

государственного педагогического университета. Физико-математические и технические науки. – 2012. – № 30. С. 467–472.

УДК 519.711.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНОГО ЭФФЕКТА В МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ЛИНЕЙНЫХ И УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

А.А. Воронцов¹

¹ доцент кафедры "Вычислительные машины и системы", к.т.н., Пензенский Государственный Технологический Университет, г. Пенза, Россия, e-mail: aleksander.vorontsov@gmail.com

Аннотация. В данной статье подробно рассмотрено явление, получившее название скин или поверхностный эффект, проявляющийся в протекании переменного электрического тока в поверхностном слое волновода, называемом также эффективно проводящим Z_e -слоем. Выполнен анализ основных факторов, влияющих на толщину поверхностного слоя. Проведено математическое моделирование поверхностного эффекта и оценка толщины Z_e -слоя при различных значениях частоты колебаний переменного электрического тока.

Ключевые слова: скин эффект, магнитострикционный угломер, эффективно проводящий слой, поверхностный эффект, математическое моделирование скин эффекта.

RESEARCH OF SURFACE EFFECT IN MAGNETOSTRICTION CONVERTERS OF LINEAR AND ANGULAR MOVEMENTS

A.A. Vorontsov¹

¹lecturer of department "Computers and Systems", Ph.D., Penza State Technological University, s. Penza, Russia, e-mail: aleksander.vorontsov@gmail.com

Abstract. This article describes in detail a phenomenon called a skin or a surface effect, which manifests itself in the flow of an alternating electric current in the surface layer of a waveguide, also called an effectively conducting Z_e layer. The analysis of the main factors affecting the thickness of the surface layer is carried out. Mathematical modeling of the surface effect and estimation of the thickness of the Z_e layer at various values of the frequency of oscillations of the alternating electric current are carried out.

Keywords: Skin effect, magnetostrictive protractor, effective conductive layer, surface effect, mathematical modeling of the skin effect.

Введение. Одним из факторов, который необходимо учитывать при расчетах магнитных полей магнитострикционных преобразователей линейных и угловых перемещений является поверхностный эффект [1-11]. Он проявляется в неравномерном распределении переменного тока по сечению волновода (ВЛ) из-за индукционного взаимодействия различных элементов тока между собой, что приводит к сосредоточению электрического тока в поверхностном слое, называемом также эффективно проводящим z_0 -слоем. Это необходимо учитывать при расчетах.

Цель работы.

Целью работы является исследование поверхностного эффекта в магнитострикционных преобразователях линейных и угловых перемещений

Материал и результаты исследований.

Для анализа распределения тока по поперечному сечению ВЛ введем понятие абсолютного значения плотности тока $\dot{\delta}$, называемого также согласно [1,6] в дальнейшем плотностью тока.

В цилиндрической системе координат плотность тока определяется согласно выражению[1]:

$$\frac{d^2 \dot{\delta}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d \dot{\delta}}{dr} = j\omega\mu_a\gamma \cdot \dot{\delta}, \quad (1)$$

где r - текущий или рассматриваемый радиус ВЛ; μ_a , γ – абсолютная магнитная проницаемость и удельная проводимость материала ВЛ, $\mu_a = \mu\mu_0$; ω – циклическая частота токового импульса, $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$, f - частота колебаний токового импульса; $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица.

Выражение (1) заменой переменных $q = \sqrt{-j\omega\mu_a\gamma}$ можно свести к более простому виду[1]:

$$\frac{d^2 \dot{\delta}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d \dot{\delta}}{dr} + q^2 \dot{\delta} = 0 \quad (2)$$

или

$$\frac{d^2 \dot{\delta}}{d(qr)^2} + \frac{1}{qr} \frac{d \dot{\delta}}{d(qr)} + \dot{\delta} = 0, \quad (3)$$

являющегося частным случаем уравнения Бесселя.

Решение уравнения (3) может быть найдено в следующем виде [1,6]:

$$\dot{\delta} = AJ_0(qr) + BN_0(qr), \quad (4)$$

где A, B – постоянные интегрирования, $J_0(qr)$ – функция Бесселя первого рода нулевого порядка, $N_0(qr)$ – функция Бесселя нулевого порядка второго рода.

Функция $N_0(qr)$ обладает особенностью, заключающейся в том, что при $qr = 0$, т.е. на оси ВЛ при $r=0$ она обращается в бесконечность.

Так как из физических соображений ясно, что плотность тока должна быть всюду конечна, в том числе на оси провода, то слагаемое $N_0(qr)$ из уравнения (4) можно отбросить, в результате чего оно переписывается в виде [1]:

$$\dot{\delta} = A J_0(qr). \quad (5)$$

Для определения постоянной интегрирования A , выразим согласно [1,6], используя свою систему обозначений, амплитуду токового импульса в

ЗП I_m через плотность тока $\dot{\delta}$:

$$I_m = \int_s \dot{\delta} dS = \int_0^{r_{ВЛ}} A J_0(\sqrt{qr}) 2\pi r dr = A \frac{2\pi \cdot r_{ВЛ}}{q} J_1(qr_{ВЛ}), \quad (6)$$

откуда искомая постоянная интегрирования A определится как

$$A = \frac{I_m \cdot q}{2\pi \cdot r_{ВЛ} \cdot J_1(qr_{ВЛ})} \quad (7)$$

Плотность тока $\dot{\delta}$, определяемая уравнением (5), с учетом значения постоянной интегрирования A , полученного в (7), переписывается следующим образом:

$$\dot{\delta} = \frac{I_m \cdot q}{2\pi \cdot r_{ВЛ} \cdot J_1(qr_{ВЛ})} J_0(qr). \quad (8)$$

На основании формулы (8) было проведено математическое моделирование зависимости плотности тока $\dot{\delta}$ от рассматриваемого (текущего) радиуса ВЛ r для различных значений частоты токового импульса, результаты моделирования которого для значений $r_{ВЛ} = 0,5 \text{ мм}$ ($5 \cdot 10^{-4} \text{ м}$), $\mu_a = 1,25 \cdot 10^{-4}$, $I_m = 0,1 \text{ А}$, $\gamma = 10^7 \text{ См/м}$, приведены на рисунке 1

Анализ результатов моделирования, приведенных на рисунке 1, позволяет сделать вывод, что с увеличением частоты колебаний токового импульса f происходит резкое увеличение плотности тока вблизи поверхности ВЛ, что приводит к уменьшению толщины эффективно проводящего $z_{Э}$ -слоя. Так, на частоте 100КГц указанная толщина составляет 0,2мм при радиусе ЗП $r_{ВЛ} = 0,5 \text{ мм}$, причем на глубине 0,1мм значение плотности тока уже уменьшается на порядок по сравнению с его значением на поверхности ВЛ.

Для расчетов толщины эффективно проводящего $z_{Э}$ -слоя возможно использование следующего известного выражения [4]:

$$z_{\text{Э}} = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_a \gamma}}, \quad (9)$$

где γ - удельная проводимость, измеряемая в См/м.

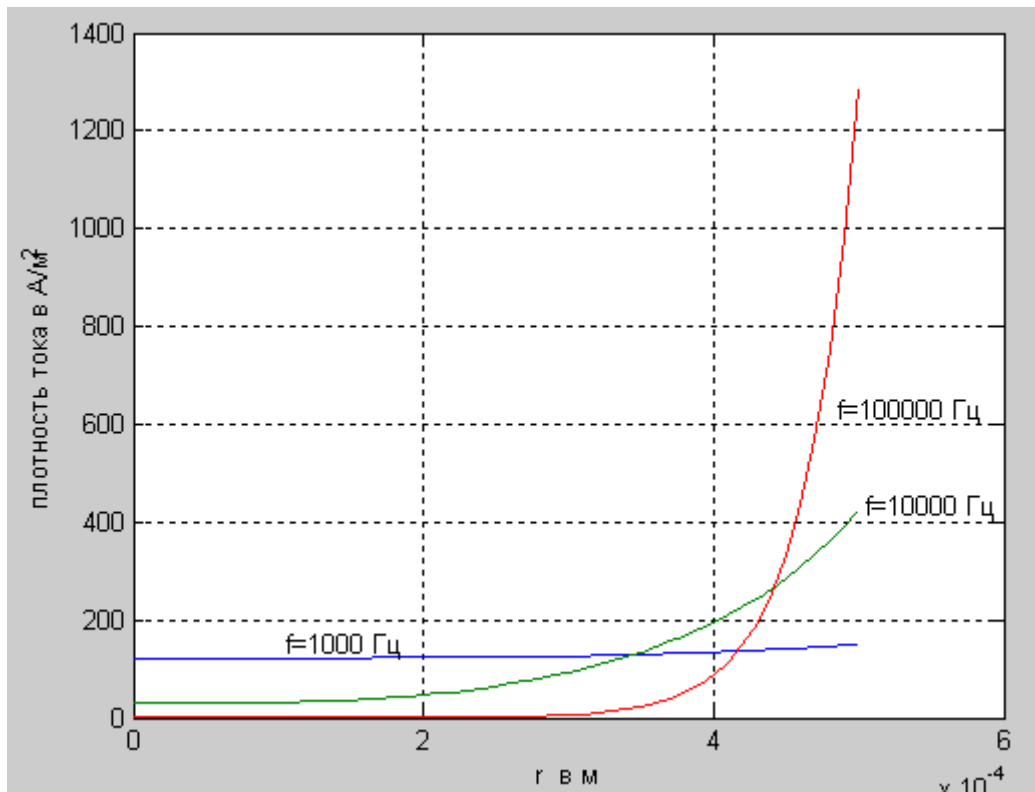


Рисунок 1 - Зависимость плотности тока от частоты токового импульса и расстояния от оси цилиндрического ВЛ в плоскости его сечения.

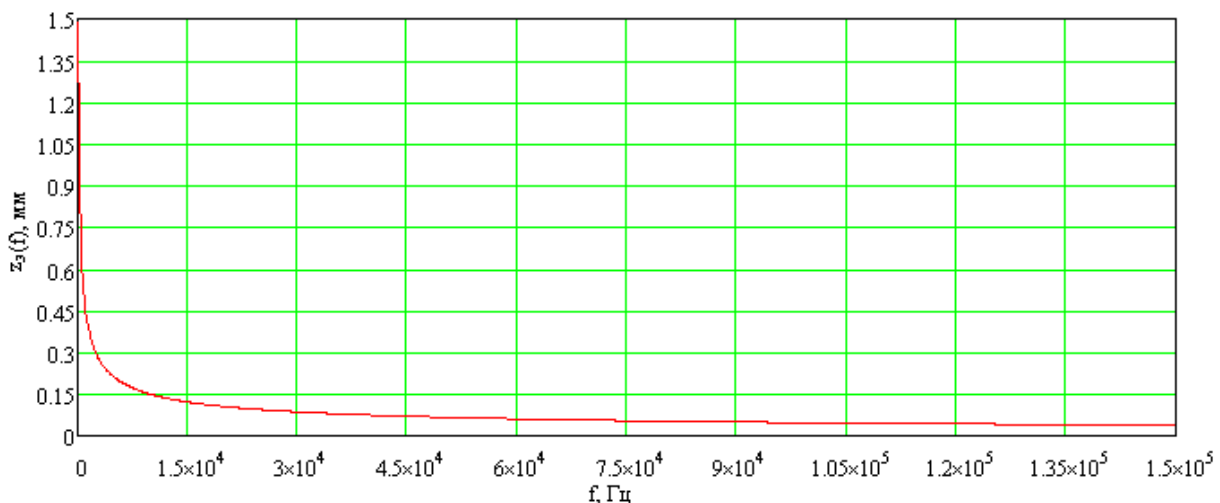


Рисунок 2 - Зависимость толщины эффективно проводящего $z_{\text{Э}}$ -слоя в мм от частоты токовых импульсов в Гц для цилиндрического ВЛ при

$$\gamma = 1.15 \cdot 10^7 \text{ См/м}, \quad \mu_a = 1,25 \cdot 10^{-4}$$

На основании формулы (9) было проведено моделирование зависимости толщины эффективно проводящего $z_{\text{Э}}$ -слоя от частоты колебаний токового импульса, результаты моделирования которого приведены на рисунке 2. Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод о необходимости учета поверхностного эффекта при моделировании магнитных полей магнитострикционных приборов уже на частотах составляющих десятки КГц.

Вывод. Анализ результатов моделирования, приведенных на рисунках 1 и 2 позволяет сделать вывод, что с увеличением частоты колебаний переменного тока происходит резкое уменьшение толщины эффективно проводящего $z_{\text{Э}}$ -слоя. Это должно быть учтено при разработке и анализе конструкций магнитострикционных преобразователей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учебник. – 9-е изд., перераб. и доп. – М: Гардарики, 2001. – 317 с.
2. Воронцов А.А. Двумерная модель формирования сигнала воспроизведения магнитострикционного накломера /Ю.Н. Слесарев, А.А. Воронцов// Известия Пензенского государственного педагогического университета. Физико математические и физические науки – 2012. - №30. С.462-466.
3. Воронцов А.А. Моделирование магнитной системы магнитострикционного накломера / А.А. Воронцов, Ю.Н. Слесарев// Наука и образование 2010: Сборник материалов международной НПК. – Мурманск: МГТУ, 2010. – С.160-163
4. Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т.2/ К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин. – СПб.: Питер, 2009. – 432 с.
5. Карпухин Э.В. Математическое моделирование магнитных полей накладных магнитострикционных уровнемеров: Дис....канд. техн. наук. – Пенза, 2012. – 157 с.
6. Купалян С.Д. Теоретические основы электротехники. Ч.3. Электромагнитное поле. Издание 3-е, исправленное и дополненное. – М.: Энергия, 1970. – 248 с.
7. Воронцов А.А. Исследование изменения быстродействия при удаленном подключении по сети интернет к рабочему столу виртуальной машины частного облака ПензГТУ. XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2016. № 3 (31). С. 173-178.
8. Прошкин В.Н. Конструкторско-технологические способы совершенствования магнитострикционных преобразователей линейных перемещений для специальных условий эксплуатации: Дис....канд. техн. наук. – Астрахань, 2007. – 229 с.
9. Воронцов, А.А. Двумерная модель формирования сигнала воспроизведения магнитострикционного накломера / Ю.Н. Слесарев, А.А. Воронцов // Известия Пензенского государственного педагогического университета. Физико-математические и технические науки. – 2012. – № 30. – С. 462–466.
10. Слесарев Ю.Н. Реверсивные методы записи для оптических дисковых накопителей: Дис....д-ра техн. наук. – Пенза, 2004. – 342 с.