

УДК 519.711.3

## АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Ю.Н. Слесарев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизация и управление», федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный технологический университет», г. Пенза, Россия, e-mail: [slesarevun@gmail.com](mailto:slesarevun@gmail.com)

**Аннотация.** В данной статье рассмотрено моделирование магнитных полей магнито-стрикционных преобразователей перемещения. Проведено математическое моделирование результирующей напряженности магнитного поля магнито-стрикционных преобразователей перемещения и ее составляющих – созданных токовым импульсом и постоянным магнитом.

*Ключевые слова:* магнитное поле, моделирование магнитных полей, магнито-стрикционный преобразователь, напряженность магнитного поля, расчет напряженности.

## ANALYSIS OF DISTRIBUTION AND MODELLING OF MAGNETIC FIELDS OF MAGNETOSTRICTIVE CONVERTERS OF MOVEMENT

Yuri Slesarev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ph.D., professor of Automation and Management department, federal state-funded educational institution of the higher education 'Penza state technological university', Penza, Russia, e-mail: [slesarevun@gmail.com](mailto:slesarevun@gmail.com)

**Abstract.** In this article modeling of magnetic fields of magnetostrictive converters of movement is considered. Mathematical modeling of resultant tension of magnetic field of magnetostrictive converters of movement and its components – created by a current impulse and a permanent magnet is carried out.

*Keywords:* magnetic field, modeling of magnetic fields, magnetostrictive converter, tension of magnetic field, tension calculation.

**Введение.** Чувствительность, разрешающая способность и диапазон измерений магнито-стрикционных устройств и приборов непосредственно зависят от используемого в них первичного преобразователя [1,2,3,4]. Основными элементами первичного магнито-стрикционного преобразователя перемещений (ПМПП) состоит из волновода, источника импульсного тока и постоянного магнита (ПМ).

**Целью работы** является анализ распределения и моделирование магнитных полей магнито-стрикционных преобразователей перемещения.

### Материал и результаты исследований.

При протекании в магнитоотрицательном преобразователе перемещения в среде волновода (ВЛ) токового импульса создается круговое магнитное поле напряженностью  $\overline{H}_{KP}$  вдоль всей длины волновода. В месте взаимодействия кругового магнитного поля  $\overline{H}_{KP}$  и поля, созданного постоянным магнитом  $\overline{H}_{\Pi}$ , формируется результирующее магнитное поле  $\overline{H}_r$ , которое находится в соответствии с рисунком 1 в виде векторной суммы напряженностей двух полей (принцип суперпозиций для напряженностей магнитного поля) согласно выражению [1-7]

$$\overline{H}_r = \overline{H}_{\Pi} + \overline{H}_{KP}, \quad (1)$$

абсолютное значение которого с учетом взаимноперпендикулярности векторов  $\overline{H}_{\Pi}$  и  $\overline{H}_{KP}$  определится в соответствии с выражением

$$H_r^2 = H_{\Pi}^2 + H_{KP}^2. \quad (2)$$

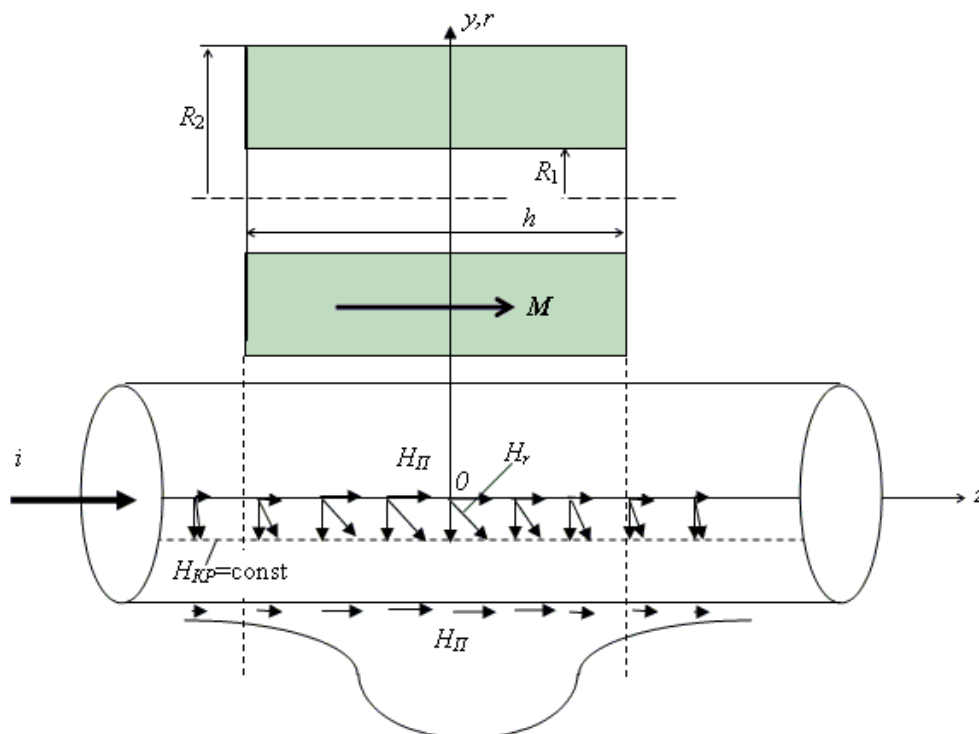


Рисунок 1 - Формирование крутильных колебаний

Одну из составляющих результирующей напряженности магнитного поля, созданную токовым импульсом  $\overline{H}_{KP}$ , можно рассчитать согласно известным выражениям, определяемым по закону полного тока [4]:

$$\bar{H}_{KP} = \frac{i \cdot \bar{j}}{2 \cdot \pi \cdot r_{ВЛ}} \quad (3)$$

и

$$\bar{H}_{KPB} = \frac{r \cdot i \cdot \bar{j}}{2 \cdot \pi \cdot r_{ВЛ}^2}, \quad (4)$$

где  $\bar{H}_{KP}$  - напряженность магнитного поля, созданного токовым импульсом вне ВЛ;  $\bar{H}_{KPB}$  - напряженность магнитного поля, созданного токовым импульсом внутри ВЛ;  $i$  - амплитудное значение токового импульса, измеряемое в Амперах;  $r_{ВЛ}$  - радиус ВЛ в м;  $r$  - текущий радиус внутри проводника в м;  $\bar{j}$  - единичный вектор по касательной к окружности.

Результаты моделирования зависимости напряженности магнитного поля, созданного токовым импульсом от расстояния  $r$ , отсчитываемого от центра ВЛ в плоскости его сечения, приведены на рисунке 2. Для моделирования был использован ВЛ радиусом  $r_{ВЛ} = 0,5$  мм и токовый импульс  $i = 100$  мА.

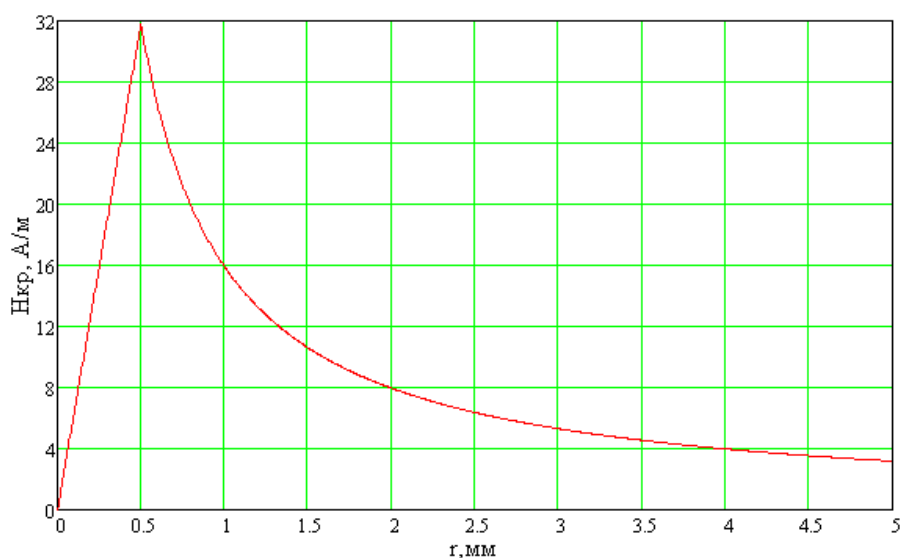


Рисунок 2 – Результаты моделирования зависимости напряженности магнитного поля  $\bar{H}_{KP}$ , созданного токовым импульсом от расстояния  $r$ , отсчитываемого от центра ВЛ в плоскости его сечения

Составляющую напряженности магнитного поля, созданную ПМ  $\bar{H}_{II}$  различной формы, можно рассчитать по формулам, изложенным в [1,2].

Так, для кольцевого постоянного магнита (КПМ) согласно [1] ее значение определится по формуле:

$$H_Z(r) = \frac{1}{\pi} h_M \cdot M \int_{d_M}^{D_M} \frac{E(k_2) \rho \cdot d\rho}{[(r-\rho)^2 + \frac{h_M^2}{4}] \cdot [(r+\rho)^2 + \frac{h_M^2}{4}]^{\frac{1}{2}}}, \quad (5)$$

где  $H_Z(r)$  - проекция вектора напряженности КПМ на ось OZ,  $r$  - расстояние от центра КПМ до точки расчета напряженности магнитного поля,  $D_M$ ,  $d_M$  - соответственно внешний и внутренний радиусы КПМ,  $h_M$  - высота КПМ,  $M$  - намагниченность,  $\rho$  - полярный радиус,

$E(k_2) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k_2^2 (\sin \varphi)^2} d\varphi$  - полный эллиптический интеграл второго

рода,  $k_2^2 = \frac{4 \cdot r \cdot \rho}{(r + \rho)^2 + \frac{h_M^2}{4}}$ .

Результаты моделирования зависимости напряженности магнитного поля, созданного КПМ от расстояния  $r$ , отсчитываемого от боковой поверхности КПМ в горизонтальной плоскости, проходящей через его центр, рассчитанные согласно выражению 5, приведены на рисунке 3. Для моделирования был использован КПМ с внешним  $D_M$  и внутренним  $d_M$  диаметрами равными  $D_M = 110$  мм и  $d_M = 90$  мм соответственно, высотой  $h_M = 1$  мм и значением остаточной индукции  $B_r = 0,01$  Тл.

Наложение магнитных полей, созданных токовым импульсом и постоянным магнитом (ПМ), порождает результирующее магнитное поле, результаты моделирования зависимости напряженности которого от расстояния  $r$ , для рассматриваемых примеров (рисунки 2 и 3), приведены на рисунке 4. Расстояние  $r$  отсчитывается от боковой поверхности ПМ до ближайшей точки на поверхности ВЛ в горизонтальной плоскости, проходящей через центр ПМ и измеряется в метрах.

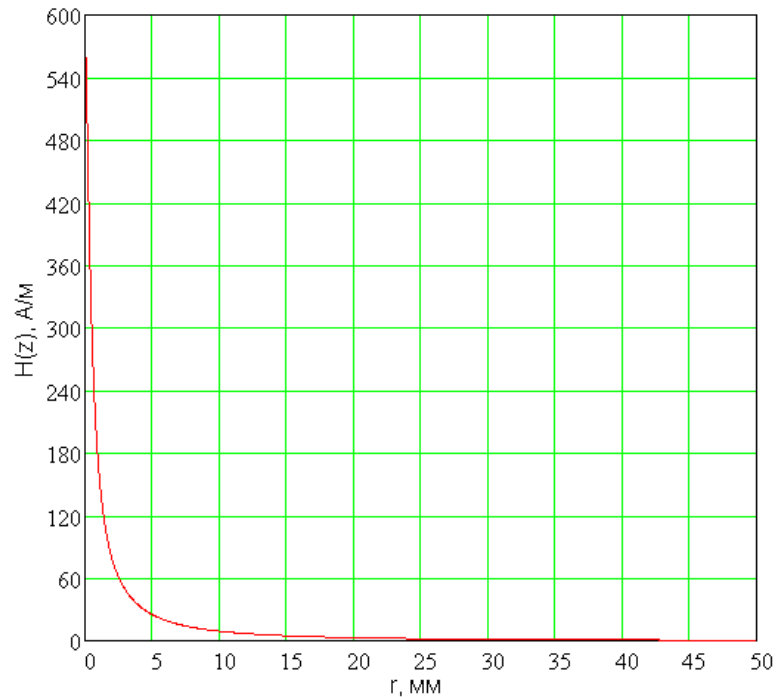


Рисунок 3 – Результаты моделирования зависимости напряженности магнитного поля  $\bar{H}_\Pi$ , созданного КПМ от расстояния  $r$ , отсчитываемого от боковой поверхности ПМ в горизонтальной плоскости, проходящей через его центр

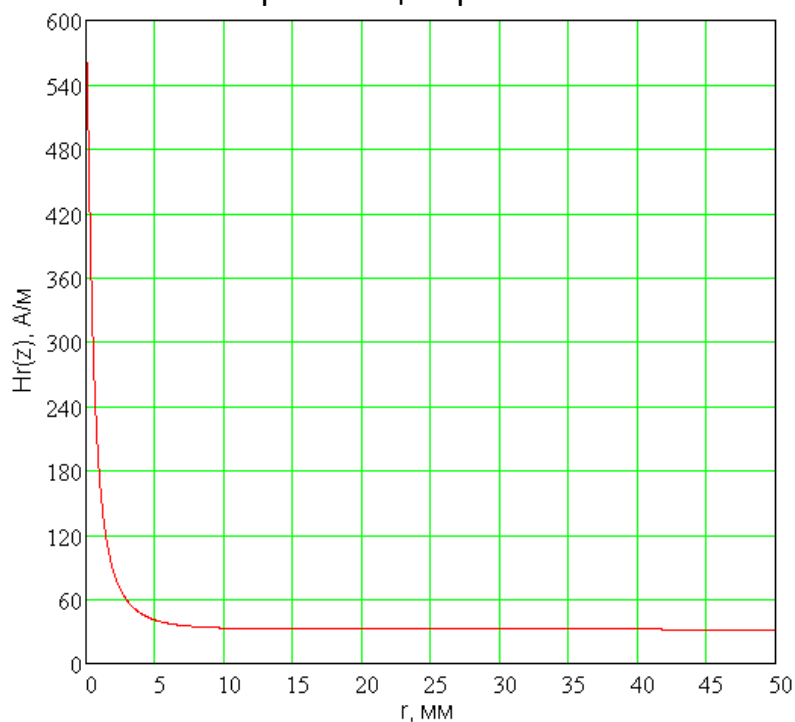


Рисунок 4 – Результаты моделирования зависимости результирующей напряженности магнитного поля,  $\bar{H}_r$ , от расстояния  $r$ , отсчитываемого от боковой поверхности ПМ в горизонтальной плоскости, проходящей через центр ПМ

**Вывод.** Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что существенные отличия в значениях напряженностей магнитных полей, созданных ПМ и результирующей (рисунки 3 и 4) наблюдаются лишь при отдалении ВЛ от ПМ (в приведенных примерах  $r > 2\text{мм}$ ).

Таким образом, влияние составляющих на значение результирующей напряженности магнитного поля будет зависеть от многих факторов, основными из которых являются размеры ПМ и его значение остаточной намагниченности, диаметр ВЛ и значение токового импульса, а также расстояние от ВЛ до ПМ.

В заключении необходимо отметить, что под воздействием магнитного поля со значением результирующей напряженности  $\overline{H}_r$  происходит формирование ультразвуковой волны кручения, являющейся носителем информации об измеряемой величине. Это свидетельствует об актуальности приведенных математических моделей и методиках расчета магнитных полей магнитострикционных преобразователей перемещения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учебник. – 9-е изд., перераб. и доп. – М: Гардарики, 2001. – 317 с.
  2. Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Т.2/ К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин. – СПб.: Питер, 2009. – 432 с.
  3. Купалян С.Д. Теоретические основы электротехники. Ч.3. Электромагнитное поле. Издание 3-е, исправленное и дополненное. – М.: Энергия, 1970. – 248 с.
  4. Воронцов А.А. Математическое моделирование магнитных полей двухкоординатных магнитострикционных наклонеров, содержащих постоянный магнит в форме прямоугольного параллелепипеда/ Ю.Н. Слесарев, А.А. Воронцов, Э.В. Карпухин// Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – т.19. – №1. – С.25-29.
  5. Математическое моделирование магнитных полей двухкоординатных магнитострикционных наклонеров, содержащих постоянный магнит в форме прямоугольного параллелепипеда Слесарев Ю.Н., Воронцов А.А., Карпухин Э.В. Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 19. – № 1. – С. 25–29
  6. Mathematical Modeling of Magnetic Fields of the Permanent Magnets and Solenoids, and Comparing the Results Obtained. Slesarev U.N., Mikhajlov P.G. and Vorontsov A.A. International Journal of Applied Engineering Research (IJAER) Volume 11, Number 20 (2016) pp. 10338–10342
- Повышение эффективности расчета параметров акустических трактов магнитострикционных преобразователей перемещения. Слесарев Ю.Н., Воронцов А.В., Родионов С.В Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016. №2 (Выпуск 56). С. 169–175.