

Правоъгълна рамка в магнитно поле¹

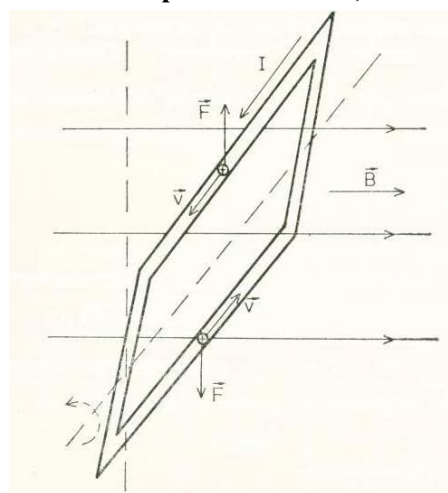
Вероятно на мнозина са прави впечатление два чертежа, които често се срещат в учебниците по физика и въпреки че много си приличат, имат и съществени разлики. Те изобразяват правоъгълна рамка от проводник, която може да се върти около ос, перпендикулярна на индукционните линии на хомогенно магнитно поле. Разликите са в посоките на силите, които действат, и токовете, които текат в двата случая.

По изобразената на фиг. 1 рамка тече ток и се изследва действието на магнитното поле върху рамката. Рамката от фиг. 2, обратно – се върти в магнитното поле и се търси посоката на индуцирания в нея ток. За да се определят посоките на неизвестните вектори не е непременно необходимо да се помнят всички правила на трите пръста, на изпънатите пръсти и т.н., които, на всичко отгоре, в различни източници са формулирани по най-различни начини. Всички те следват от универсалното правило за посоката на магнитната сила \vec{F} , действаща на заряд q , движещ се със скорост \vec{v} в магнитно поле с индукция \vec{B} . Това правило следва от векторната форма на израза за силата на Лоренц:

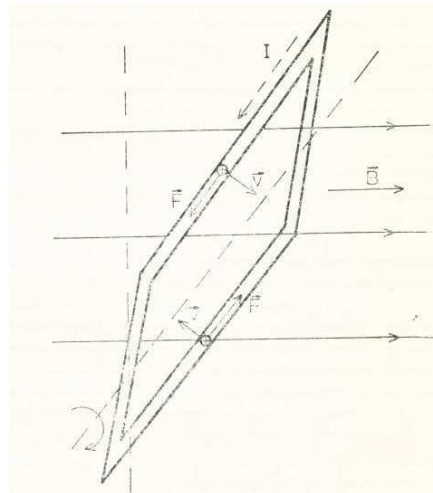
$$(1) \quad \vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}.$$

В случая, когато зарядът е положителен ($q > 0$), това правило гласи:

Гледано срещу посоката на силата \vec{F} , посоката на индукцията \vec{B} се получава от посоката на скоростта \vec{v} чрез въртене срещу посоката на движение на часовниковите стрелки на ъгъл, по-малък от 180° .



Фиг. 1.



Фиг. 2.

Като се помни това правило, остава само при прилагането му да се съобразява коя точно е разглежданата скорост \vec{v} .

Нека обсъдим паралелно двата случая, за да изпъкне по-ясно разликата между тях. Протичането на ток по рамката на фиг. 1 е предизвикано от електродвижещите сили на **външен** източник, който, за опростяване, не е показан на чертежа. В този случай \vec{v} от формула (1) е скоростта на насоченото движение на фиктивни положителни заряди и следователно посоката на скоростта съвпада с посоката на тока. Според цитираното правило за посоките, магнитното поле поражда магнитни сили, които действат на всеки движещ се заряд и са перпендикулярни на съответните страни на рамката. Силите, които действат на страните, перпендикулярно на оста на въртене, действат в направление на оста, но в противоположни посоки и затова се

¹ Едно пояснение, Физика, 1984, 5, с. 48–49.

уравновесяват. На страните, успоредни на оста на въртене, действат сили с противоположни посоки, перпендикулярни на самите страни. Те представляват *двойка сили*, която създава въртящ момент, стремящ се да завърти рамката в указаната с пунктир посока.

В случая от фиг. 2 външен източник на ЕДС няма, но в замяна на това **външни** сили въртят рамката в магнитно поле. В този случай \vec{v} е скоростта на зарядите в рамката, предизвикана от въртенето ѝ и затова е перпендикулярна на съответната страна на рамката. По същото правило посоката на магнитната сила \vec{F} , която действа на един положителен заряд в проводника ще бъде по направление на оста на въртене – по рамката протича *индуциран* ток с означената чрез пунктир на фиг. 2 посока. (И на двете фигури с *пунктир* е указана посоката на предизвикания ефект: механичен въртящ момент на фиг. 1 и индуциран ток – на фиг. 2.)

Двата случая са подбрани така, че посоките на магнитното поле в тях са еднакви. Еднакви са и посоките на токовете. Обърнете внимание обаче върху разликата в посоките на въртящите моменти: когато токът се поражда от външен източник, възникналият въртящ момент се стреми да завърти рамката в една посока (фиг. 1), а за да индуцираме същия ток, трябва да приложим външен механичен въртящ момент в противоположната посока.

Интересно е, че този факт би могъл да се предскаже от най-общи съображения, въз основа на закона за запазване на енергията, без никакви детайлни правила за посоки на вектори. Наистина, да си представим неподвижна рамка от проводник в хомогенно поле. Ток в нея не тече, но флукуациите на топлинното движение на свободните електрони в един момент може да предизвикат кратковременен ток – да го наречем първичен, в една от двете възможни посоки. Този ток, взаимодействайки с магнитното поле, ще породи малък въртящ момент, под чието действие рамката ще тръгне да се завърта. Ако това въртене индуцира в рамката ток със същата посока, като на първичния, това ще доведе до усилването му – получава се положителна обратна връзка и така процесът ще се “самоускорява” до безкрайност. Дори рамката да е безкрайно лека и кинетичната ѝ енергия да може да се пренебрегне, магнитното поле на непрекъснато увеличаващия се ток през нея има енергия, която се появява “от нищо”, в явно противоречие със закона за запазване на енергията. Ето защо, посоката на индуцирания в рамката ток непременно трябва да бъде противоположна на първичния, случайно възникнал ток. В този случай и започващото въртене би спряло.

Анализът на тези два много подобни един на друг случая показва колко важно е правилното определяне на посоката на \vec{v} – в единия случай посоката на тока (фиг. 1), а в другия – посоката на движение на проводника (фиг. 2). Действието на магнитната сила в двата случая предизвиква различен ефект: на фиг. 1 ефектът е поява на въртящ механичен момент, а на фиг. 2 – поява на индуциран ток.²

Получените резултати може да се сумират и по друг начин. И в двата случая имаме по два механични въртящи момента. Единият се дължи на външни сили и затова може да го наречем *външен*. Той може да бъде активен, ако въртенето се извършва под негово действие – това е случаят на генераторите на ток. В друг случай външният въртящ момент може да бъде пасивен, както при електромоторите – при тях той се дължи на механичното съпротивление, което оказва някакъв товар.

Вторият въртящ момент – да го наречем *вътрешен*, се дължи на взаимодействието между тока и магнитното поле (външно!), независимо от това дали

² Обърнете внимание, че става дума за случая, когато електромагнитната индукция се обяснява с действието на сили на Лоренц. В тази схема на разглеждане не се вметва случаят, когато ток се индуцира в неподвижен проводник (от променливо магнитно поле), т.е. случаят, който понякога наричаме електромагнитна индукция в тесен смисъл или истинска електромагнитна индукция.

този ток е индуциран (както при генераторите), или се дължи на външен източник (в електромоторите).

Общото в случаите, илюстрирани на фиг. 1 и фиг. 2, е, че винаги двата въртящи момента – външният и вътрешният, са с противоположни посоки. Следователно при такъв подход изпъква не различието, а общото в двата случая. И както се оказва често, този общ резултат, получен чрез детайлно прилагане на правилото за посоката на магнитната сила, може да се получи просто чрез закона за запазване на енергията.

Наистина, нека разгледаме неподвижна метална рамка (без ток) в магнитно поле. Какво ще стане, ако опитаем да завъртим рамката около оста ѝ (т.е. приложим външен механичен въртящ момент?) При завъртането в рамката се индуцира ток, който взаимодейства с магнитното поле и резултатът е друг, вътрешен въртящ момент. Неговата посока **трябва** да бъде противоположна на посоката на посоката на външния момент – ако не е, рамката ще започне да самоускорява неограничено въртенето си, а това вече, както изяснихме по-горе, противоречи на закона за запазване на енергията.

По подобен начин може да се разгледат и други случаи.