

ПРОЕКТУВАННЯ І МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СЕНСОРІВ

SENSORS DESIGN AND MATHEMATICAL MODELING

УДК 621.317.39.531.767

О МЕТОДЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВ В ПРОВОДЯЩЕМ НЕМАГНИТНОМ ЛИСТЕ ПРИ ЕГО ДВИЖЕНИИ В ЗАЗОРЕ ВИХРЕТОКОВОГО СЕНСОРА

В. Б. Нерсисян

Государственный инженерный университет Армении.
Кафедра “Теоретические основы электротехники”.
375009, г. Ереван, ул. Теряна 105 тел: (3741) 521792
email nvardges@freenet.am

Аннотация

О МЕТОДЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОКОВ В ПРОВОДЯЩЕМ НЕМАГНИТНОМ ЛИСТЕ ПРИ ЕГО ДВИЖЕНИИ В ЗАЗОРЕ ВИХРЕТОКОВОГО СЕНСОРА

В. Б. Нерсисян

Предложен метод на основе сеточного метода определения токов в проводящем немагнитном листе при его движении в зазоре вихретокового сенсора. Определены контуры замыкания и закономерности распределения плотностей токов по сечению листа как для трансформаторной, так и для скоростной составляющей.

Ключевые слова: проводящий лист, ЭДС трансформации, контурные токи, плотность токов, токи от движения.

Анотація

ПРО МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТІ РОЗПОДІЛУ СТРУМІВ У ПРОВІДНОМУ НЕМАГНІТНОМУ ЛИСТІ ПРИ ЙОГО РУСІ В ЗАЗОРІ ВИХОРОСТРУМОВОГО СЕНСОРУ

В. Б. Нерсис'ян

Запропоновано метод на основі сіткового методу визначення струмів у провідному немагнітному листі при його русі в зазорі вихорострумів сенсору. Визначено контури замикання та закономірності розподілу густини струмів по перетині листа як для трансформаторної, так і для швидкісної складової.

Ключові слова: провідний лист, ЕРС трансформації, контурні струми, густина струмів, струми від руху.

Abstract**ABOUT THE METHOD OF DETERMINATION OF LAWS OF DISTRIBUTION OF CURRENTS IN THE CONDUCTING NON-MAGNETIC SHEET, WHEN IT IS MOVING IN THE CLEARANCE OF EDDY-CURRENT TRANSFORMER***V. B. Nersisyan*

A method is proposed on the basis of net method of determining of currents in the conducting non-magnetic sheet, when it is moving in the clearance of eddy-current sensor. The contour of closure and laws of distribution of density of currents on the cut of sheet for transformer and velocity components are defined.

Key words: conducting sheet, EMF of transformation, contour currents, the density of currents, the currents of movement.

Определение параметров движущегося проводящего немагнитного листа с помощью электромагнитных сенсоров связано с расчетом токов в листе на основании решения уравнений электромагнитного поля при соответствующих заданных граничных условиях [1–9]. Однако эти известные методы сложны с точки зрения практического применения и не обеспечивают достаточную наглядность контуров прохождения токов в листе. Последнее обстоятельство очень важно при разработке высокочувствительных электромагнитных сенсоров толщины и скорости движущегося листа.

Целью настоящей работы является, определение токов, их направления и закономерностей распределения в проводящем листе по направлению его движения в необходимых пределах рабочей магнитной индукции, простым, доступным для инженеров методом, на основании которых появится возможность установления картины распределения магнитного потока в воздушном зазоре магнитной цепи сенсора.

Решение поставленной задачи обеспечивает упрощение математической обработки проектировщиков электромагнитных сенсоров, при этом результаты решения лишь немного отличались от точного решения. Таким методом служит предлагаемый сеточный метод.

Суть метода состоит в том, что область проводящего изотропного листа, расположенного в воздушном зазоре сенсора, представляется в виде прямоугольника $\vec{D} = \{0 \leq x \leq M, 0 \leq y \leq N\}$.

Разобьем отрезки $[O, M]$ и $[O, N]$ соответ-

ственно на части N_1 и N_2 (рис. 1). Пусть

$h_x = \frac{M}{N_1}$, $h_y = \frac{N}{N_2}$. Через точки деления проведем прямые, параллельные соответствующим осям. В результате пересечения этих прямых получим узлы (x_i, y_i) , которые и образуют сетку. Расстояние между соседними узлами

$x_i - x_{i-1} = h_x = \frac{1}{N_1}$ и $y_i - y_{i-1} = h_y = \frac{1}{N_2}$ назовем шагами сетки по направлениям x и y соответственно. Так как зона контроля сенсора имеет квадратную площадь, то целесообразно применять постоянный шаг по каждому из направлений, то есть получаем равномерную сетку.

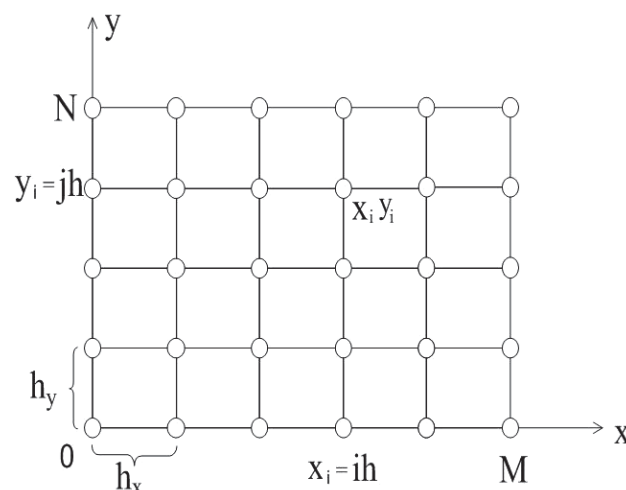


Рис. 1. Построение сетки

Каждая сетка является схемой замещения проводящего листа с идентичной площадью. Поэтому ветви схемы замещения одинаковы и содержат последовательно соединенные активные сопротивление и индуктивность.

В схеме замещения емкостный элемент отсутствует, так как токами смещения в проводящем листе можно пренебречь.

Выбранная схема замещения обоснована экспериментально путем измерения вносимых сопротивлений эталонных образцов листов различных толщин. Осуществим расчет токов в ветвях сетки при $OM = ON = 3a$, $N_1 = N_2 = 12$, $h_x = h_y = \frac{3a}{12}$, при этом ветви сетки представлены как равные комплексные сопротивления. В результате получим сетку, показанную на рис.2, которая состоит из 144 контуров. С целью упрощения схемы комплексные сопротивления ветвей не показаны. Приведенная сетка, кроме рабочей площади $2a \times 2a$, находящейся под полюсными наконечниками сенсора, содержит участок, расширенный со всех сторон на величину $\frac{a}{2}$. Это объясняется необходимостью уточнения контуров замыкания токов в проводящем листе при его движении со скоростью V .

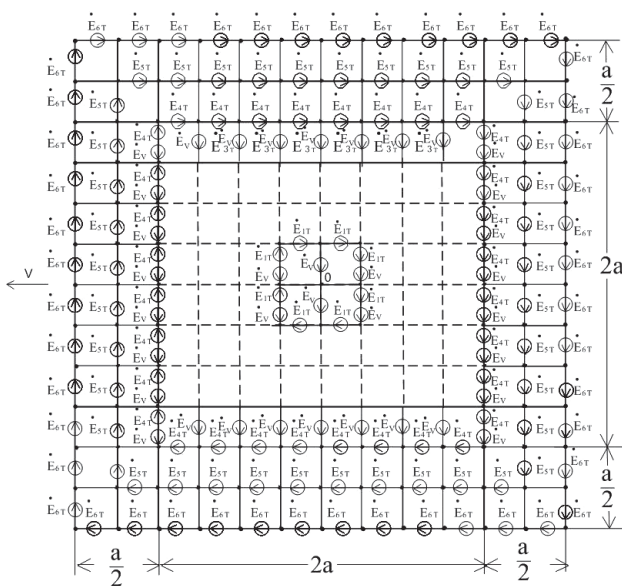


Рис.2. Эквивалентная схема замещения листа, движущегося в зазоре вихретокового сенсора со скоростью V

Предполагается, что индукция под полюсными наконечниками площадью $2a \times 2a$ однородна и изменяется по синусоидальному закону, а в расширенном участке индукция отсутствует. Эти допущения имеют место вследствие

конструктивных особенностей электромагнитного сенсора броневой конструкции [10].

При перемещении сетки, со скоростью V происходит изменение потокосцепления и в сетке возникает два вида ЭДС: трансформаторная \dot{E}_T и движения \dot{E}_V . Для определения ЭДС трансформации \dot{E}_T воспользуемся уравнением электромагнитной индукции для шести замкнутых контуров с центром "О". Здесь принято, что площадь первого замкнутого контура с центром "О" является единицей в относительных единицах, а индукцию через эту площадь примем равной $(1-j1)$ в относительных единицах. В результате в первом замкнутом контуре трансформаторная ЭДС будет $\dot{E}_T = (1-j1)$ в относительных единицах.

Аналогичным образом определены величины ЭДС остальных пяти контуров. Результаты расчета приведены в таблице 1.

Направления этих ЭДС выбираются, исходя из правила правоходного винта. Одновременно в ветвях сеток, находящихся под полюсными наконечниками (площадь $2a \times 2a$), которые поперечны направлению движения V , возникают ЭДС движения \dot{E}_V , в то время как в ветвях, которые продольны к направлению движения, \dot{E}_V не возникают.

Так как длины ветвей сеток одинаковы, а магнитная индукция в рассматриваемом участке однородна, то \dot{E}_V этих ветвей равны между собой. Их направление выбирается на основании правила правой руки. Здесь принято $\dot{E}_V = 1$ в относительных единицах. Таким образом схема замещения сетки с учетом направления \dot{E}_T и \dot{E}_V примет вид, показанный на рис.2.

Определим токи в ветвях сетки на основании метода наложения.

Вначале найдем токи в ветвях сетки от ЭДС \dot{E}_T . Расчетную схему получим из рис. 2, учитывая, что $\dot{E}_V = 0$. Комплексные сопротивления отдельных ветвей сетки одинаковы и принимаются равными $Z_0 = r_0 + j \omega L_0 = 1 + j1$ в относительных единицах.

Для полученной схемы из 144 контуров составим уравнения по контурным токам

$$\left\{ \begin{array}{l} 4\dot{I}_1 Z_0 - \dot{I}_2 Z_0 - \dot{I}_{24} Z_0 = 2\dot{E}_{6T} = 0,6666 - j0,6666, \\ -\dot{I}_1 Z_0 + 4\dot{I}_2 Z_0 - \dot{I}_3 Z_0 - \dot{I}_{23} Z_0 = \dot{E}_{6T} - \dot{E}_{5T} = -0,066667 + j0,6667, \\ \dots\dots\dots \\ -\dot{I}_{122} Z_0 - \dot{I}_{142} Z_0 + 4\dot{I}_{143} Z_0 - \dot{I}_{144} Z_0 = \dot{E}_{6T} - \dot{E}_{5T} = -0,066667 + j0,6667, \\ -\dot{I}_{121} Z_0 - \dot{I}_{143} Z_0 + 4\dot{I}_{144} Z_0 = 2\dot{E}_{6T} = -0,066666 + j0,66666. \end{array} \right.$$

Таблица 1

Номера контуров от центра "О"	1	2	3	4	5	6
Обозначение ЭДС контуров	\dot{E}_{1T}	\dot{E}_{2T}	\dot{E}_{3T}	\dot{E}_{4T}	\dot{E}_{5T}	\dot{E}_{6T}
ЭДС контура в относительных единицах	$1 - j1$	$4 - j4$	$9 - j9$	$16 - j16$	$16 - j16$	$16 - j16$
ЭДС ветвей контура в относительных единицах	$0,125 - j0,125$	$0,25 - j0,25$	$0,375 - j0,375$	$0,5 - j0,5$	$0,4 - j0,4$	$0,333 - j0,333$

Совместное их решение с применением метода Гаусса позволило получить токи в ветвях сет-

ки, а также определены их магнитные индукции. Результаты расчета приведены в таблице 2.

Таблица 2

Вертикальные ветви			Горизонтальные ветви		
номера ветвей	величина тока в отн.ед.	величина индукции в отн.ед.	номера ветвей	величина тока в отн.ед.	величина индукции в отн.ед.
1	2	3	1	2	3
1	0.3333-j0.3333	0.04186-j0.04186	1	0.3333-j0.3333	0.04186-j0.04186
1-2	0	0	2	0.3333-j0.3333	0.04186-j0.04186
2-3	0	0	3	0.3333-j0.3333	0.04186-j0.04186
3-4	0	0	4	0.3333-j0.3333	0.04186-j0.04186
.....
.....
141-142	0	0	136	0.3333-j0.3333	0.04186-j0.04186
142-143	0	0	135	0.3333-j0.3333	0.04186-j0.04186
143-144	0	0	134	0.3333-j0.3333	0.04186-j0.04186
144	0.3333-j0.3333	0.04186-j0.04186	133	0.3333-j0.3333	0.04186-j0.04186

Закономерности распределения трансформаторных составляющих \dot{I}_T токов в контурах от центра к краям рассматриваемого участка $\frac{a}{4} k$, где $k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ номера контуров, построены на рис.3 а, б.

Теперь определим составляющие токов в ветвях сетки, обусловленные \dot{E}_V . Расчетную схему также получим исходя из рис. 2, учитывая, что $\dot{E}_T = 0$. Комплексные сопротивления ветвей исходной схемы заменяются активны-

ми сопротивлениями, равными $Z_0 = r_0 = 1$ в относительных единицах.

Для полученной схемы из 144 контуров составим уравнения по контурным токам

$$\left\{ \begin{array}{l} 4\dot{I}_1 Z_0 - \dot{I}_2 Z_0 - \dot{I}_{24} Z_0 = 0, \\ -\dot{I}_1 Z_0 + 4\dot{I}_2 Z_0 - \dot{I}_3 Z_0 - \dot{I}_{23} Z_0 = 0, \\ \dots\dots\dots \\ -\dot{I}_{122} Z_0 - \dot{I}_{142} Z_0 + 4\dot{I}_{143} Z_0 - \dot{I}_{144} Z_0 = 0, \\ -\dot{I}_{121} Z_0 - \dot{I}_{143} Z_0 + 4\dot{I}_{144} Z_0 = 0. \end{array} \right.$$

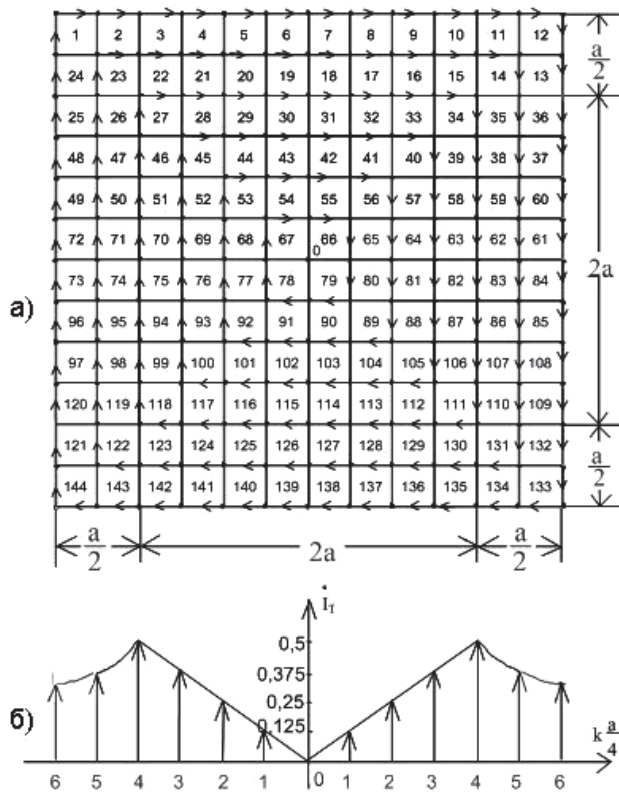


Рис.3. Направления токов в листе, обусловленные E_T , и закономерности их распределения

Совместное их решение позволило определить токи в ветвях сеток, их магнитные индукции. Результаты расчета приведены в таблице 3. По результатом расчета на рис.4а приведено направление токов в ветвях сетки, а на рис.4б — закономерность распределения токов i_V от скорости движения листа от центра к краям рассматриваемого участка $\frac{a}{4} k$, где $k = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ номера участков.

Сравнивая закономерности распределения магнитного поля в воздушном зазоре вихретокового сенсора, описанного в работе [9], с полученными результатами предлагаемой работы, убеждаемся в идентичности протекаемых электромагнитных процессов. Однако метод расчета в предложенном варианте значительно проще.

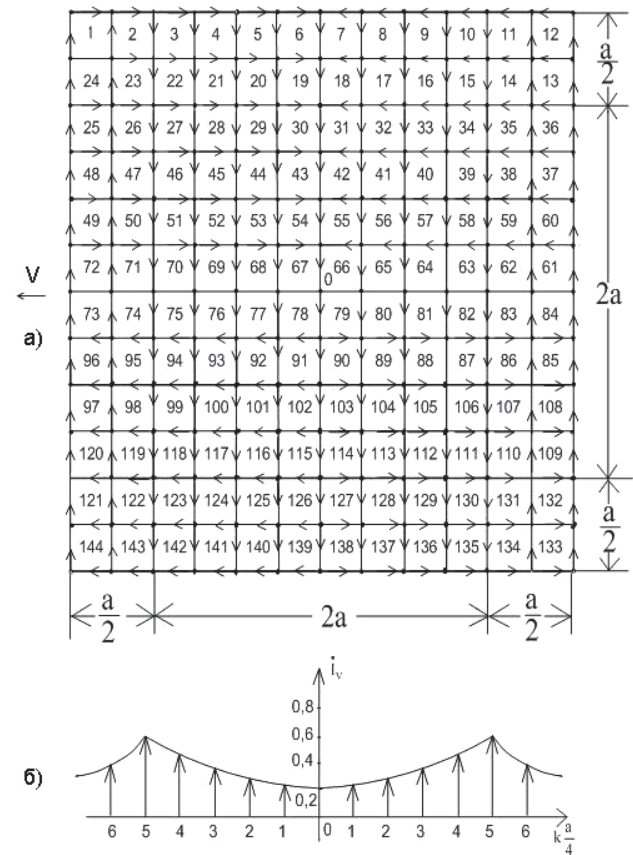


Рис.4. Направления токов в листе, обусловленных E_v , и закономерности их распределения

Таблица 3

Вертикальные ветви			Горизонтальные ветви		
номер ветви	величина тока в отн.ед.	величина индукции в отн.ед.	номер ветви	величина тока в отн.ед.	величина индукции в отн.ед.
1	2	3	1	2	3
1	0.09805	0.01232	1	0.09805	0.0123215
1-2	-0.067748	-0.0085	2	0.1658	0.02083
2-3	0.00504	0.00063	3	0.160758	0.020201
3-4	0.03766	0.00473	4	0.12309	0.015468
.....
.....
141-142	-0.037664	-0.004733	136	-0.123095	-0.0154685
142-143	-0.00504	-0.000633	135	-0.160759	-0.0202015
143-144	0.06775	0.0085135	134	-0.1658	-0.020835
144	0.098052	0.012321	133	-0.09805	-0.01232

На основании принципа наложения определены результирующие значения токов в ветвях сеток как алгебраические суммы токов трансформаторных \dot{I}_T и скоростных \dot{I}_V составляющих, а также их магнитные индукции и потоки.

Определены результирующие индукция и поток в воздушном зазоре магнитопровода сенсора. Результаты этих расчетов здесь не приведены также из-за ограниченного объема материала статьи. Данные расчетов трансформаторных и скоростных составляющих токов, контуры их замыкания и закономерности распределения по сечению проводящего листа полностью совпадают с соответствующими физическими процессами.

Список литературы

1. Шимони К. Теоретическая электротехника. — М.: Мир, 1964. — 773с.
2. Герасимов В. Г., Клюев В.В., Шатерников В.Е., Методы и приборы электромагнитного контроля промышленных изделий. — М.: Энергоатомиздат. 1983. — 242 с.
3. Герасимов В. Г., Осатин Ю.Я., Покровский А.Д., Сухоруков ВВ., Чернов Л.А. Неразрушающий контроль качества изделия электромагнитным методом. — М: Энергия . 1978. — 216с.
4. Дорофеев А.Л., Никитин А.И., Рубин А.Л. Индукционная толщинометрия. — М: Энергия . 1978. — 184с.
5. Пивоваров Л.В. Индукционные измерители линейной скорости и длины. — М: Энергия . 1972. — 81с.
6. Сухоруков В.В. Математическое моделирование электромагнитных полей в проводящих средах. — М: Энергия . 1975. — 150с.
7. Нерсисян В. Б. Расчет вихретокового преобразователя с учетом скорости движущейся токопроводящей ферромагнитной полосы. — Ереван // Межвузовский тематический сборник научных трудов по электротехнике./Электрические и магнитные поля в однородных средах и цепи/. — 1988. — С.83–88.
8. Нерсисян В. Б. Расчет электромагнитного поля в рабочем зазоре магнитной цепи вихретокового преобразователя при наличии в нем проводящего немагнитного листа // Известия АН Республики Армения, серия ТН. — 2003. — №1. — С.306–314.
9. Нерсисян В. Б. Вихретоковый сенсор толщины и скорости движущейся проводящей немагнитной полосы. // Міністерство освіти і науки України, Одеський національний університет ім. І. І. Мечникова, Сенсорна електроніка і мікросистемні технології. — 2004. — №2. — С.29-33.
10. Патент РФ N 1249313 Нерсисян В. Б. Индукционный толщиномер // Открытия. Изобретения. — 1986. — №20