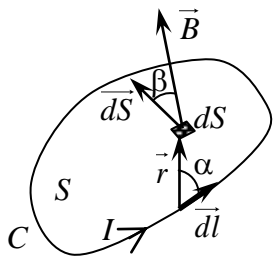


Самоиндукция и взаимна индукция. Енергия на магнитното поле

Самоиндукция и взаимна индукция

Видяхме, че при всяка промяна на магнитния поток през дадена площ се индуцира ЕДН и ако там се намира затворен контур, по него ще протече ток. Нека да разгледаме един затворен контур C , по който



фиг. 1

тече ток I (фиг. 1). В пространството около контура се създава магнитно поле. Ако променим големината на тока, ще се промени и магнитната индукция на полето около проводника, а оттам и магнитният поток през площта S на контура. В такъв случай (1) в контура трябва да се индуцира ЕДН \mathcal{E}_i , което ще доведе до протичане на допълнителен ток в проводника, посоката на който е съобразена с правилото на Ленц. Това явление, при което в затворен контур се индуцира ЕДН вследствие на промяната на тока в самия контур, се нарича самоиндукция. Нека да определим от какво зависи това ЕДН. Първо ще изразим магнитния поток през площта S като функция на протичащия ток I в най-простия случай, когато

имаме равнинен контур. В този случай магнитните индукции \vec{dB} на всички елементи \vec{dl} от контура са еднопосочни (можем просто да сумираме големините им) и общата индукция \vec{B} е перпендикулярна на площта на контура ($\vec{B} \uparrow \uparrow \vec{dS}$, $\cos \beta = 1$ за всеки елемент \vec{dS} от площта). От закона на Био – Савар можем да запишем:

$$B = \oint_C dB = \frac{\mu_0 \mu_r}{4\pi} I \oint_C \frac{\sin \alpha}{r^2} dl,$$

тъй като токът I е еднакъв през всички елементи \vec{dl} от контура C , можем да го изнесем пред интеграла. През площта S на контура преминава магнитен поток:

$$(1) \quad \Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot \vec{dS} = \int_S B \cos \beta dS = \int_S B dS = \frac{\mu_0 \mu_r}{4\pi} I \int_S \left(\oint_C \frac{\sin \alpha}{r^2} dl \right) dS = \left[\frac{\mu_0 \mu_r}{4\pi} \int_S \left(\oint_C \frac{\sin \alpha}{r^2} dl \right) dS \right] I,$$

$$\Phi_B = LI$$

където с L сме означили величината:

$$(2) \quad L = \frac{\mu_0 \mu_r}{4\pi} \int_S \left(\oint_C \frac{\sin \alpha}{r^2} dl \right) dS,$$

която се нарича индуктивност на контура. Както се вижда от (2), индуктивността L на даден контур зависи само от размерите и формата на контура (разстоянието от елемента от контура \vec{dl} до елемента от площта \vec{dS} – r и ъгълът между векторите \vec{dl} и \vec{r} – α) и магнитната проницаемост μ_r на средата. Ако контурът не изменя геометричните си характеристики, индуктивността му е константа и е една от основните му характеристики (също както напр. електричното съпротивление или електричният капацитет). Тогава от закона на Фарадей и (1) за индуцираното в контура ЕДН получаваме (ако контурът не се деформира, $L = \text{const}$):

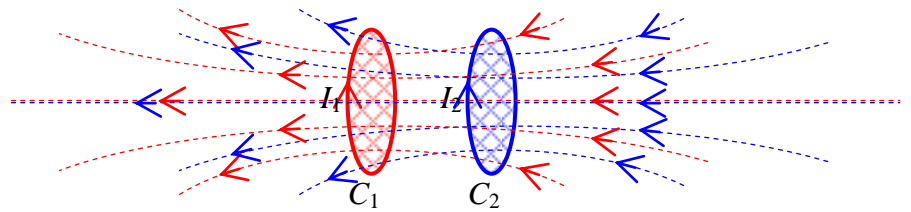
$$(3) \quad \mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi_B}{dt} = -L \frac{dI}{dt},$$

т.е. индуцираното ЕДН зависи само от скоростта на промяна на тока в контура. От (3) можем да определим и мерната единица за индуктивност – [V.s/A], която е наречена хенри [H] на името на американския физик Дж. Хенри.

От зависимостта (3) могат да се направят няколко извода. Ако индуктивността L на контура е голяма (напр. намотка), дори и малки промени на тока могат да предизвикат индуциране на големи ЕДН, съответно протичане на големи индуцирани токове през контура. Ако индуктивността на контура е малка, големи ЕДН могат да възникнат при бърза промяна на големината на тока – напр. при включване или изключване на електрическа верига – индуцираните токове, които протичат в този случай, се наричат съответно екстраток на включване и изключване. Те могат да бъдат причина за повредата на електроуреди, особено екстратокът на изключване, който, по правилото на Ленц, е в същата посока, както токът във веригата и следователно общият ток, който протича, може да бъде много по-голям от допустимия за съответния уред (напр. електрическа крушка). Затова, вместо обикновени ключ-прекъсвачи, понякога се използват потенциометрични ключове – така напрежението и токът във веригата се увеличават и намаляват плавно и се намаляват екстратоките на включване и изключване.

Ще разгледаме по-подробно още един случай, в който възниква индуцирано ЕДН – това е последният експеримент на Фарадей с двете намотки, като пак ще разгледаме опростен вариант, с два контура C_1 и C_2 вместо намотки, разположени близо един до друг (фиг. 2). Нека по контура C_1 тече ток I_1 . Около проводника се създава магнитно поле и неговите силови линии ще пронизват площта на контура C_2 . Ако променим големината на тока I_1 , магнитният поток Φ_{12} през площта на C_2 също ще се промени – в контура C_2 ще възникне индуцирано ЕДН, пропорционално на промяната на потока Φ_{12} , и ще протече ток. Точно това е наблюдавал Фарадей в последната серия експерименти. ЕДН \mathcal{E}_{i2} , което се индуцира в контура C_2 при промяна на тока I_1 в контура C_1 , можем да определим аналогично на самоиндуцираното ЕДН (3):

$$(4) \mathcal{E}_{i2} = -\frac{d\Phi_{12}}{dt} = -M_{12} \frac{dI_1}{dt}.$$



фиг. 2

Явлението, при което в единия от два токови контура, разположени на близко разстояние един от друг, възниква ЕДН вследствие изменението на големината на тока в другия контур наричаме взаимна индукция. Коефициентът M_{12} се нарича индуктивност на контура C_2 спрямо контура C_1 и зависи от формата и размерите на двата контура, взаимното им разположение и магнитната проницаемост μ на средата. Ако по контура C_2 тече ток I_2 , промяната на този ток ще предизвика промяна на магнитния поток Φ_{21} през контура C_1 и също както в горния случай ще се индуцира ЕДН \mathcal{E}_{i1} в контура C_1 :

$$(5) \mathcal{E}_{i1} = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -M_{21} \frac{dI_2}{dt}.$$

Може да се покаже, че ако средата не е феромагнитна, коефициентите M_{21} и M_{12} в (4) и (5) са равни $M_{21}=M_{12}=M$. Коефициентът M се нарича взаимна индуктивност на двата контура и зависи само от геометричните им характеристики и взаимното им разположение, както и от магнитната проницаемост на средата. От (5) се вижда, че мерната ѝ единица е същата както за L – хенри [H].

Явлението взаимна индукция също намира голямо приложение в техниката. На този принцип работят много машини и апарати, напр. трансформаторите.

Енергия на магнитното поле

Около всеки проводник, по който протича електричен ток, се създава магнитно поле. Опитът показва, че това поле се появява и изчезва едновременно с включването и изключването на източника на ЕДН, който осигурява протичането на електричен ток във веригата. Следователно част от работата, която извършват страничните сили в източника на ЕДН, трябва да се превръща в енергия на магнитното поле (друга част се превръща в топлина според закона на Джаул – Ленц). Тази енергия трябва да е равна на работата, която може да извърши магнитното поле напр. за преместване на проводника от силата на Ампер ($dA = Id\Phi$). Ако разгледаме един токов контур с индуктивност L и вземем предвид (1), ще получим:

$$(6) dA = Id\Phi = ILdI.$$

Магнитното поле се създава за времето, за което токът I нараства от 0 до максималната си стойност I . Затова, за да получим цялата извършена работа за създаване на магнитното поле около контура, която се е превърнала в енергия на магнитното поле W , трябва да интегрираме (6) в граници от 0 до максималния ток I :

$$W = A = \int_0^I dA = L \int_0^I IdI = \frac{1}{2} LI^2 \Big|_0^I = \frac{1}{2} LI^2.$$