

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.31.002

**А. П. ПОПОВ
К. А. КЛИМЕНКО**

Омский государственный
технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ СИСТЕМЫ «ШИНА С ТОКОМ — ФЕРРОМАГНИТНЫЙ СЕРДЕЧНИК, ОКРУЖЕННЫЙ КОРОТКОЗАМКНУТЫМ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИМ КОЛЬЦОМ»

В статье представлены результаты расчета электромагнитного поля системы «шина с током — ферромагнитный шихтованный сердечник из электротехнической стали» в программном комплексе Elcut. Расчет произведен для определения влияния электропроводящего короткозамкнутого кольца на электромагнитные процессы в рассматриваемой системе.

Ключевые слова: индукция магнитного поля, магнитный поток, поверхностный эффект, система «шина с током — ферромагнитный шихтованный сердечник из электротехнической стали», комплекс программ Elcut.

Целью данной работы является определение влияния электропроводящего короткозамкнутого кольца на электромагнитное поле системы «шина с током — ферромагнитный шихтованный сердечник из электротехнической стали» (рис. 1).

Короткозамкнутые кольца или короткозамкнутые обмотки используются в различных электротехни-

ческих устройствах (двухфазных асинхронных двигателей, индукционных счетчиков электроэнергии, индукционных реле и др.) для обеспечения необходимых характеристик этих устройств. В связи с этим представляет интерес для разработчиков подобного типа устройств к распределению электромагнитного поля и фазовых соотношений в конструкции

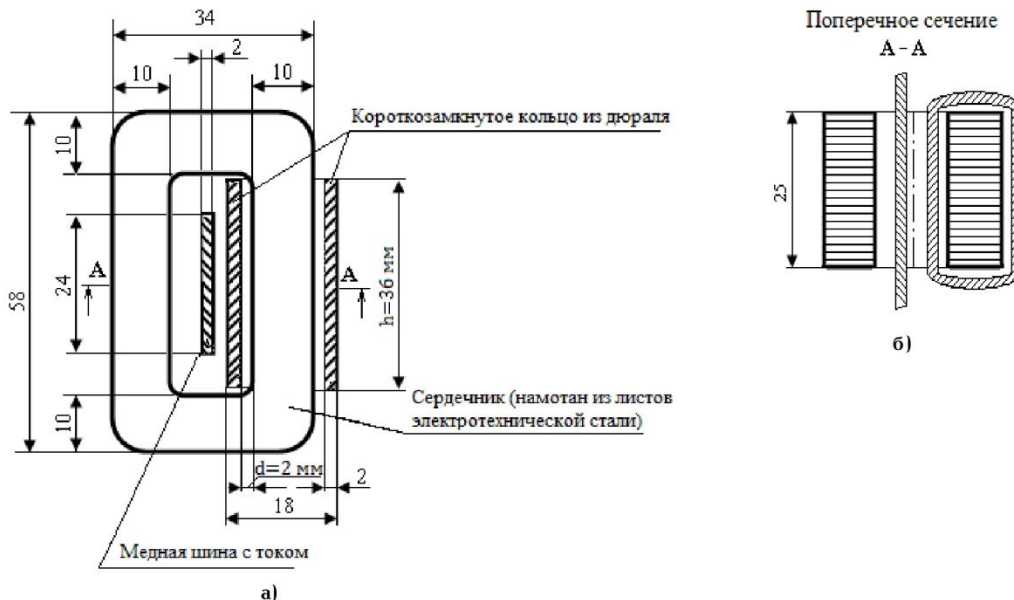


Рис. 1. Экспериментальный образец системы с короткозамкнутым кольцом: а) геометрические размеры системы; б) поперечное сечение А–А

при расчете и проектировании того или иного устройства.

Для выяснения влияния короткозамкнутого кольца на электромагнитные процессы в рассматриваемой системе использовался комплекс программ Elcut, позволяющий осуществлять расчет двухмерных электромагнитных полей.

Для реализации поставленной цели исследования, представленного в данной работе, необходимо:

- получить картину индукции магнитного поля системы «шина с током — ферромагнитный шихтованный сердечник из электротехнической стали» с короткозамкнутым кольцом;
- рассчитать локальные амплитудные значения индукции магнитного поля в расчетной области и построить график распределения модуля вектора индукции в различных сечениях системы;
- вычислить комплексные значения магнитного потока в выбранных сечениях системы;
- определить плотность тока и комплексные значения тока в сечении короткозамкнутого кольца;
- исследовать график распределения плотности тока по глубине короткозамкнутого кольца.

Для выяснения влияния короткозамкнутого кольца на электромагнитные процессы в рассматриваемой системе необходимо также провести расчет индукции в сердечнике без кольца, т.е. выяснить отношение численного значения магнитной индукции в сердечнике без кольца и с кольцом. С этой целью требуется:

- получить картину индукции магнитного поля без кольца;
- вычислить локальные амплитудные значения индукции магнитного поля в различных сечениях сердечника.

Указанные выше исследования проводились на экспериментальном образце, представленном на рис. 1. Образец состоит из ферромагнитного сердечника, изготовленного из листов электротехнической стали (марка — Э330, толщина листа 0,5 мм), короткозамкнутого кольца из дюралюминия и шины с током. Геометрические размеры исследуемой системы показаны на рис. 1а, б. Толщина короткозамкнутого экранирующего кольца была выбрана существенно меньше

глубины проникновения электромагнитного поля в стенку этого экрана Δ , равной

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \gamma \mu}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot 50 \cdot 37 \cdot 10^6 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}} \approx 12 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

В рассматриваемом случае толщина стенки короткозамкнутого кольца (d) выбрана в 6 раз меньше, т.е. 2 мм, а высота кольца много больше толщины ($h = 36$ мм), что обеспечивает режим короткого замыкания.

При расчете электромагнитного поля принята линейная зависимость магнитной индукции (B) в сердечнике от напряженности магнитного поля (H), т.е.

$$\mu = \frac{B}{H} = \text{const}, \quad \mu = \mu_{\text{отн}} \cdot \mu_0 \text{ — абсолютная магнитная}$$

проницаемость. Такое допущение приемлемо с учетом того, что при наличии короткозамкнутого кольца индукция в сердечнике мала из-за противодействия токов короткозамкнутого кольца. При решении задачи принимаем независимость поля вдоль оси Z , направленной перпендикулярно плоскости чертежа, т.е. производится расчет плоской двухмерной квазистатической задачи.

Решение такой задачи в программе Elcut сводится к расчету магнитного и электрического поля в линейной среде с учетом вихревых токов и формулируется как дифференциальное уравнение в частных производных относительно комплексной амплитуды векторного магнитного потенциала:

$$\frac{1}{\mu} \cdot \nabla^2 \cdot \overline{A_m} - j \cdot \omega \cdot \gamma \cdot \overline{A_m} = \overline{\delta_{m \text{ стор}}},$$

где $\overline{\delta_{\text{вихр}}} = j \cdot \omega \cdot \gamma \cdot \overline{A_m}$ — плотность вихревого тока, индуцированного переменным магнитным полем в проводящей среде, имеющей электропроводность γ ; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота; f — частота синусоидального тока; $\overline{\delta_{m \text{ стор}}}$ — комплексная амплитуда

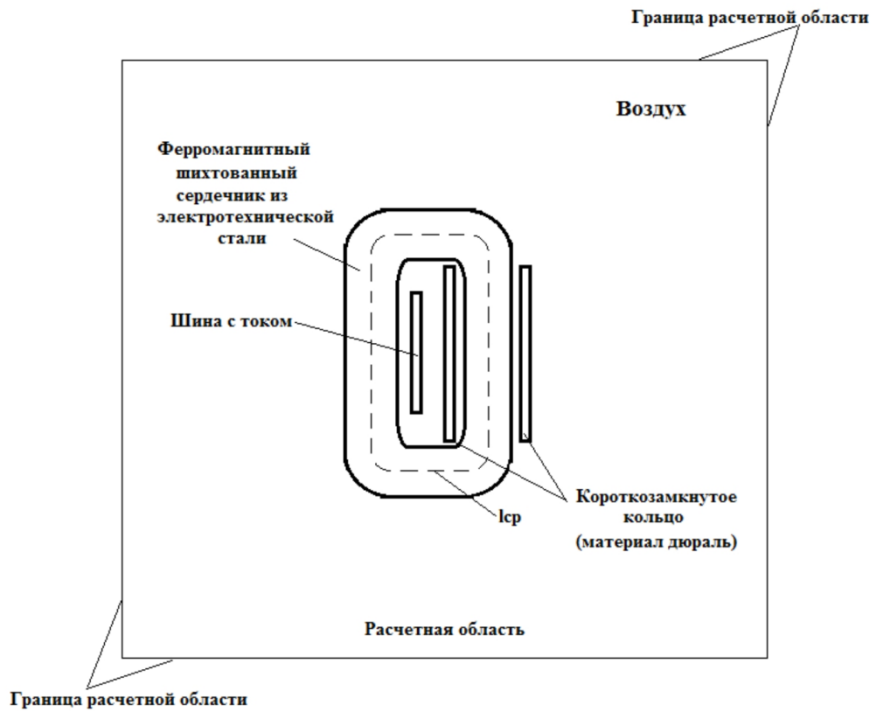


Рис. 2. Математическая модель экспериментального образца (рис. 1) для Elcut

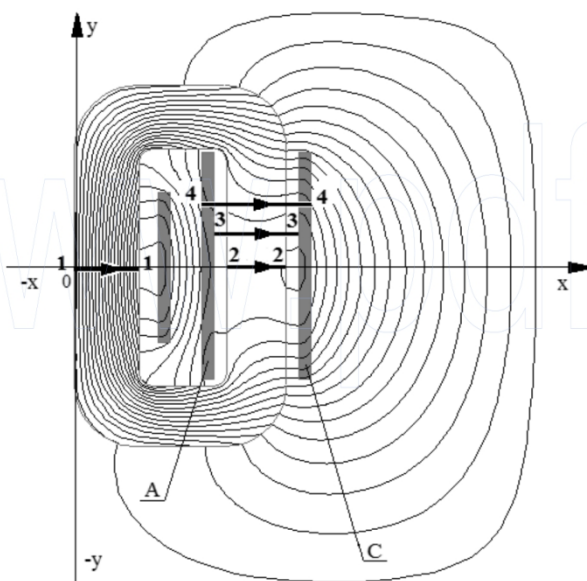


Рис. 3. Картина линий индукции магнитного поля «Задачи №1»

туда плотности стороннего тока, вызванного приложенным извне напряжением [1].

На рис. 2 представлена математическая модель системы для расчета в Elcut. Данную модель обозначим как «Задача №1». Расчетная область содержит сердечник, шину с током, короткозамкнутое кольцо, окруженные диэлектриком ($\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м). На этом рисунке также обозначена граница расчетной области, за пределами которой напряженность магнитного поля пренебрежимо мала.

Сердечник был задан следующими параметрами:

- относительная магнитная проницаемость принята в данной задаче $\mu_{\text{отн}} = 1200$, материал — линейный;
- пренебрегаем электропроводностью материала сердечника (сердечник шихтованный, изготовлен из

Таблица 1

Номер локальных точек по расчетным линиям	Локальные амплитудные значения магнитной индукции В (Тл) по линиям			
	1 – 1	2 – 2	3 – 3	4 – 4
1	0,043250	0,044333	0,000729	0,006617
2	0,043313	0,044306	0,000125	0,001332
3	0,043339	0,044263	0,044317	0,000127
4	0,043420	0,044216	0,044257	0,044293
5	0,043498	0,044164	0,044188	0,044210
6	0,043606	0,044109	0,044110	0,044111
7	0,043716	0,044059	0,044039	0,044019
8	0,043852	0,044009	0,043973	0,043941
9	0,043992	0,043965	0,043924	0,000148
10	0,044136	0,043927	0,000156	0,000646

изолированных листов электротехнической стали, разъемный, т.е. собран из двух частей);

Шина с током, изготовленная из меди, имеет следующие параметры:

- относительная магнитная проницаемость $\mu_{\text{отн}} = 1$;
- электропроводность $\gamma = 56 \cdot 10^6$ См/м [2];

— шина является источником поля, по ней протекает синусоидально изменяющийся ток $I = I_m \sin(\omega t + \varphi)$, где $I_m = 180$ А, $\varphi = 0^\circ$.

Короткозамкнутое кольцо изготовлено из дюрала, его параметры:

- относительная магнитная проницаемость $\mu_{\text{отн}} = 1$;
- электропроводность $\gamma = 37 \cdot 10^6$ См/м [2].

На рис. 3 показана картина линий индукции магнитного поля «Задачи №1», с указанием областей расчета плотности тока по сечению короткозамкнутого кольца и сечений для расчета магнитного потока (1 – 1, 2 – 2, 3 – 3, 4 – 4).

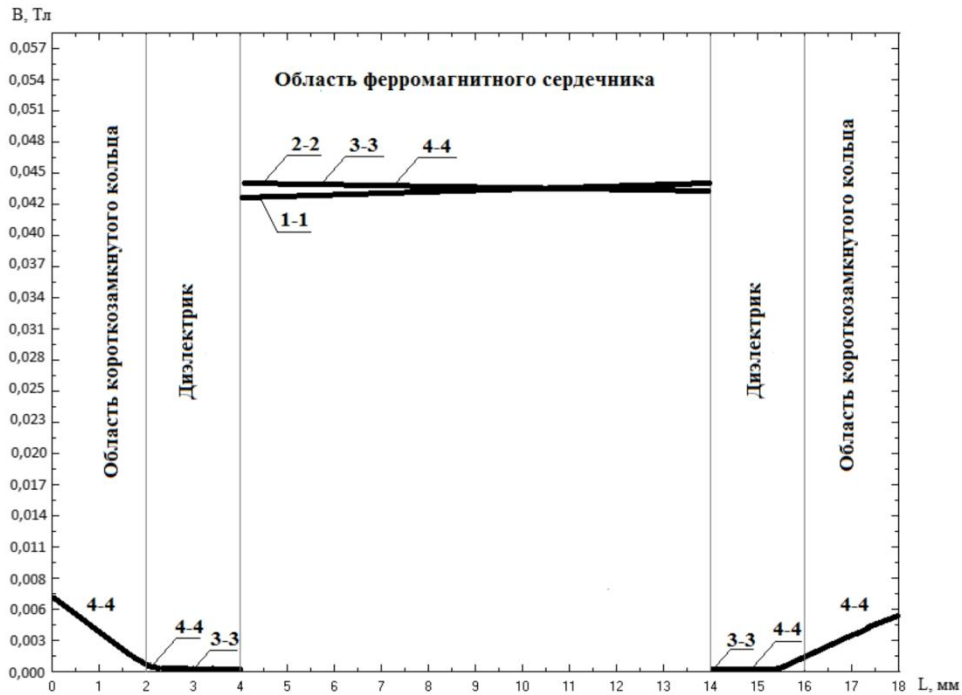


Рис. 4. График распределения вектора индукции магнитного поля по линиям

Таблица 2

Сечение	Магнитный поток, Вб $\Phi_m = \Phi_m \cdot e^{j\varphi}$
1 – 1	$1,1336 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-j68,73^\circ}$
2 – 2	$1,0509 \cdot 10^{-5} \cdot e^{j89,69^\circ}$
3 – 3	$1,0591 \cdot 10^{-5} \cdot e^{j89,74^\circ}$
4 – 4	$1,0597 \cdot 10^{-5} \cdot e^{j91,31^\circ}$

В табл. 1 приведены локальные амплитудные значения модуля индукции магнитного поля по линиям, обозначенным на рис. 3 (1 – 1, 2 – 2, 3 – 3, 4 – 4). По локальным амплитудным значениям построены графики вектора индукции магнитного поля, представленные на рис. 4.

Комплексные амплитудные значения магнитного потока Φ_m в выбранных сечениях приведены в табл. 2.

Данный расчет проводился с целью определения сдвига фаз между первичным током и магнитным потоком в сечениях.

Величина индукции насыщения электротехнической стали лежит в пределах 1,5 – 1,6 Тл, как следует из расчетных данных, приведенных в табл. 1 магнитная индукция в сердечнике много меньше индукции насыщения стали (более чем в 30 раз), т.е. перемагничивание сердечника осуществляется на начальном участке кривой намагничивания.

Для подтверждения достоверности расчета «Задачи №1» были определены локальные и средние значения плотности тока в поперечном сечении короткозамкнутого кольца. Расчет осуществлен по всему сечению с интервалом по оси «Y» в 1,5 мм. Сечение А – сечение короткозамкнутого кольца в окне сердечника, сечения С – с внешней стороны сердечника.

Таблица 3

№	Сечение А $\delta, \text{A/m}^2$	Сечение С $\delta, \text{A/m}^2$
1	1726050	1770160
2	1731650	1744740
3	1746650	1729450
4	1752440	1726620
5	1742630	1736070
6	1734420	1753740
7	1740260	1739830
8	1753600	1727850
9	1752920	1727660
10	1735700	1738910
11	1726050	1770160
$\delta_{\text{ср}}, \text{A/m}^2$	1740930	1740659

В табл. 3 приведены локальные и средние значения плотности тока, в табл. 4 – комплексные значения тока.

Из данных (табл. 5) следует, что расчет выполнен достаточно точно. Теоретические значения тока в сечениях А и С должны быть одинаковыми исходя из принципа непрерывности тока в замкнутой электропроводящей среде, окруженной воздухом.

На рис. 5 представлены график распределения по оси «X» плотности тока в поперечном сечении электропроводящего короткозамкнутого кольца.

Таблица 4

Сечение короткозамкнутого кольца	$I_m = I_m \cdot e^{j\varphi}$, А ($I_m = \sqrt{2} \cdot \delta_{cp} \cdot S$)
A	$179,23 \cdot e^{j112^\circ}$
C	$179,21 \cdot e^{-j178,88^\circ}$

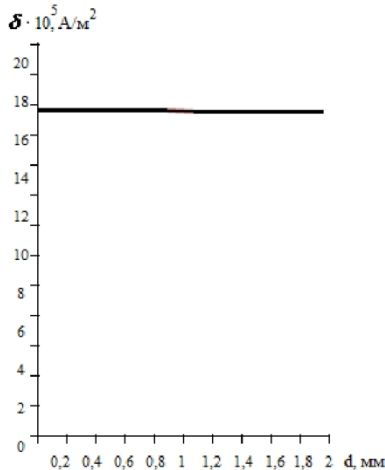


Рис. 5. График распределения плотности тока по толщине кольца

Как следует из рис. 5, плотность тока незначительно изменяется по глубине стенки короткозамкнутого кольца, т.е. поверхностный эффект проявляется незначительно.

В рассматриваемой работе проведен также расчет магнитного поля сердечника при равных значениях тока при отсутствии кольца («Задача № 2»).

Математическая модель «Задачи № 2» схожа с моделью «Задачи № 1» рис. 2, отличие состоит в отсутствии короткозамкнутого кольца.

Для «Задачи № 2» произведен расчет локальных амплитудных значений индукции магнитного поля. На рис. 6 приведена картина линий индукции магнитного поля с указанием сечений сердечника, в которых производился расчет. Полученные данные сведены в табл. 5.

Проверку достоверности численного расчета проведем по приближенному расчету индукции, используя закон полного тока:

$$B_m = \mu_{отн} \cdot \mu_0 \cdot \frac{I_m}{l_{cp}},$$

где l_{cp} — длина средней линии сердечника (рис. 2), равная $144 \cdot 10^{-3}$ м.

$$B_m = 1200 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{180}{144 \cdot 10^{-3}} = 1,884 \text{ Тл.}$$

Из сравнения полученных расчетных значений индукции на средней линии сердечника l_{cp} по закону полного тока с расчетными данными (табл. 5) можно сделать вывод о достоверности полученных результатов расчета электромагнитного поля в программе Elcut рассматриваемой системы «шина с током — ферромагнитный шихтованный сердечник из электротехнической стали».

Таблица 5

Номер локальных точек по расчетным линиям	Локальные амплитудные значения модуля магнитной индукции В (Тл) по линиям	
	5 — 5	6 — 6
1	1,860511	2,077366
2	1,894607	2,079275
3	1,909230	2,079940
4	1,960736	2,082514
5	2,021547	2,085045
6	2,104873	2,087534
7	2,194562	2,090235
8	2,353265	2,092427
9	2,403130	2,094450
10	2,418998	2,096783

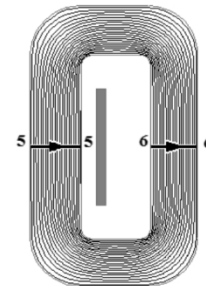


Рис. 6. Картина линий индукции магнитного поля «Задачи № 2»

Проанализировав полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

1. В работе показано, что в системе «шина с током — ферромагнитный шихтованный сердечник» сдвиг по фазе между первичным током в шине и магнитным потоком в сердечнике можно получить достаточно точно равным 90° .

2. Индукция магнитного поля сердечника рассматриваемой системы в десятки раз меньше индукции насыщения реального сердечника.

Библиографический список

1. Расчет электрических и магнитных полей методом конечных элементов с применением комплекса программ Elcut : учеб. пособие / А. П. Попов [и др.]. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2010. — 84 с.

2. Электротехнический справочник: В 4 т. Т. 1. Общие вопросы. Электротехнический материалы / Под общ. ред. профессоров МЭИ В. Г. Герасимова и др. — 9-е изд., стер. — М. : МЭИ, 2003. — 440 с.

ПОПОВ Анатолий Петрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая и общая электротехника».

КЛИМЕНКО Ксения Александровна, аспирантка кафедры «Теоретическая и общая электротехника».

Адрес для переписки: e-mail: klimenko22@rambler.ru.

Статья поступила в редакцию 14.06.2011 г.

© А. П. Попов, К. А. Клименко.