

## EXPERIMENTAL STUDY ON ELECTROMAGNETIC INDUCTION OF AC IN AREAS WITH ZERO MAGNETIC FLUX DENSITY

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ЕЛЕКТРОМАГНИТНАТА ИНДУКЦИЯ ПРИ ПРОМЕНЛИВО НАПРЕЖЕНИЕ В ОБЛАСТИ С НУЛЕВА МАГНИТНА ИНДУКЦИЯ

**Ivan Stefanov Bozev\*, Radoslav Borislavov Borisov\*\***

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

\*\*Department of Microelectronics, Technical University of Sofia, Kl. Ohridski, Blvd., 1756 Sofia, E-mail: [radoslav.borisov@gmail.com](mailto:radoslav.borisov@gmail.com)

**Иван Стефанов. Бозев\*, Радослав Бориславов Борисов\*\***

\*Висше училище по телекомуникации и пощи", Катедра "Базисна подготовка", 1700, София, ул. "Академик Стефан Младенов" №1, България, E-mail: [IBozev@hctp.acad.bg](mailto:IBozev@hctp.acad.bg)

\*\* Технически Университет – София, Катедра „Микроелектроника“, 1756, София, Бул. „Св. Климент Охридски“ №8, България, E-mail: [radoslav.borisov@gmail.com](mailto:radoslav.borisov@gmail.com)

*Резюме – Докладът описва проведените експериментални изследвания на явлението електромагнитна индукция при променливо напрежение. Специфичното при изследванията е, че намотката, в която се индуцира напрежение изцяло лежи в област с нулева магнитна индукция. Получените резултати съвпадат с резултатите от предложението преди това математичен модел, който позволява описание на явлението в диференциален вид. На базата на предложението математичен модел са направени експериментални измервания на индуцираното напрежение в намотка при известно магнитно поле. Получена е картината на индуцираното поле. Като следствие от предложението математичен модел са показани особености при измерване на променливо магнитно поле с помощта на чувствителна намотка.*

*Abstract – The report describes experimental studies of the phenomenon of electromagnetic induction with an alternating voltage. Specific research on that coil, which induces a voltage in the area lies entirely with zero magnetic induction. These results coincide with the results of previously proposed mathematical model, which allows description of the phenomenon in a differential form. On the basis of proposals made mathematical model experimental measurements of induced voltage in the coil with a known magnetic field. Received a picture of the induced field. As a consequence of the proposed mathematical model shows characteristics when measuring variable influence magnetic field using a sensitive coil.*

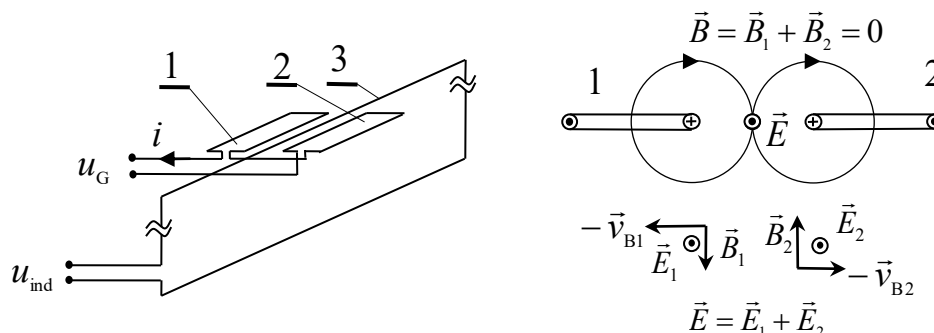
**Keywords:** *electromagnetic induction, magnetic induction, alternating voltage.*

## 1. УВОД

Електромагнитната индукция е фундаментално явление, участващо в взаимодействието между материалните тела на всички нива, от взаимодействия в атома до взаимодействия между галактики. Изучаването на явлението стои в основата на развитието на науката. Основните постижения в областта на електротехниката се обобщават в стандартите на Международната електротехническа комисия [1]. Този доклад е посветен на преодоляване на редица противоречия при описанието на явлението електромагнитна индукция. В поредица публикации указани в [2] са разгледани основни несъответствия в описанието електромагнитната индукция и са направени експериментални изследвания за тяхното изясняване. В случая за потвърждаване вида на диференциалното описание на електромагнитната индукция на базата на съответствието между интегралното описание на електромагнитната индукция по формулата на Максвел и диференциалното описание в съответствие с теоремата на Стокс са направени експериментални изследвания при специфично разположение на възбудителните намотки на магнитното поле и намотка в която се индуцира напрежение. Анализът на получените експериментални резултати е използван за намаляване на несъответствията в описанието на това явление и подобряване на предложения в [3] математичен модел.

## 2. ИЗЛОЖЕНИЕ

За постигане на целите, посочени по-горе на Фиг.1 е показана реализираната експериментална постановка, съдържаща две намотки 1 и 2, през които протича един и същи променлив синусоиден ток  $i$ , и трета намотка 3 в която се индуцира променливо напрежение  $u_{ind}$ . Намотките 1 и 2 са с размери 50 x 15 mm Третата намотка е с размери 250 x 250 mm, който значително превишават размерите на възбудителните намотки. Специфичното в случая е, че намотките 1 и 2 лежат в една равнина, както е показано на Фиг.1. Намотката 3 е разположена в равнината на симетрия, която е перпендикулярна на



Фигура 1

равнината на намотките 1 и 2 и минава между намотките така, че те да представляват огледален образ една на друга. Едната страна на намотката 3 е

разположена върху правата на пресичане на двете равнини. Следствие геометричната симетрия и значително по големите размери на намотка 3, тя се намира в област с нулева магнитна индукция.

Основният проблем който се разглежда в случая е връзката между интегралния и диференциалния вид на формулите за електромагнитната индукция

$$u_{\text{ind}} = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_s}{dt}, \quad (1)$$

където  $u_{\text{ind}}$  е индуцираното напрежение в намотката 3,  $\vec{E}$  е напрегнатостта на индуцираното магнитно поле в намотка 3,  $d\vec{l}$  е диференциал от дължината на проводника (на намотка 3),  $\vec{B}$  е магнитната индукция,  $d\vec{s}$  е диференциал от повърхността S, пробождавана от  $\vec{B}$  и  $d\Phi_s$  е диференциал от магнитния поток, преминаващ през повърхността S (S е площта на намотка 3).

Изхождайки от формулата за индуцираното напрежение в интегрален вид

$$u_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi_s}{dt}, \quad (2)$$

след като се определи взаимната индуктивност между намотките не е проблем изчисляването на индуцираното напрежение в намотката 3. В случая е проблематично описанието на явлението в диференциален вид, в съответствие с формулата

$$u_{\text{ind}} = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l}. \quad (3)$$

В официалната литература такова описание не се дава. От друга страна физическите взаимодействия в познатите процеси не се извършват от разстояние, следователно трябва да има диференциално описание на явлението.

В [3] е предложен математичен модел на основата на ново свойство на магнитното поле, а именно изменението на полето да става с напречно преместване на силовите линии. Като се отчете това свойство на магнитното поле, за напрегнатостта  $\vec{E}$  на индуцираното електрическо поле в дадена точка от пространството е предложена формулата [3]

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = \oint_C (-\vec{v}_B) \times \vec{B} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_s}{dt} \quad (4)$$

В [4] са разгледани теоретично случаи, при които съществува електромагнитна индукция при магнитна индукция равна на нула, но в този случай трудно може да се провери експериментално верността на предложения математичен модел. Предложената експериментална постановка дава възможност да се измери индуцираното напрежение  $u_{\text{ind}}$  в намотката 3 при условието на нулева магнитна индукция по цялото протежение на намотката.

При първия експеримент се определя индуцираното напрежение в намотката 3 в резултат на действието на възбудителна намотка 1. Разстоянието между двете намотки е 5 mm и разположението е като на Фиг. 1. Измерването е направено за пет стойности на възбудителното напрежение на изводите на намотката 1. Получените резултати са дадени в Таблица 1. Направени са допълнителни измервания за доказване на факта, че размерите на намотката 3

Таблица 1

$u_G$	V	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
$u_{ind1}$	mV	29	43	56	72	86	97	110
$u_{ind2}$	mV	31	46	58	77	94	101	120
$u_{ind}$	mV	62	91	58	142	182	204	220
$f = 200$ kHz, $u_G$ – напрежение на намотка, разстояние между бобините 1-3 (2-3) – 5 mm.								

са достатъчно големи по отношение на размерите на намотката 1 и преместването на намотката 1 успоредно на близката страна на намотката 3 не променя резултатите. При второто изследване е определено индуцираното напрежение от намотка 2 и резултатите са нанесени в същата таблица. Тези резултати по принцип са ясни, но се правят за калибриране на експерименталната постановка. В таблица 1 са нанесени и резултатите от измерванията на напрежението  $u_{ind}$  на намотката 3, при което намотките са свързани последователно и са така разположени, че магнитната индукция по протежението на намотка 3 е равна на нула (Фиг.1). Измерванията при първите два опита са извършени при същото положение на съответните намотки 1 и 2. От резултатите се вижда, че индуцираното напрежение в намотката 3 е сума от напреженията индуцирани от двете намотки, когато те работят самостоятелно. Това води до заключението, че двете магнитни полета от възбудителните намотки формират общо магнитно поле, което е суперпозиция магнитните полета на тези намотки. Напрегнатостта на електричното поле  $\vec{E}$  от електромагнитната индукция не се формира от резултантното магнитно поле, а от независимото действие на двете магнитни полета по отделно. Това може да бъде записано така

$$\vec{B} = \sum \vec{B}_i ; (\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2), \quad (5)$$

което означава, че резултантното магнитно поле е сума от полетата на двете намотки. Това е известно.

За напрегнатостта на индуцираното електрическо поле  $\vec{E}$  и за измереното напрежение  $u_{ind}$  са валидни равенствата

$$u_{ind} = \sum u_{ind i} \quad (6)$$

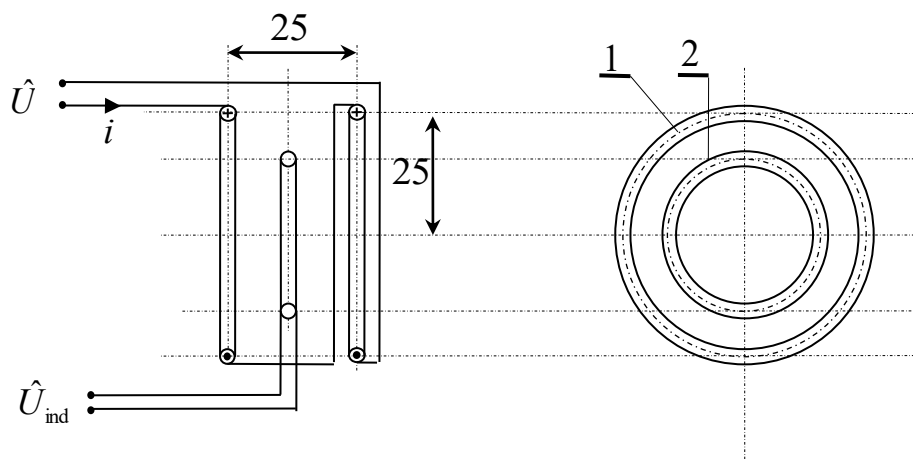
и

$$\vec{E} = \sum \vec{E}_i ; (\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = (-\vec{v}_{B1} \times \vec{B}_1) + (-\vec{v}_{B2} \times \vec{B}_2)), \quad (7)$$

от което следва, че напрегнатостта  $\vec{E}$  не е пряка функция на магнитната индукция и се формира от независимото действие на отделните възбудители на магнитното поле. В случая специалното разположение на намотките осигурява векторите изобразяващи магнитната индукция, породени от двете намотки да са противоположни и резултантното магнитно поле е нула (Фиг.1). В същото време векторите на напрегнатостта  $\vec{E}$  възбудени от двете намотки са съпосочни [4] и измереното напрежение е два пъти по голямо от напрежението на едната намотка.

В резултат от проведения анализ на резултатите може да се каже, че предложени математичен модел [3] дава диференциално описание на явлението електромагнитна индукция.

Практичен интерес представлява анализът на индуцираното напрежение в бобина, поместена в известно магнитно поле. Такива бобини масово се използват в измервателната техника за анализ на променливи магнитни полета. При експерименталното изследване е използвана Хелмхолцова бобина 1 за създаване на сравнително равномерно поле. Размерите на бобината са 50x25 mm и двете намотки на бобината са по 25 навивки. Захранването на бобината е със 1MHz 8V. При първия експеримент е измерено индуцираното напрежение  $\hat{U}_{ind}$  в кръгла бобина 2, съдържаща 1 навивка и разположена съсно с бобината на Хелмхолц в равнината на симетрия между двете съставни бобини (Фиг. 2). Измервания са направени за бобини с различен диаметър в



Фигура 2

съответствие с Таблица 2, където са посочени получените резултати.

От резултатите се вижда, че напрежението нараства пропорционално на квадрата на радиуса на чувствителната бобина, което съответства на обхванатия магнитен поток. Поради пълната симетрия на експерименталната постановка, може да се приеме, че напрегнатостта  $\vec{E}_{ind}$  на полето от електромагнитната индукция е равномерно разпределена по протежение на измервателната бобина. Графиката на зависимостта на  $\vec{E}_{ind}$  е показана на Фиг. 3.

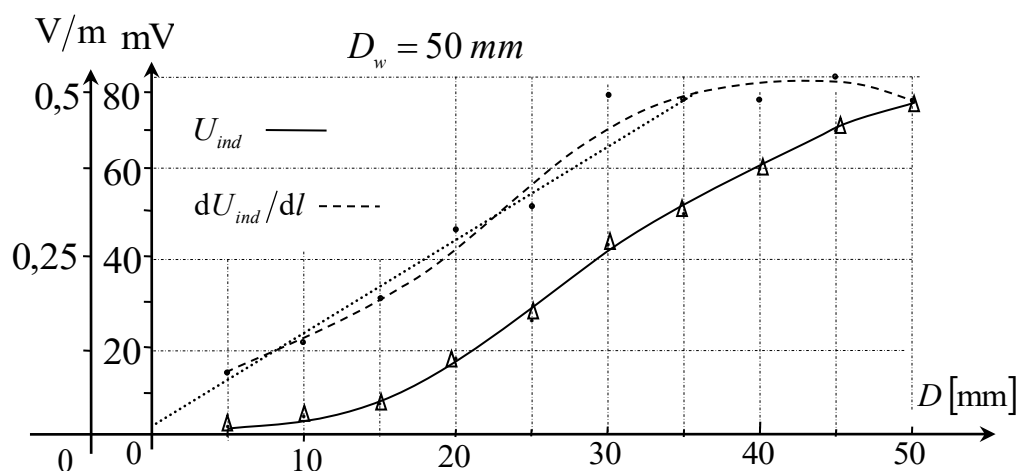
Този резултат съвпада и с предложения модел за определяне на  $\vec{E}_{ind}$  с помощта на напречно движение на силовите линии на магнитното поле.

Таблица 2

$D$	Обхват	деления	$\hat{U}_{ind}$	$l=\pi D$	$dU_{ind}/dl$	$S$
mm	mV/cm	cm	mV	mm	V/m	cm <sup>2</sup>
5	5	0,3	1,5	15,7	0,095	0,196
10	5	0,8	4	31,4	0,127	0,785
15	5	1,6	8	47,1	0,170	1,77
20	5	3,5	17,5	62,8	0,28	3,14
25	10	2,5	25	78,5	0,318	4,91
30	20	2,2	44	94,2	0,48	7,06
35	20	2,5	50	110	0,46	9,62
40	20	3,0	60	126	0,47	12,57
45	20	3,5	70	141	0,5	15,9
48	20	3,8	76	157	0,48	19,63

$S=1385\text{mm}^2$   $D$  бобина = 50 mm,  $w = 2 \times 25$  нав.,  $f = 1$  MHz,  $\hat{U} = 8$  V.

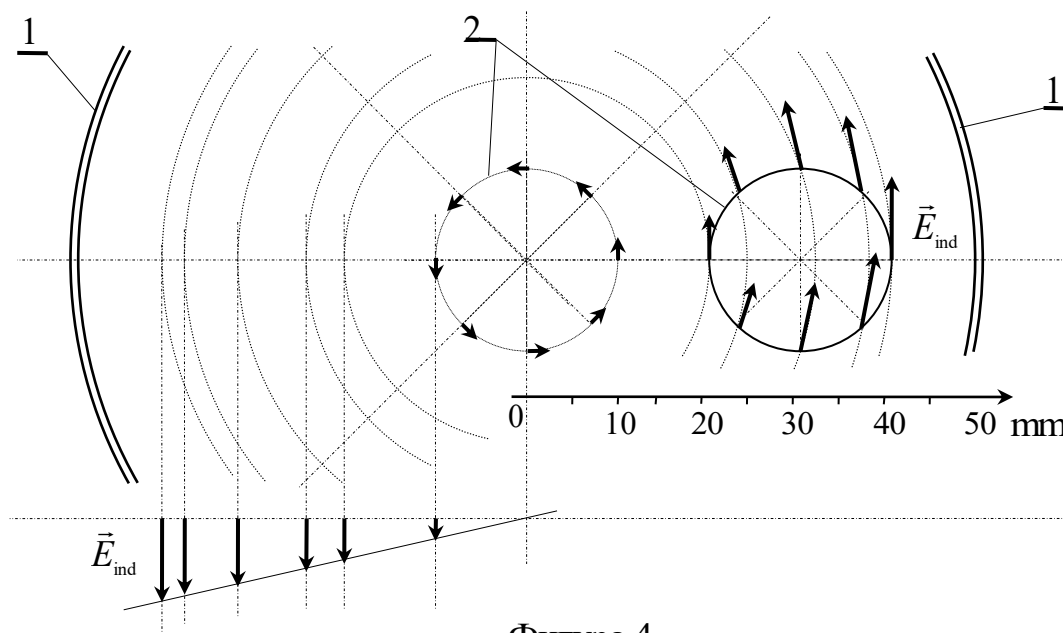
Направено е също така измерване на напрежението, индуцирано в чувствителна намотка с относително малък диаметър по отношение на възбудителната намотка при различно положение на чувствителната намотка. За намотка с диаметър 10 mm при преместването на намотката в плоскостта на симетрия, индуцираното напрежение в намотката варира не повече от 10% от напрежението в Таблица 2.



Фигура 3

От Фиг. 4 ясно се вижда, че независимо от приблизително еднаквото напрежение на намотката при двете показани положения, напрегнатостта на индуцираното електрическото поле  $\vec{E}_{ind}$  по протежение на чувствителната

намотка 2 силно се различава в зависимост от нейното положение по отношение на възбудителната намотка 1. Подобни малки намотки се използват



Фигура 4

много често за измерване на променливи магнитни полета. От напрежението, индуцирано в тях единствено може да се съди за големината на магнитното поле, без да се знае нищо за посоката на напречното движение на силовите линии. Това е важно при анализа на резултатите от измерванията, особено в близката област на излъчващите антени, защото там антената е устройство с разпределени параметри и ефектите от напречното движение на магнитното поле са най-силни.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящия доклад са представени и анализирани резултати от експериментални изследвания, проведени с цел потвърждаване на предложението в [3] математичен модел. Направеният анализ не намира противоречия с предложението модел. Резултатите могат да бъдат използвани при анализа на променливи магнитни полета, изследвани с помощта на измерителна бобина.

### 4. REFERENCES

- [1] IEC 60050, International Electrotechnical Vocabulary (IEV): Area: 121: Electromagnetism, Section 121-11: Electromagnetic concepts and quantities. <http://www.electropedia.org/>
- [2] Бозев И. Обзор на методите за експериментално определяне на напрегнатостта на електрическото поле при бобина с магнитопровод. Национална конференция с международно участие „Електроника 2014“, 15 май 2014, Национален дом на науката и техниката. София.

- [3] Bozev I. Equations for electromagnetic induction in electromagnetism. Summer School Advanced Aspects of Theoretical Electrical Engineering, Sozopol-2012 , 7-9.IX.2012
- [4] 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.
- [5] Borisov R. Low cost near-field scanner for RF measurements. Национална конференция с международно участие „Електроника 2014“, 15 май 2014, Национален дом на науката и техниката. София.