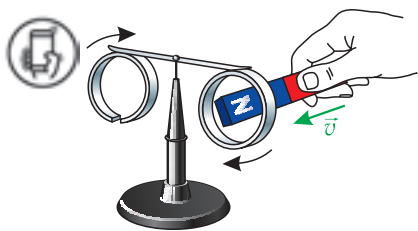


§ 32. Правіла Ленца. Закон электромагнітнай індукцыі

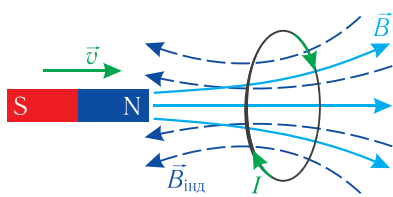
Пасля адкрыцця з’явы электромагнітнай індукцыі Фарадэй практычна за паўтара месяца выявіў усе яе істотныя заканамернасці. Ён зразумеў сутнасць з’явы, якая адыграла такую важную ролю для чалавецтва: ва ўсіх эксперыментах, праведзеных ім, індукцыйны ток у праводным контуры ўзнікаў у выніку змены магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную гэтым контурам. Фарадэй не толькі адкрыў з’яву электромагнітнай індукцыі, але і першы прадэманстравалі, што «можна стварыць пастаянны ток электрычнасці пры дапамозе звычайных магнітаў», сканструяваўшы прыладу, якая дазваляла пераўтвараць механічную энергію ў электрычную.

Напрамак індукцыйнага току. Доследы Фарадэя паказалі, што напрамак індукцыйнага току, выкліканага ўзрастаннем магнітнага патоку, супрацьлеглы напрамку індукцыйнага току, выкліканага яго змяншэннем. Даследаваўшы з’яву электромагнітнай індукцыі, пецярбургскі акадэмік Эмілій Хрысціянавіч Ленц (1804–1865) у 1833 г. сфармуляваў **правіла для вызначэння напрамку індукцыйнага току (правіла Ленца)**: індукцыйны ток, які ўзнікае ў замкнутым праводным контуры, мае такі напрамак, што створаны ім магнітны паток праз паверхню, абмежаваную контурам, супрацьдзейнічае змяненню магнітнага патоку, які выклікае гэты індукцыйны ток. Гэта азначае, што пры ўзрастанні магнітнага патоку магнітнае поле індукцыйнага току накіравана супраць знешняга поля, а пры змяншэнні — магнітнае поле індукцыйнага току накіравана так, як і знешняе поле.

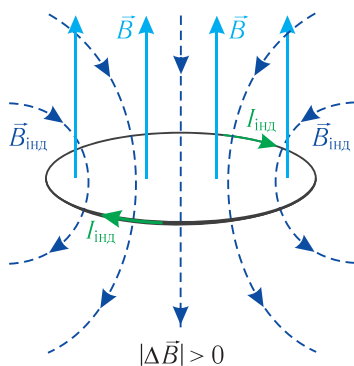
У больш сціслай форме правіла Ленца можна сфармуляваць наступным чынам: індукцыйны ток заўсёды накіраваны так, што яго дзеянне супрацьлеглае дзеянню прычыны, якая выклікала гэты ток.



Мал. 178



Мал. 179



Мал. 180

Правила Ленца можна праїлюструвати, використавши два алюмінієві кільця (одно з їх з розрізом), замацані на стрижні, які вільно вертяться навколо вертикальної осі (мал. 178). З доследу виникає, що при наближенні постійного магніта до суцільного кільця воно адгезує до магніта; при віддаленні магніта — кільця відштовхується від нього. Адгезування і відштовхування суцільного кільця тлумачать виникненням у ім індукційного струму при зміні магнітного потоку через поверхню, обмежену кільцем. Відомо, що при наближенні магніта до кільця напрям індукційного струму такий, що індукція магнітного поля струму суперечить індукції магнітного поля постійного магніта (мал. 179). При віддаленні магніта індукційні магнітні полюси струму і магніта співпадають по напрямку. При русі магніта відносно кільця з розрізом взаємодія не відбувається, бо індукційний струм відсутній.

Щоб визначити напрям індукційного струму згідно з правилами Ленца, необхідно виконати наступні операції (мал. 180):

1) визначити напрям ліній індукції зовнішнього магнітного поля $\vec{B}$;

2) уявити, повільно змінюючи цей магнітний потік через поверхню, обмежену замкнутим контуром;

3) визначити напрям ліній індукції магнітного поля індукційного струму $\vec{B}_{\text{інд}}$: калі зростає потік, то напрям індукції зовнішнього магнітного поля $\vec{B}$ і магнітного поля індукційного струму $\vec{B}_{\text{інд}}$ співпадають, калі $\Delta\Phi < 0$, то вони суперечать;

4) знаючи напрям ліній індукції магнітного поля індукційного струму $\vec{B}_{\text{інд}}$, за правилом правої стрілки визначити напрям індукційного струму.

Ад тэорыі да практыкі

Ці зменшається напрям індукційного струму (гл. мал. 178), калі магніт наближається до кільця паўднёвым полюсам? Калі зменшається, то як?

Правіла Ленца адпавядае закону захавання энергіі ў дачыненні да з'явы электромагнітнай індукцыі. На самай справе, калі б індукцыйны ток меў іншы напрамак, ён мог бы існаваць без затрат энергіі, што супярэчыць закону захавання энергіі.

Адкрыццё з'явы электромагнітнай індукцыі мела вялікае значэнне. Была даказаная ўзаемасувязь магнітных і электрычных з'яў, што паслужыла надалей адпраўным пунктам для распрацоўкі тэорыі электромагнітнага поля.

Закон электромагнітнай індукцыі. Аналізуючы вынікі доследаў Фарадэя, Максвел у 1873 г. прыйшоў да высновы, што ЭРС індукцыі ў замкнутым праводным контуры прапарцыянальная скорасці змянення магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную контурам, гэта значыць

$$\mathcal{E}_{\text{інд}} \sim \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (32.1)$$

Каб забяспечыць строгую роўнасць у выразе (32.1), неабходна ўлічыць напрамак індукцыйнага току. Паводле правіла Ленца пры павелічэнні магнітнага патоку $\left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0\right)$ ЭРС індукцыі адмоўная ($\mathcal{E}_{\text{інд}} < 0$) і, наадварот, пры змяншэнні магнітнага патоку $\left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0\right)$ ЭРС індукцыі дадатная ($\mathcal{E}_{\text{інд}} > 0$). Тады

$$\mathcal{E}_{\text{інд}} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (32.2)$$

Такім чынам, **ЭРС электромагнітнай індукцыі ў контуры роўная скорасці змянення магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную контурам, узятай са знакам «мінус».**

Выраз (32.2) называюць **законам электромагнітнай індукцыі Фарадэя**, чым падкрэсліваюць заслугі вучонага ў вывучэнні гэтай з'явы. Трэба адзначыць, што дадзены закон з'яўляецца ўніверсальным, гэта значыць ЭРС індукцыі не залежыць ад спосабу змянення магнітнага патоку.

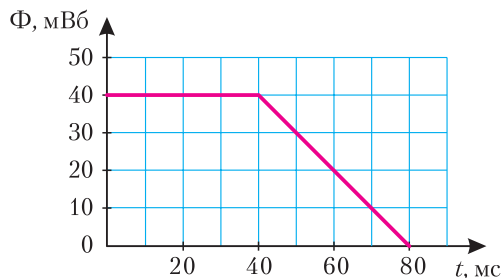
Ведаючы ЭРС індукцыі, можна вызначыць сілу індукцыйнага току. Згодна з законам Ома для поўнага ланцуга:

$$I_{\text{інд}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{інд}}}{R},$$

дзе R — супраціўленне правадніка, з якога выраблены замкнуты праводны контур.

Ад тэорыі да практыкі

На малюнку 181 прыведзены графік залежнасці магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную контурам, ад часу. Вызначце ЭРС індукцыі ў моманты часу $t_1 = 30$ мс і $t_2 = 60$ мс.



Мал. 181



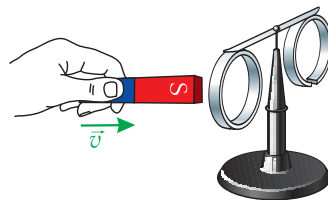
Індукцыйны ток, які ўзнікае ў замкнутым праводным контуры, мае такі напрамак, што створаны ім магнітны паток праз паверхню, абмежаваную контурам, супрацьдзейнічае змяненню магнітнага патоку, які выклікае гэты індукцыйны ток (правіла Ленца)

ЭРС электрамагнітнай індукцыі ў контуры роўная скорасці змянення магнітнага патоку праз паверхню, абмежаваную контурам, узятай са знакам «мінус» (закон электрамагнітнай індукцыі Фарадэя):

$$\mathcal{E}_{\text{інд}} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$



1. Як фармулююць правіла Ленца?
2. Як можна растлумачыць вынікі доследаў з суцэльным алюмініевым кольцам і перамышчэннем пастаяннага магніту?
3. Як вызначаюць напрамак індукцыйнага току?
4. Які напрамак індукцыйнага току ў суцэльным алюмініевым кольцы, да якога падносяць магніт (мал. 182)? Як будзе рухацца кольца? Што будзе, калі магніт паднесці да кольца з разрэзам?
5. Як фармулююць закон электрамагнітнай індукцыі?
6. Чаму ў формуле, якая з'яўляецца матэматычным выразам закона электрамагнітнай індукцыі, стаіць знак «мінус»?



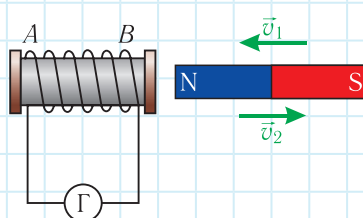
Мал. 182



Прыклад рашэння задачы

Вызначце напрамак індукцыйнага току ў саленоідзе, які паказаны на малюнку 183.

Рашэнне. Пры набліжэнні паўночнага полюса магніта да саленоіда ў ім індуктуецца электрычны ток такога напрамку, пры якім бліжэйшы да магніта канец саленоіда набывае ўласцівасці паўночнага магнітнага полюса. Вызначыўшы напрамак току паводле правіла свярдзёлка (правіла гадзіннікавай стрэлкі), бачым, што ток у саленоідзе накіраваны ад пункта A да пункта B . Пры аддаленні паўночнага полюса магніта ад саленоіда ў ім узнікае індукцыйны ток, накіраваны ад пункта B да пункта A .



Мал. 183

Практыкаванне 23

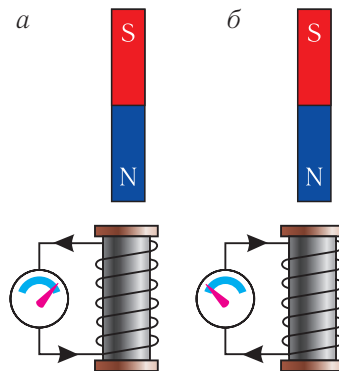
1. На малюнку 184, a , b стрэлкамі паказаны напрамкі індукцыйных токаў у саленоідзе. Вызначце напрамкі руху магнітаў у кожным выпадку.

2. Кругавы контур радыусам $r = 12$ см знаходзіцца ў аднародным магнітным полі, модуль індукцыі якога $B = 0,40$ Тл. Вызначце магнітны паток праз паверхню, абмежаваную контурам, калі: а) лініі індукцыі магнітнага поля паралельныя нармалі да гэтай паверхні; б) паверхня, абмежаваная контурам, паралельная лініям індукцыі магнітнага поля; в) лініі індукцыі магнітнага поля ўтвараюць вугал $\alpha = 30^\circ$ з гэтай паверхняй.

3. Вось саленоіда, які складаецца з $N = 100$ віткаў, паралельная лініям індукцыі аднароднага магнітнага поля, модуль індукцыі якога $B = 0,20$ Тл. Вызначце магнітны паток праз паверхню, абмежаваную ўсімі віткамі саленоіда, калі плошча кожнай з іх $S = 16$ см².

4. Вызначце прамежак часу, на працягу якога магнітны паток праз паверхню, абмежаваную замкнутым правадніком, раўнамерна зменшыўся на $|\Delta\Phi| = 0,20$ Вб, калі індукцыраваная ў правадніку ЭРС $\mathcal{E}_{\text{інд}} = 0,80$ В.

5. Вызначце магнітны паток праз паверхню, абмежаваную вітком саленоіда, які складаецца з $N = 100$ віткаў, калі пры раўнамерным памяншэнні да нуля модуля індукцыі аднароднага магнітнага поля ў саленоідзе на працягу прамежку часу $\Delta t = 5,0$ мс індуктуецца ЭДС $\mathcal{E}_{\text{інд}} = 20$ В.



Мал. 184

