

ANALYSIS OF THE TRANSFER OF ENERGY FROM THE MAGNETIC FIELD

АНАЛИЗ НА ПРЕНОСА НА ЕНЕРГИЯ ОТ МАГНИТНОТО ПОЛЕ

Ivan Stefanov Bozev

Department of "Basic Training", Higher School of Telecommunications and Post", 1700, Sofia, "Academic Stefan Mladenov" № 1, Bulgaria, e-mail: IBozev@hctp.acad.bg

Иван Стефанов БОЗЕВ

Департамент "Базисна подготовка", Висше училище по телекомуникации и пощи", 1700, София, ул. "Академик Стефан Младенов" №1, E-mail: IBozev@hctp.acad.bg

Abstract - The report analyzed issues related to electromagnetic induction and transfer of energy from the magnetic field. Based on the mathematical model used is shown that at unchanging electric field and a magnetic field changing in whole the energy is transferred from the magnetic field. For a more detailed description of an example operation of the analyzed pulse transformer in the rectangular pulses. In the time interval when the input voltage is constant, the magnetic flux increases at a constant rate, and the induced electric field does not change. It is shown that the proposed expressed in previous publications are applicable to an exciter of the magnetic field. If more than one exciter based on the analysis of experimental results from previous publications are offered expressions describing the intensity of the induced electric field and the transfer of energy from the magnetic field as a function of the rate of change of the magnetic field. Expressions are given to determine the strength of the induced electric field and the density of the transmitted energy excited by an electric element

Резюме – В доклада са анализирани въпроси, свързани с електромагнитната индукция и преноса на енергия от магнитното поле. На базата на използвания математичен модел е доказано, че при непроменящо се електрично поле и изменящо се магнитно поле енергията изцяло се пренася от магнитното поле. За по-подробно описание на такъв пример е анализирана работата на импулсен трансформатор при правоъгълни импулси. В интервала от време, когато напрежението на входа е постоянно, магнитния поток нараства с постоянна скорост и индуцираното електрично поле не се променя. Показано е, че предложените изрази в предишните публикации са приложими при един възбудител на магнитното поле. При повече от един възбудител на базата на анализа на експериментални резултати от предишни публикации са предложени изрази, описващи напрегнатостта на индуцираното електрично поле и преноса на енергия от магнитното поле като функция скоростта на изменение на магнитното поле. Дадени са изрази за определяне на напрегнатостта на индуцираното електричното поле и плътността на пренасяната енергия възбудени от токов елемент.

Keywords: electromagnetic induction, energy transfer, magnetic field.

1. УВОД

Преносът на енергия в електромагнитното поле е един от най-съществените въпроси в електротехниката. За неговото по-пълно изясняване се полагат много усилия от редица учени. Актуалното състояние на потвърдените от практиката достижения са дадени в стандарта [1]. В този доклад е направен анализ на възможността за по-конкретно описание на преноса на енергия от променливо магнитно поле. За целта в началото е разгледано в исторически аспект развитието на този въпрос. Посочени са различните подходи, използвани при описанието на преноса на енергия в електромагнитното поле [2], [3]. Разгледани са подробно определени ситуации, даващи възможност за съпоставка между използваните математически модели и физическите процеси. В случая за по-пълно описание на процеса на преноса на енергия е използван предложения нов математичен модел в [4] за описание на магнитното поле. Този математичен модел позволява да се изрази еднозначно потокът на енергия в пространството. Разгледан е преносът на енергия от магнитното поле в импулсен трансформатор. Показано е, че използването на математичния модел в [4] е подходящо само при магнитни полета, породени от един възбудител със съсредоточени параметри. При повече възбудители на магнитното поле са предложени формули, даващи пълно описание в диференциален вид на електромагнитната индукция и преноса на енергия от магнитното поле.

2. ИЗЛОЖЕНИЕ

Към настоящия момент преносът на енергия в електромагнитното поле се описва с вектора на Пойнтинг \vec{S} . Той е дефиниран в (IEV121-11-40) [1] и представлява векторно произведение от напрегнатостта на електричното поле \vec{E} и напрегнатостта на магнитното поле \vec{H} съставлящи електромагнитното поле в дадена точка

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}. \quad (1)$$

Потокът от вектора на Пойнтинг през затворена повърхност е равен на преминаващата мощност през тази повърхност [1].

Основните трудове по анализа на преноса на енергия в пространството са на Умов-1874 г. [2], Пойнтинг-1884 [3] и редица други учени (Хевисайт, Abraham, Minkowski). При анализа на преноса на енергия Умов прави връзка между енергийния поток и наличието на физичен поток, който е носител на енергията. При анализа на проблема в електромагнетизма, обикновено се диференцира изразът, даващ плътността w' на електрическа и магнитна енергия в пространството.

$$w' = \frac{1}{2}(\vec{E} \cdot \vec{D} + \vec{B} \cdot \vec{H}), \quad (2)$$

в резултат на което се стига до

$$\nabla \cdot \vec{S} + \varepsilon_0 \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\vec{B}}{\mu_0} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \vec{j}_c \cdot \vec{E} = 0, \quad (3)$$

където \vec{D} електричната индукция и \vec{B} е магнитната индукция, ε_0 е електричната константа и μ_0 е магнитната константа, $\varepsilon_0 \vec{E} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ е реактивната мощност, свързана с изменението на електричното поле, $\frac{\vec{B}}{\mu_0} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ е реактивната мощност, свързана с изменението на магнитното поле и $\vec{j}_c \cdot \vec{E}$ е плътността на електрическата мощност, разсейвана в свободните носители на заряд.

В непроводима среда съставката $\vec{j}_c \cdot \vec{E}$ отсъства.

Много често се приема, че векторът на Пойнтинг представлява плътността на потока на енергията. Това обаче в много случаи води до неясни резултати. Освен това при описание на преноса на енергия с помощта на вектора на Пойнтинг няма физически поток, с който да се свързва преноса на енергията.

Двете съставки за реактивните мощности на електричното и магнитното полета са напълно идентични по форма в израза (3). При анализа на електричното и магнитното полета в литературата навсякъде се работи с еднакви по тип вектори. Много рядко се казва, че електричното поле се описва от полярен вектор, а магнитното поле от аксиален вектор. Още по-рядко се говори за свойствата на векторите и по конкретно как се диференцират различните по тип векторни величини. Като се вземе предвид и факта, че когато магнитно и електрично статични полета заемат едно и също пространство векторът на Пойнтинг описва обикновено вихров поток от енергия, може да се предположи, че изразът (3) дава непълно описание на енергийния поток.

Ако се приеме подхода на Умов при описанието на преноса на енергия, е необходимо да се идентифицират физични потоци които да пренасят енергията. За електричното поле това може да бъде в най-общия случай тоталния ток \vec{j}_t , състоящ се от тока на проводимостта \vec{j}_c и тока на електрическата индукция $\vec{j}_D = \varepsilon_0 \partial \vec{E} / \partial t$,

$$\vec{j}_t = \vec{j}_D + \vec{j}_c \quad (4)$$

За магнитното поле, в съответствие донякъде с концепцията на Фарадей за силовите линии, това е потока, формиран от напречното движение на силовите линии на магнитното поле в пространството. В стандарта [1] не е дефинирано понятието силова линия, а само понятието (IEV ref 121-11-16 **tube of current**) токова тръба. Силовата линия в случая е траекторията на токовата тръба (на магнитния поток), когато сечението на тръбата клони към нула.

След възприемане на концепцията за напречно движение на силовите линии на магнитното поле със скорост \vec{v}_B , електромагнитната мощност пренесена през повърхност S в [4] е определена като:

$$\vec{P}_S = \int_S \left\{ V \cdot \vec{j}_t + (\vec{H} \cdot \vec{B}) \cdot \vec{v}_B \right\} d\vec{s}, \quad (5)$$

където V е електрическият потенциал в съответната точка от повърхността S .

При възприемане на тази концепция анализът на потока на енергия може да се разглежда в няколко насоки по отделно, а именно:

-пренос на енергия от потока на електричния ток (от електричното поле)

-пренос на енергия от потока на напречното движение на силовите линии на магнитното поле (от магнитното поле)

Превръщане на механична енергия в електрична енергия и обратно посредством електрично поле.

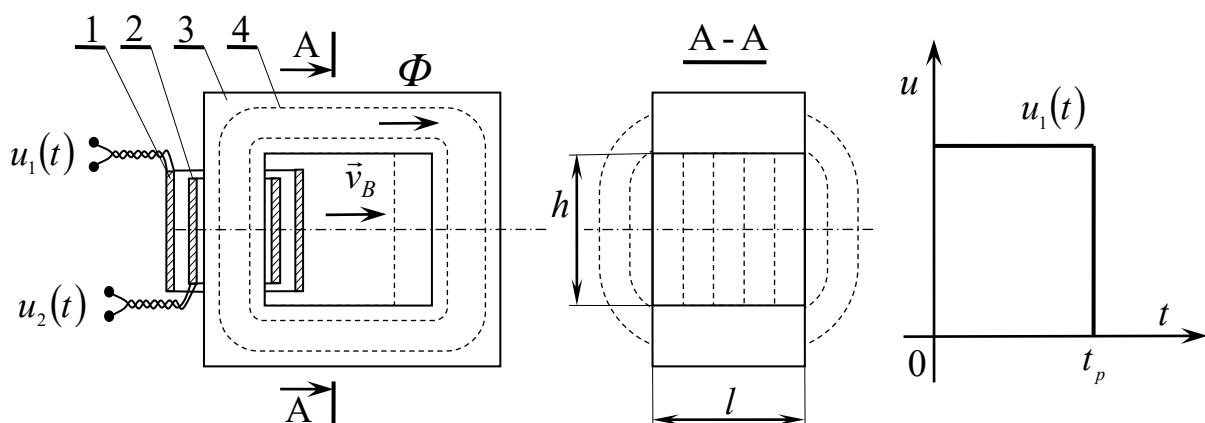
Превръщане на механична енергия в електрична енергия и обратно посредством магнитно поле.

Предаване на енергия от електричното поле на магнитното поле.

Предаване на енергия от магнитното поле на електричното поле.

Пренос на енергия само от електричното поле имаме в случай, когато магнитното поле в разглежданата област не се променя ($\vec{v}_B = 0$). Такъв е случаят при постоянен ток. Въпросът е разгледан в [5].

Пренос на енергия само от магнитното поле имаме в случай, когато в разглежданата област $\vec{j}_t = 0$ и електричното поле не се променя. Такъв е случаят при работата на импулсен трансформатор при правоъгълни импулси. На Фиг. 1 е показана конструкцията на такъв трансформатор. Той се състои от първична намотка 1 с n_1 на брой навивки, вторична намотка 2 с n_2 навивки и феритен магнитопровод 3 с ширина магнитопровода l и височина на отвора h . По време на импулса токът в първичната намотка нараства с постоянна скорост и индуцираното електрическо поле не се променя.



Фигура 1

При подаване на импулсно напрежение на първичната намотка, магнитният поток Φ започва да нараства от нула със скорост $u_1 = -d\Phi/dt$. При

положение, че пренебрегнем разсейването за опростяване на изразите, нарастването на магнитния поток в магнитопровода може да се изрази със скоростта \vec{v}_B на напречното движение на силовите линии в отвора на магнитопровода

$$d\Phi = Blv_B dt,$$

Където магнитната индукция \vec{B} , определена с израз $\vec{B} = n_1 i_1 \mu_0 / l$, ширината на магнитопровода l и скоростта \vec{v}_B в случая са взаимно перпендикулярни.

За модула на скоростта \vec{v}_B се получава

$$v_B = \frac{u_1}{Bl} \quad (6)$$

В интервала до следващия импулс на напрежението u_1 енергията на магнитното поле се прехвърля в намотката 2, като силовите линии отново пресичат отвора на магнитопровода в обратна посока.

При преместването си магнитното поле индуцира електрическо поле

$$\vec{E}_{ind} = (-\vec{v}_B) \times \vec{B}. \quad (7)$$

Мощността, постъпваща в първичната намотка на трансформатора е $p_1 = u_1 i_1$, При пренебрегване на загубите, цялата тази мощност се изразходва за създаване на магнитно поле. Механизмът на създаването на магнитното поле в съответствие с Фарадей и математичния модел [4] е, че силовите линии се пораждаат около елементарните възбудители на магнитен поток \vec{j} и се разширяват навън до заемане на съответното място в зависимост от конфигурацията на полето. В случая, с приближение може да се приеме, че в края на импулса цялото магнитно поле е съсредоточено в магнитопровода. За да попадне в магнитопровода силовата линия пресича отвора на магнитопровода със скорост \vec{v}_B . При пресичането на отвора, можем да се приеме с достатъчна точност, че цялата енергия на полето по протежение на една токова тръба е съсредоточена в областта на отвора. Напрегнатостта на магнитното поле в магнитопровода е μ_r пъти по-малка и при типично $\mu_r = 2000$ енергията в магнитопровода е по-малко от 0,1%. В случая напрегнатостта на магнитното поле е $H = i/h$, магнитната индукция $B = \mu_0 H$ и плътността на енергията на магнитното поле е $w' = \vec{H} \cdot \vec{B}$.

Изхождайки от (2) за обемната плътност на енергията на магнитното поле можем да определим мощността на енергийния поток пренасян от магнитното поле $p_m = u_1 i_1 = (H \cdot B) h l v_B$. В случая векторните величини са представени с техните модули. Плътността p'_m на мощността на пренасяната енергия е $p'_m = (H \cdot B) v_B$. Ако изразим последната формула с вектори се получава

$$\vec{p}'_m = (\vec{H} \cdot \vec{B}) \vec{v}_B \quad (8)$$

Във формула (7) плътността на мощността на пренасяната от магнитното поле енергия е описана със скоростта на напречно движение на силовите линии на магнитното поле. При анализа на редица конкретни ситуации се оказва че

има области с нулева магнитна индукция и там скоростта \vec{v}_B не може да бъде дефинирана.

При съпоставката на свойствата на електродинамиката и аеродинамиката Кастерин е доказал, че електродинамиката е тъждествена на аеродинамиката на свръх газ [6].

Резултантното магнитно поле е суперпозиция от магнитните полета на отделните възбудители. При проведените експериментални изследвания на електромагнитната индукция в области с нулева магнитна индукция [7] е показано е, че индуцираното резултантно електрическо поле е суперпозиция от индуцираните електрически полета от отделните възбудители и не е пряко свързано с резултантното магнитно поле. Докато (7) и (8) са валидни за проста конструкция с един възбудител, при повече възбудители изразите не са верни.

От друга страна индуцираното напрежение и пренасяната енергия от магнитното поле са свързани със скоростта на изменение на магнитното поле (на тока, който го създава). В (7) и (8) скоростта \vec{v}_B е косвено свързана с производната на тока. Следователно пренасянето на енергия от магнитното поле и индуцираното електрическо поле е редно да бъдат изразени с първата производна на възбуждащия ток (магнитен поток). Магнитното поле в този случай математически може да бъде представено с две съставки, едната пропорционална на тока и участва във формирането на резултантното магнитно поле и другата съставка е пропорционална на производната на тока и магнитното поле създадено от нея се разпространява във вакуум със скоростта на светлината c_0 .

Първата съставка определя магнитното поле, и участва в определянето на резултантното магнитно поле при повече възбудители. В такъв случай при примера, разгледан на Фиг.1 магнитното поле е $\vec{B} = n_1 i_1 \mu_0 / l$ (При всички изрази е прието, че \vec{B} и $H = i/h$ са еднородни в отвора на магнитопровода, което в случая не е точно така, но направеното приближение не е от принципно значение)

Втората съставка служи за определянето на индуцираното електрическо поле и преноса на енергия от магнитното поле. Ако се използва зависимостта $(d\Phi/dt) = L(di/dt) = B'lc_0$ за индукцията \vec{B}' от Фиг.1 се получава

$$\vec{B}' = \frac{L}{lc_0} \frac{di}{dt}, \quad (9)$$

където L е индуктивността на намотката 1.

Горната формула може да бъде обобщена за по-общ случай. Както се вижда в нея участва индуктивността L . Следствие на това в някои ситуации, например безкрайно дълъг прав проводник (и за участък от него) индуктивността е безкрайно голяма. Това води до теоретичен проблем и при определянето на L за движещ се самостоятелен заряд ($id\vec{l}$ и $q\vec{v}$). Вероятно с приближение може да се определи някаква стойност но тази индуктивност.

Плътноста p'_m на пренасяната мощност от магнитното поле в съответствие със (7) може да се определи така

$$\vec{p}'_m = (\vec{H} \cdot \vec{B}') \cdot \vec{c}_0, \quad (10)$$

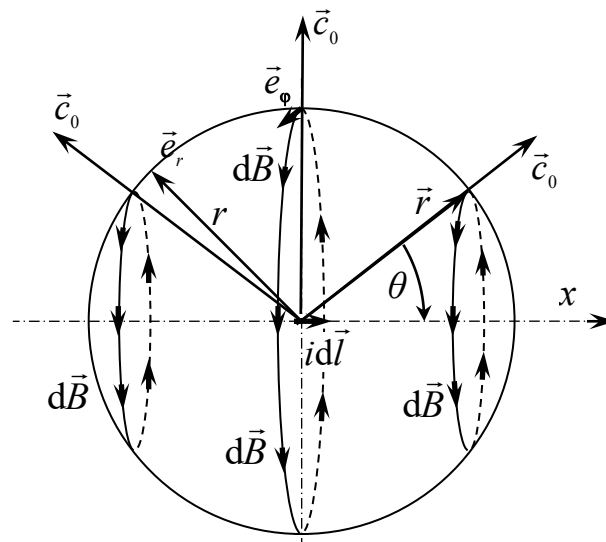
където за вакуум $\vec{H} = \vec{B}/\mu_0$.

Напрегнатостта на индуцираното електрическо поле за Фиг.1 е

$$\vec{E}_{\text{ind}} = (-c_0 \times \vec{B}'), \quad (11)$$

При анализът на по-сложни конфигурации, които съдържат по няколко променливи възбудители на магнитно поле разположени в линейна среда, може да се използва законът на Био –Савар-Лаплас по който чрез суперпозиция (интеграл) от магнитните полета на отделните токови елементи се получава резултантното магнитно поле.

Като се вземе предвид осевата и сферична симетрия на магнитното поле на токовия елемент $id\vec{l}$, може да се предположи, че силовите линии на магнитното поле се отдалечават от или приближават към токовия елемент радиално. Това е показано на Фиг.2.



Фигура 2

Магнитната индукция на токовия елемент се определя по закона на Био-Савар-Лаплас в съответствие с израза

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 id\vec{l}}{4\pi r^2} (\vec{e}_x \times \vec{e}_r) \quad \text{или} \quad d\vec{B} = \frac{\mu_0 id\vec{l} \sin\theta}{4\pi r^2} \vec{e}_\phi, \quad (11)$$

Където \vec{e}_x , \vec{e}_r и \vec{e}_ϕ ($\vec{e}_x \times \vec{e}_r = \sin\theta \vec{e}_\phi$) са единични вектори в съответствие с Фиг. 2.

За магнитната индукция \vec{B}' се получава

$$\vec{B}' = \frac{L di}{lc_0 dt} = \frac{L}{c_0 2\pi r \sin\theta} \frac{di}{dt} \vec{e}_\phi, \quad (12)$$

където $l = 2\pi r \sin \theta$ е дължината на съответната окръжност от сферата с радиус r .

Плътноста p'_m на пренасяната мощност от магнитното поле и напрегнатостта \vec{E}_{ind} на индуцираното електрическо поле се определят в съответствие с (10) и (11).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

От направените теоретични изследвания, базиращи се на предложен математичен модел и проведени експерименти в настоящия доклад са предложени концепции за определянето на напрегнатостта \vec{E}_{ind} на индуцираното електрично поле и плътността p'_m на пренасяната мощност от изменящо се магнитно поле. Подробно са анализирани процесите, свързани с електромагнитната индукция и преноса на енергия при импулсен трансформатор. В резултат на анализа са предложени математични изрази за определянето на разглежданите величини в общ случай, при наличие на повече от един възбудител. Описанието на процесите е направено като функция от скоростта на изменение на магнитното поле. Експерименталното потвърждение на валидността на предложените математични изрази ще даде възможност за усъвършенстване на редица устройства. Целесъобразно е в бъдеще провеждане на симулация на разглежданите процеси на базата на предложения модел.

4. ИЗПОЛЗВАНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] IEC 60050, International Electrotechnical Vocabulary (IEV): Area: 121: Electromagnetism, Section 121-11: Electromagnetic concepts and quantities. <http://www.electropedia.org/>
- [2] Н. Умов. Уравнения движения энергии в телах. Одеса. 1874г
- [3] J. H. Poynting. ON THE TRANSFER OF ENERGY IN THE ELECTROMAGNETIC FIELD. Phil. Trans. 175, 1884, pp 343-361.
- [4] Bozev I. Equations for electromagnetic induction in electromagnetism. Summer School Advanced Aspects of Theoretical Electrical Engineering, Sozopol-2012, 7-9.IX.2012
- [5] Борисов Р., Бозев Ив. Анализ на преноса на енергия в електрично поле. XXIII TELECOM' 2015, 15-16 October, NSTC, Sofia, Bulgaria.
- [6] Тамм И.Е. О работе Н. П. Кастерина по электродинамике и смежным вопросам. „Изв. АН СССР“, №3, 1937.
- [7] Бозев И. Математичен модел на електромагнитната индукция в области с нулева гъстота на магнитния поток. Национален форум „Електронни, информационни и комуникационни системи 2013“ 16 и 17 май, 2013г. Национален дом на науката и техниката. София.