

Нов математичен модел за анализ на скин ефекта и "proximity" ефекта

Ivan Stefanov BOZEV*, Radoslav Borislavov BORISOV**

* 2129, с. Равно поле, ул. Пет могили №1, София област. e-mail: ibozev@abv.bg

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

Резюме. Скин ефектът и "proximity" ефектът са явления, които предизвикват неравномерно разпределение на плътността на протичащия в проводник променлив електричен ток. Това води до увеличаване на активното съпротивление на проводника и намаляване на неговата индуктивност. При неравномерното разпределение на плътността на електричния ток активните загуби се увеличават. Анализът на тези явления е от първостепенно значение при разработката на електротехнически и електронни изделия. В този доклад е използван нов математически модел за анализ на тези явления. Моделът дава по-ясна физична представа за протичащите явления при преразпределението на плътността на електричния ток и възможност с помощта на опростен математичен апарат да се получат достатъчно точни за практиката резултати. В доклада е направен анализ на ефектите при единичен проводник, еднослойна и многослойна бобина.

New mathematical model for skin effect analysis and proximity effect (Ivan Stefanov Bozev, Radoslav Borislavov Borisov). The skin effect and the proximity effect are phenomena that cause uneven distribution of the density of the conductive variable electric current. This leads to an increase of the active resistance of the conductor and a reduction of its inductance. In the unequal distribution of the current density, the active losses increase. In the unequal distribution of the current density, the active losses increase. The analysis of these phenomena is of paramount importance in the development of electrical and electronic products. This report uses a new mathematical model to analyze these phenomena. The model gives a clearer physical idea of the current phenomenon of redistribution of the electrical current density and the possibility to obtain, with the help of a simple mathematical apparatus, results that are sufficiently precise for the practice. The report provides an analysis of single wire, single and multilayer coil effects.

Увод

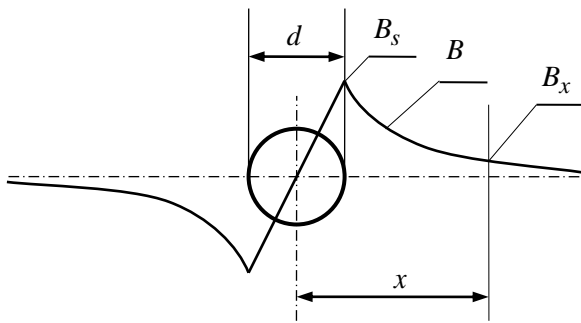
Скин ефектът и "proximity" ефектът са явления, които с повишаване на използваните честоти в електротехническите и електронните изделия придобиват все по-голямо значение. Като термини в областта на електротехниката са дефинирани в стандарта IEC 60050 [1]. За анализът им са развити различни математични модели [2], [3], [4]. Най-често се използват числови методи (метод на крайните елементи), или на експериментално получени формули. Основния недостатък на тези

методи е, че не дават ясна физична връзка между причината, пораждаща съответния ефект и получения резултат. В настоящия доклад е направен анализ на скин ефекта и "proximity" ефекта с помощта на предложения в [5], [6] математичен модел на електромагнитното поле. Характерното за модела е, че дава възможност да бъде определена директно индуцираната напрегнатост на електричното поле \vec{E}_m в резултат на изменение на магнитното поле. В случая е направен анализ за определянето на скин ефекта при единичен проводник и съвместното проявление на скин ефекта и

"proximity" ефекта при еднослойна и многослойна намотка с цел да се докаже правилността на математичния модел.

Определяне на скин ефекта при цилиндричен кръгъл проводник

На фигура 1 е показано напречното сечение на цилиндричен кръгъл проводник с диаметър d .



Фигура 1

Когато през проводника протича ток i , в пространството около проводника се създава магнитно поле. При протичане на постоянен ток през проводника, големината на магнитната индукция B в зависимост от разстоянието x до центъра на проводника е показана на фигурата.

При анализа се има предвид, че токовете линии са успоредни на оста на проводника и ток в радиална посока не протича.

Цялото пространство може да бъде разделено на три зони, които формират индуктивността на проводника (предполага се осева симетрия). Първата зона с индуктивност L_V при постоянен ток обхваща обема на проводника.

$$(1) \quad L_V = \frac{\Phi_V}{i} = \frac{\mu_0 l}{4\pi},$$

където Φ_V е магнитния поток в обема на проводника.

При постоянен ток за проводник с диаметър 1 mm при ток 1 A в обема на проводника магнитният поток е $\Phi_V = 10^{-7} \text{Wb/m}$. Индуктивността на цилиндричен проводник при постоянен ток, дължаща се на магнитния поток в обема на проводника, не зависи от неговият диаметър и е $L_V = 10^{-7} \text{H/m}$.

Индуктивността на проводника L_V , дължаща се на магнитния поток в неговия обем се променя в зависимост от разпределението на плътността на тока в проводника.

Втората зона с индуктивност $L_{Sn} = \frac{\Phi_{Sn}}{i}$ обхваща

пространството непосредствено около проводника. Магнитната индукция в тази зона, възбудена от токът в проводника се определя в съответствие с изрази

$$(2) \quad \vec{B}_x = \frac{\vec{B}_s}{x},$$

Където \vec{B}_s е магнитната индукция на повърхността на проводника и \vec{B}_x е магнитната индукция на разстояние x от проводника.

Стойността на индуктивността на втората зона е константна величина. Тя не зависи от разпределението на плътността на тока в проводника.

Пространството извън тази зона има индуктивност $L_{Sf} = \frac{\Phi_{Sf}}{i}$. Стойността на тази индуктивност

зависи от конструкцията на съответния елемент и обикновено е по-голяма от останалите. При коаксиален кабел индуктивността на зоната извън външния проводник е равна на нула.

Индуктивността на проводника $L_S = L_{Sn} + L_{Sf}$, обусловена от пространството извън проводника е константна величина и не зависи от разпределението на тока в проводника (при осева симетрия).

В съответствие с предложения в [5], [6] и други публикации, цитирани в [6] математичен модел за анализ на електромагнитното поле, може да се определи индуцираната напрегнатост на електричното поле \vec{E}_μ в проводника и пространството около него в съответствие с изрази

$$(3) \quad \vec{E}_{\mu Sx} = -\frac{1}{l} \frac{d\Phi_{Sx}}{dt} = -\frac{1}{l} L_{Sx} \frac{di}{dt},$$

където Φ_{Sx} е магнитния поток извън цилиндъра, с ос, съвпадаща с оста на проводника и преминаващ през точката x . Индуктивността L_{Sx} съответства на пространството извън цилиндъра.

Счита се, че магнитният поток се създава от елементарните възбудители $\vec{j}dV$ и при нарастване се разпространява навън. С dV е обозначен елементарния обем. В разглеждания случай на цилиндричен проводник в резултат на наслагването на отделните елементарни магнитни потоци се стига до решение, при което формално целият магнитен поток се създава в центъра на проводника и при нарастване се разпространява навън при което при движението си в пространството магнитното поле индуцира \vec{E}_μ . При създаването си

целият магнитен поток пресича оста на проводника.

Поради осевата симетрия индуцираната напрегнатост на електричното поле \vec{E}_μ е успоредна на оста на проводника.

По оста на проводника индуцираната напрегнатост на електричното поле $\vec{E}_{\mu 0}$ е най голяма и в нея участва изменението на целия магнитен поток.

При скорост на изменение на тока през проводника $di/dt = 10^5 \text{ s}^{-1}$, което съответства приблизително на синусоидален режим с честота 15 kHz, за стойността на индуцираната напрегнатост на електричното поле $\vec{E}_{\mu V 0}$ по оста на проводника ($x = 0$), следствие на изменението на магнитния поток в обема на проводника се получава

$$(4) \quad \vec{E}_{\mu V 0} = L_V \frac{di}{dt} = \frac{d\Phi_V}{dt} = (10^{-7})10^5 = 10^{-2} \text{ V/m}.$$

Изразът за магнитния поток в пространството между точката x и повърхността на проводника се определя от зависимостта

$$(5) \quad \Phi_{Vx} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} i(1^2 - x^2) = \Phi_V (1 - x^2).$$

$$(6) \quad \vec{E}_{\mu Vx} = \frac{d\Phi_{Vx}}{dt} = \frac{d\Phi_V}{dt} (1 - x^2) = \vec{E}_{\mu V 0} [(1 - x^2)].$$

В горните изрази x е изразен в относителни единици по отношение на радиуса на проводника ($d/2$).

В таблица 1 са дадени данни за индуцираната от магнитния поток Φ_{Vx} напрегнатост на електричното поле $\vec{E}_{\mu Vx}$ в обема на проводника в зависимост от разстоянието x до центъра на проводника. За удобство резултатите са дадени в относителни единици. Както беше казано по горе, в индуцирането на напрегнатост на електричното поле по оста на проводника $\vec{E}_{\mu V 0}$ участва целият магнитен поток, а на разстояние x от центъра на проводника участва потокът извън цилиндъра, преминаващ през x .

Таблица 1

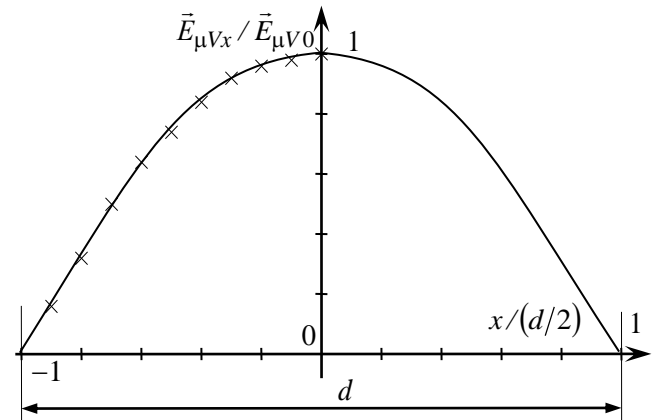
| | | | | | | |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|
| $x/(d/2)$ | 0 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| $E_{\mu Vx}/E_{\mu V 0}$ | 1 | 0,99 | 0,96 | 0,91 | 0,84 | 0,75 |
| $x/(d/2)$ | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | |
| $E_{\mu Vx}/E_{\mu V 0}$ | 0,64 | 0,51 | 0,36 | 0,19 | 0 | |

На фигура 2 е показано разпределението на напрегнатостта на електричното поле в обема на проводника $\vec{E}_{\mu Vx}$ индуцирана от магнитният по-

ток в обема на проводника. Графиката е начертана в относителни единици $E_{\mu Vx}/E_{\mu V 0}$.

В таблица 2 са дадени стойностите на индуцираната напрегнатост на електричното поле $\vec{E}_{\mu Sx}$ в зависимост от разстоянието x до центъра на проводника. И тук за удобство се използват относителни единици.

$$(7) \quad \vec{E}_{\mu Sx} = \vec{E}_{\mu V 0} (\ln(x) - \ln(1))$$

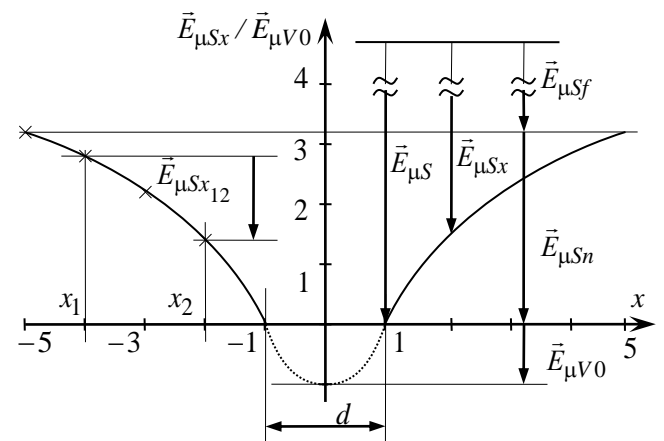


Фигура 2

Таблица 2

| | | | | | | |
|--------------------------|------|------|------|------|------|------|
| $x/(d/2)$ | 1,0 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 |
| $E_{\mu Sx}/E_{\mu V 0}$ | 0.0 | 0.19 | 0.36 | 0.52 | 0.67 | 0.81 |
| $x/(d/2)$ | 1,7 | 2 | 2,5 | 3 | 4 | 5 |
| $E_{\mu Sx}/E_{\mu V 0}$ | 1.06 | 1.38 | 1.83 | 2.19 | 2.77 | 3.21 |
| $x/(d/2)$ | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 20 |
| $E_{\mu Sx}/E_{\mu V 0}$ | 3.58 | 3.89 | 4.15 | 4.39 | 4.60 | 5.99 |

На фигура 3 е показано разпределението на напрегнатостта на електричното поле в цялото пространство, вътре и извън проводника.



Фигура 3

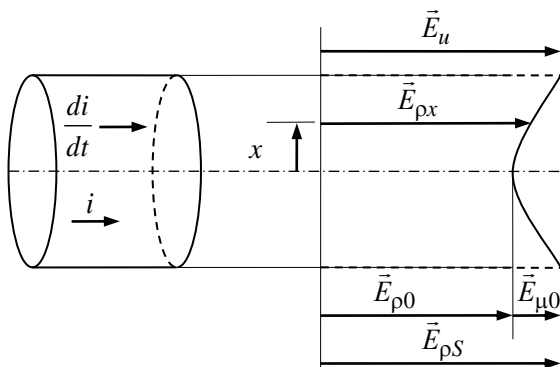
В близката зона на проводника е показано как може да се определи разликата между индуцираната напрегнатост на електричното поле в точките x_1 и x_2 .

$$(8) \quad \Delta \vec{E}_{\mu Sx_{12}} = \vec{E}_{\mu Sx_1} - \vec{E}_{\mu Sx_2} .$$

При изчисление на разликата $\Delta \vec{E}_{\mu Sx_{12}}$ може да се приеме, че магнитния поток извън точката x_1 е равен на нула.

При скин ефекта се анализира влиянието на индуцираната напрегнатост на електричното поле \vec{E}_{μ} , която води до преразпределение на плътността на тока в обема на проводника. Изменението на магнитния поток извън обема на проводника индуцира еднаква напрегнатост на електричното поле \vec{E}_{μ} в обема на проводника. Това не води до преразпределение на плътността на тока в проводника и не е необходимо да се разглежда в анализа за скин ефекта .

На фигура 4 е показано разпределението на напрегнатостта на електричното поле \vec{E}_{ρ} , \vec{E}_{μ} и \vec{E}_u при положителна производна на тока.



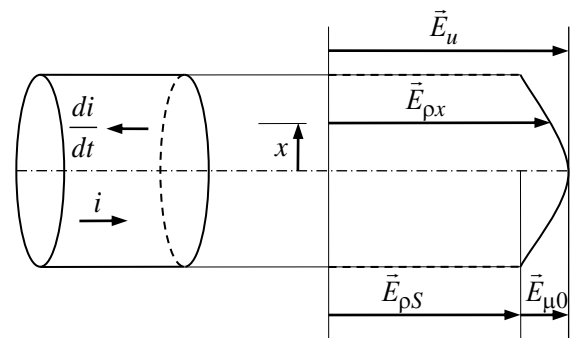
Фигура 4

Напрегнатостта на електричното поле \vec{E}_u се създава от външен източник и е необходима за преминаването на тока през проводника. В съответствие с закона на Ом може да се запише

$$(9) \quad \vec{E}_{ux} = \vec{E}_{\rho x} + \vec{E}_{\mu x} = \vec{j}_x \rho + \vec{E}_{\mu x} .$$

При отрицателна производна на тока, посоката на \vec{E}_{μ} става положителна. Тя е по посока на \vec{E}_{ρ} и увеличава плътността на тока в центъра на проводника. Този случай е показан на фигура 5. Трябва да се обърне внимание, че формата на графиката на \vec{E}_{μ} зависи и от началните условия.

Интерес представлява анализът на процеса при синусоиден режим, за да се определи кога токът в проводника има по висока плътност в центъра отколкото на повърхността на проводника. За полесен и разбираем анализ се разглежда проводник, съставен от две части, вътрешна и външна, които имат еднакви сечения. За меден проводник ($\rho = 0,017 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$) с диаметър $d = 1 \text{ mm}$ вътрешният проводник е с диаметър $d_i = 0,707 \text{ mm}$, съпротивление $R_1 = 0,0067 \Omega/\text{m}$, индуктивност $L_{1V} = 34.7 \text{ nH/m}$, съответстваща на пространството между двата проводника и L_{S1} за пространството извън външния проводник. Външният проводник е с параметри $R_2 = R_1 = 0,0067 \Omega/\text{m}$ $L_{S2} = L_{S1} = L_S$. Магнитният поток извън външния проводник е общ за двата проводника и взаимната магнитна индукция е $M_{12} = M_{21} = L_S$.



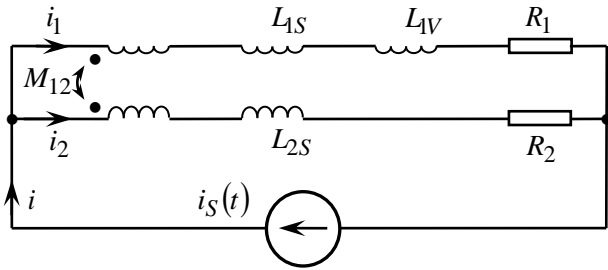
Фигура 5

Еквивалентната електрическа верига е представена на фигура 6. След изключване на взаимната индуктивност се получава еквивалентната верига от фигура 7.

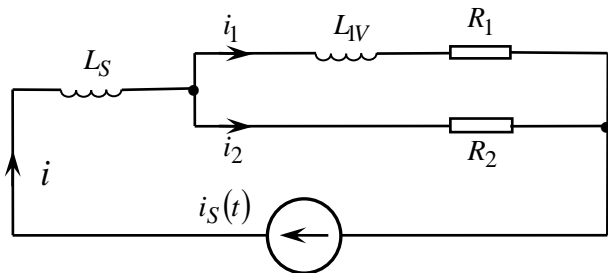
Характеристичната ъглова честота ω_c на клонна, съдържащ елементите R_1 и L_{1V} е

$$(10) \quad \omega_c = \frac{R}{L} = \frac{6,7 \times 10^{-3}}{34,7 \times 10^{-9}} = 193 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$$

и характеристичната честота е 30.7 kHz.



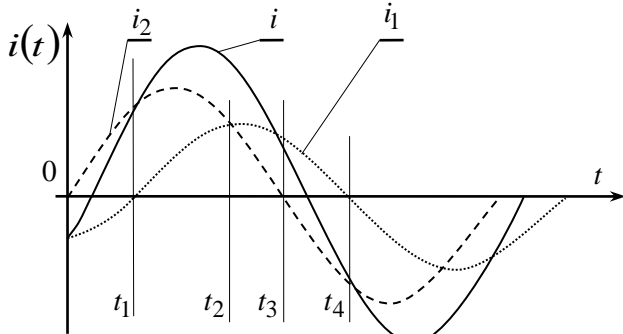
Фигура 6



Фигура 7

На Фигура 8 са показани графиките на токовете при синусодален режим с честота равна на характеристикната,

Както се вижда от фигурата токовете във външния и вътрешния проводник са дефазирани на $\pi/4$. В интервала от време $t_1 - t_2$ токовете i_1 и i_2 имат еднаква посока и токът i_2 е по-голям от тока i_1 . В интервала $t_2 - t_3$ токовете i_1 и i_2 имат еднаква посока и токът i_2 е по-малък от тока i_1 . В интервала $t_3 - t_4$ токовете i_1 и i_2 са с различни посоки.

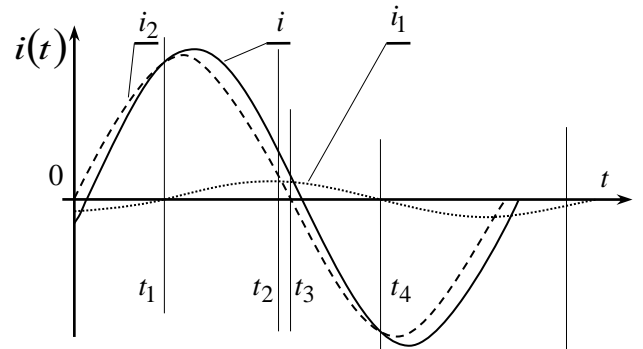


Фигура 8

В съответствие с фигура 4 и фигура 5 при нарастване на тока, следствие на по-голямата индуцирана напрегнатост на електричното поле $\vec{E}_{\mu 0}$ в центъра на проводника, токът протича главно по периферията му защото за възбуждането на ток по периферията се изисква по-малко енергия. При отрицателна производна първо намалява токът по периферията на проводника а изменението в центъра е със закъснение. Това, че в рамките на периода в определени интервали токът i_1 е по-голям от

тока i_2 не противоречи на това, че ефективната стойност I_2 е по-голяма от I_1 . При синусодален режим разпределението на плътността на тока е по отношение на неговата ефективна стойност.

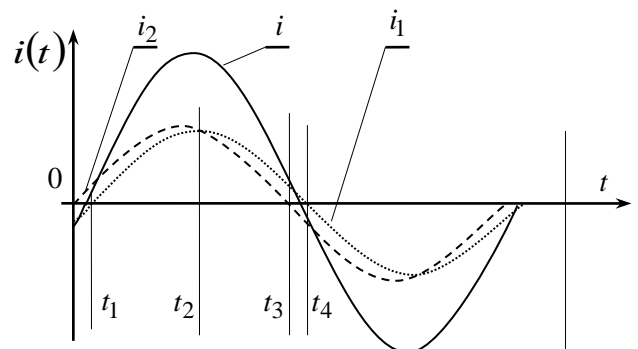
На фигура 9 са показани токовете при десет пъти по голяма честота от характеристикната. Фазовия ъгъл между токовете I_1 и I_2 е 84° и токът I_1 е десет пъти по малък от тока I_2 .



Фигура 9

В интервала от време $t_1 - t_2$ токовете i_1 и i_2 имат еднаква посока и токът i_2 е по-голям от тока i_1 . В интервала $t_2 - t_3$ токовете i_1 и i_2 имат еднаква посока и токът i_2 е по-малък от тока i_1 . В интервала $t_3 - t_4$ токовете i_1 и i_2 са с различни посоки. По отношение на фигура 8 се вижда, че интервала $t_2 - t_3$ е силно стеснен.

При честота десет пъти по малка от характеристикната, графиките на токовете са показани на фигура 8. Фазовия ъгъл между токовете I_1 и I_2 е



Фигура 10

е 6° и токът I_1 е почти равен на тока I_2 ($I_1 \approx 0,99 I_2$). И тук в интервалите $t_1 - t_2, t_2 - t_3$ и $t_3 - t_4$ съотношението между токовете i_1 и i_2 е както при фигура 8 и фигура 9. В настоящия случай интервалът $t_2 - t_3$ е най-широк (по отношение на предишните два случая) и той съответства на случая, когато токът i_1 в центъра на проводника е по-голям от тока i_2 по повърхността на проводни-

ка.

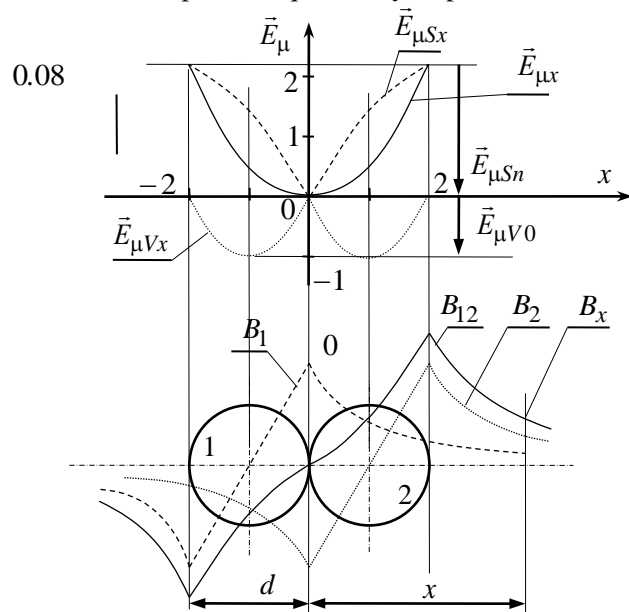
С помощта на получените зависимости до тук е възможно да бъде определен скин ефекта при относително бавно изменение на тока по отношение на характеристикната честота на проводника. За определяне на тока при по-бързо изменящ се ток е необходимо да се отчете преразпределението на тока.

Предложения модел е подходящ за определяне загубите в проводника при импулсен режим. В тези случаи са известни началните условия и се определя отделената енергия за загреване на проводника за един преход.

Определяне “proximity” ефекта при два доближени проводника с един и същи ток

На фигура 11 са показани два проводника, през които протича един и същи ток.

Съответно B_1 и B_2 са магнитните индукции в равнината минаваща през центровете на проводниците 1 и 2. Резултантната магнитна индукция е B_{12} . Максималната стойност на B_{12} е с $1/3$ по-голяма от максималната стойност на B_1 . Анализ за определянето на разпределението на плътността на тока в проводниците се прави чрез суперпозиция на скин ефекта и “proximity” ефекта.



Фигура 11

Скин ефекта се поражда от напрегнатостта на електричното поле $\vec{E}_{\mu Vx}$, която е показана с линия от точки. Максималната стойност на $\vec{E}_{\mu Vx}$ е $\vec{E}_{\mu 0}$ и съвпада с центровете на проводниците. Стойността на $\vec{E}_{\mu 0}$ е приета за единица при опре-

деляне на останалите сродни величини.

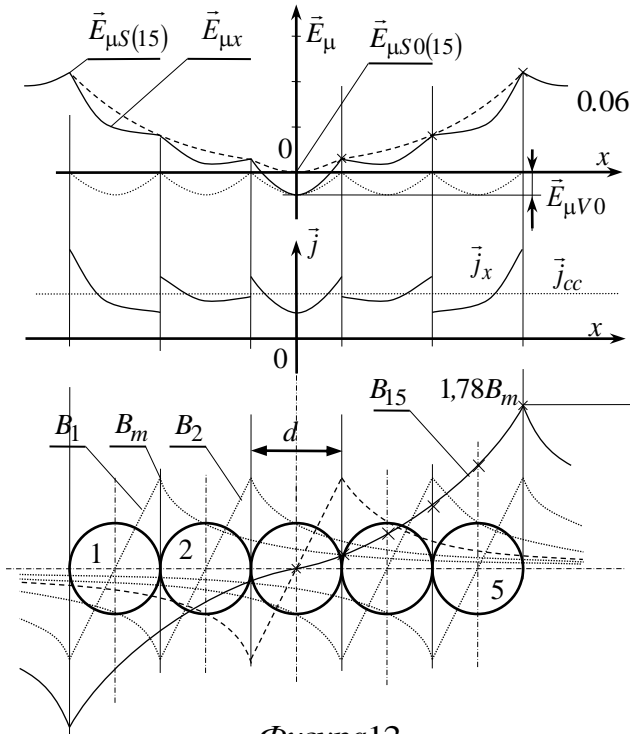
Напрегнатостта на електричното поле $\vec{E}_{\mu Sx}$ поражда “proximity” ефекта е показана с прекъснатата линия. В точката на допирането на двата проводника $\vec{E}_{\mu Sx} = 0$, в центровете на проводниците $\vec{E}_{\mu Sx} = 1,39\vec{E}_{\mu 0}$ и в най-отдалечените точки на външната повърхност на проводниците $\vec{E}_{\mu Sx} = \vec{E}_{\mu Sn} = 2,2\vec{E}_{\mu 0}$. Резултантната напрегнатост на индуцираното електрично поле $\vec{E}_{\mu x}$ е показана с пълтна линия. В допирните точки на проводниците $\vec{E}_{\mu x} = 0$. В центровете на проводниците $\vec{E}_{\mu x} = 0,4\vec{E}_{\mu 0}$ и в най-отдалечените точки на външната повърхност на проводниците $\vec{E}_{\mu x} = 2,2\vec{E}_{\mu 0}$.

В напречно направление, поради симетрията действа само скин ефекта.

От получените резултати се вижда, че влиянието на “proximity” ефекта е преобладаващо над скин ефекта и това влияние води до повишаване на плътността на тока в отдалечените части на проводниците.

Определяне “proximity” ефекта при пет доближени проводника с един и същи ток

Случай на еднослойна намотка от пет навивки е изобразен на фигура 12. Изобразени са също магнитните индукции по линията, свързваща центровете на проводниците. Резултантната магнитна



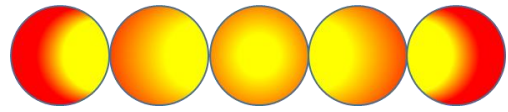
Фигура12

индукция B_{15} има максимални стойности в краищата на намотката като $B_{15} = 1,71B_m$. За големината на “proximity” ефекта може да се съди по площта, заградена между абсцисата и графиката на магнитната индукция, ограничена в рамките на проводника. В случая B_m е максималната индукция на самостоятелен проводник и е показана на фигура 12. Показани са също и графиките на индуцираната напрегнатост на електричното поле. Вижда се, че разликата в напрегнатостта на електричното поле от двете страни на крайния проводник, породена “proximity” ефекта, е $\Delta \vec{E}_{\mu x5} = 2,7\vec{E}_{\mu 0}$. За втория и четвъртия проводници разликата е $\Delta \vec{E}_{\mu x4} = 0,9\vec{E}_{\mu 0}$ и за третия проводник е $\Delta \vec{E}_{\mu x3} = 0,7\vec{E}_{\mu 0}$. На фигура 12 също е показано и разпределението на плътността на тока \vec{j}_x в проводниците по отношение на равномерната плътност на тока \vec{j}_{cc} . От получените резултати се вижда, че в случая има преобладаващо влияние на “proximity” ефекта в крайните проводници.

В напречно направление, поради симетрията няма влияние на “proximity” ефекта и влиянието на скин ефекта се запазва.

Приблизителна картина на плътността на тока в проводниците на намотката е показана на фигура 13. По-тъмните части съответстват на по-голяма плътност на тока. При повишаване на честотата картината се изменя, като токът се концентрира в

областите с по висока плътност.



Фигура13

При по-прецизен анализ на преразпределението на плътността на тока трябва до се има предвид, че при скин ефекта има изместване на тока към повърхността на проводника и по този начин се намалява разликата между напрегнатостта на индуцираното поле по повърхността и центъра на проводника ($\vec{E}_{\mu 0}$ от фигура 2). При “proximity” ефекта при преразпределението на тока в проводника почти не влияе на индуцираната напрегнатост \vec{E}_{μ} от другите проводници. Това води до увеличено влияние на “proximity” ефекта по отношение на скин ефекта.

Показаното разпределение на плътността на тока се отнася за честоти под характеристичната честота на проводника. В тези режими бобините се използват главно в електрическите машини и устройства. При по-високи честоти анализа при бобините се усложнява вследствие проявяването на други паразитни параметри, главно взаимни capacitети.

На фигура 14 е показана картината на разпределението на плътността на тока в проводниците на намотка съставена от 49 (7x7) проводника. Анализът е направен аналогично на предишните. Магнитната индукция в отделните точки е определена като суперпозиция от магнитната индукция \vec{B} на отделните проводници и индуцираната напрегнатост на електричното поле \vec{E}_{μ} е определена като суперпозиция от индуцираните съставки на напрегнатостта на електричното поле от отделните проводници. За проводниците с позиция ij съответно е получено:

$$\Delta \vec{E}_{\mu 31} = \Delta \vec{E}_{\mu 73} = \Delta \vec{E}_{\mu 13} = \Delta \vec{E}_{\mu 37} = 20,4\vec{E}_{\mu 0},$$

в направление към централния проводник (съответно в хоризонтално или вертикално).

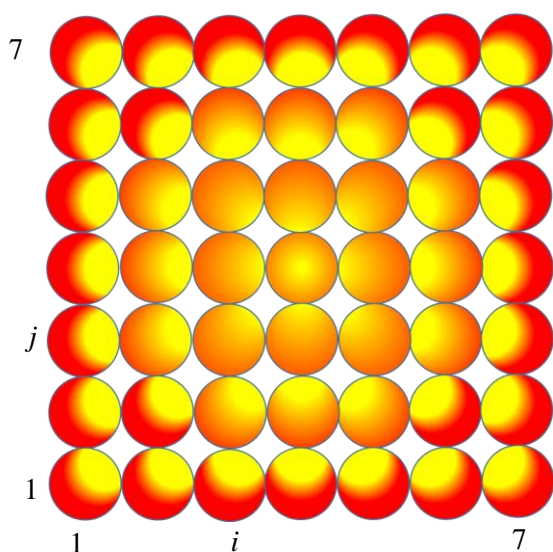
$$\Delta \vec{E}_{\mu 11} = \Delta \vec{E}_{\mu 17} = \Delta \vec{E}_{\mu 71} = \Delta \vec{E}_{\mu 77} = 21,9\vec{E}_{\mu 0} \quad \text{в}$$

направление насочено към централния проводник (по диагоналите).

$$\Delta \vec{E}_{\mu 11} = \Delta \vec{E}_{\mu 17} = \Delta \vec{E}_{\mu 71} = \Delta \vec{E}_{\mu 77} = 15,8\vec{E}_{\mu 0} \quad \text{в хо}$$

ризонтално или вертикално направление.

Към центъра на бобината $\Delta \vec{E}_{\mu}$ бързо намалява.



Фигура 14

От горните резултати може да се направи заключение, че по периферията на бобината силно преобладава “proximity” ефекта.

Както се вижда от фигура 14, най-силна неравномерност на тока има в периферните проводници, особено в ъгловите. В централните части на бобината неравномерността на плътността на тока в проводниците се определя от скин ефекта, който е значително по-слабо изразен от “proximity” ефекта.

При по-прецизен анализ на “proximity” ефекта е необходимо да се отчете влиянието на преразпределението на тока в даден проводник върху преразпределението на тока в другите (главно съседните) проводници.

Заклучение

Този доклад представлява теоретичен анализ и изчисления, даващи възможност за определяне на скин ефекта и “proximity” ефекта при използването на алтернативен математичен модел.

Получените резултати при анализа не се различават принципно от известните до сега. По време на анализа не са констатирани противоречия на предложени математичен модел.

В бъдеще е целесъобразно да се предложи симулираща програма за по-прецизно определяне на разпределението на плътността на тока при отделни проводници и бобини. Използването на израза (3) като изходен за директно определяне на индуцираната напрегнатост на електричното поле $\vec{E}_{\mu Sx}$ в определена точка от пространството, предложените подходи за определяне на разликата в напрегнатостта на електричното поле $\Delta \vec{E}_{\mu Sx_{12}}$ между две точки в израза (8) и подхода за разделно определяне на скин ефекта и “proximity” ефекта дават възможност за съставяне на по-кратки и по-бързи симулиращи програми.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] IEC 60050, International Electrotechnical Vocabulary (IEV): Area: 121: Electromagnetism, Section 121-11: Electromagnetic concepts and quantities. <http://www.electropedia.org/>
- [2] Власов А.А. Макроскопическая электродинамика. Государственное издательство технико-теоретической литературы. Москва, 1955.
- [3] W.T. Weeks, L.L. Wu, M.F. McAllister, and A. Singh, “Resistive and Inductive Skin Effect in Rectangular Conductors,” IBM J. Res. Dev. 23(6), 652-660(1979).
- [4] H. Rossmannith, M. Doebroenti, M. Albach, and D. Exner, “Measurement and characterization of high frequency losses in nonideal litz wires,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 26, no. 11, pp. 3386-3394, Nov. 2011
- [5] Bozev I. Equations for electromagnetic induction in electromagnetism. Summer School Advanced Aspects of Theoretical Electrical Engineering, Sozopol-2012, 7-9.IX.2012
- [6] Бозев И., Борисов Р., Токът на електрическата индукция и законът за пълния ток. XXIV TELECOM 2016, 27-28 October, NSTC, Sofia, BULGARIA, pp.37-44