

УДК 519.711.3

## К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЗМОЖНОГО РАССТОЯНИЯ ОТ ВОЛНОВОДА ДО КОЛЬЦЕВОГО ПОСТОЯННОГО МАГНИТА

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 работе рассмотрено моделирование в магнитострикционных угломерах возможных расстояний от кольцевого постоянного магнита до волновода, необходимого для уверенного формирования ультразвуковой волны кручения. Моделирование осуществляется с помощью разработанного программного комплекса «Двухкоординатный МН», ориентированного на анализ магнитных полей двухкоординатных магнитострикционных угломеров. Расчет оптимальных расстояний осуществляется по предложенной методике определения допустимых значений результирующей напряженности магнитного поля.

*Ключевые слова:* кольцевой магнит, расстояние от постоянного магнита до волновода, моделирование магнитных полей, расчет напряженности, оптимальное расстояние.

## TO THE QUESTION OF THE RESEARCH AND MATHEMATICAL MODELLING OF POSSIBLE DISTANCE FROM THE WAVE GUIDE TO THE RING PERMANENT MAGNET

Yuri Slesarev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dr., 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 work modeling in magnetostrictive tiltmeters of possible distances from a ring permanent magnet to the wave guide necessary for sure formation of an ultrasonic wave of torsion is considered. Modeling is carried out by means of the developed program complex "Two-coordinate MN" focused on the analysis of magnetic fields of two-coordinate magnetostrictive tiltmeters. Calculation of optimum distances is performed by the offered technique of determination of permissible values of resultant tension of magnetic field.

*Keywords:* ring magnet, distance from a permanent magnet to a wave guide, modeling of magnetic fields, tension calculation, optimum distance.

**Введение.** Для определения положения различных высотных сооружений, плотин, определения величины прогибов и деформаций опор и балок, контроля углов наклона автомобильных и железных дорог при их строительстве, ремонте и эксплуатации, определения угла наклона дорожных грейдеров, асфальтоукладчиков, подъемников, кранов и экскаваторов применяются приборы, называемые угломерами. В последние годы для этих целей все чаще находят применение магнитострикционные угломеры (МУ). По количеству одновременно измеряемых углов МУ можно подразделить на однокоординатные (ОМУ) и двухкоординатные (ДМУ).

Принцип работы МУ основан на преобразовании временного интервала распространения ультразвуковой волны (УЗВ) кручения в среде волновода (ВЛ) в цифровой код, содержащий информацию об измеряемой величине [1-6]. Возбуждение УЗВ кручения является результатом наложения магнитных полей, созданных одним или несколькими постоянными магнитами и токовым импульсом при протекании в среде ВЛ. Для формирования УЗВ кручения согласно [1-3] необходимо, чтобы значение результирующего магнитного поля  $H_r$  находилось в интервале  $H_1 \leq H_r \leq H_S$ , где согласно указанным источникам  $H_1$  и  $H_S$  - значения напряженности магнитного поля, лежащие на линейном участке начальной петли гистерезиса. Отсутствие справочных данных об указанных значениях  $H_1$  и  $H_S$  ограничивают использование данной математической модели.

**Целью работы** является исследование и математическое моделирование возможного расстояния от волновода до кольцевого постоянного магнита.

#### **Материал и результаты исследований.**

Для анализа магнитных полей двухкоординатных магнитострикционных угломеров авторами был написан многофункциональный комплекс программ (КП) "Двухкоординатный МН", согласно математической модели (МД) которого значение результирующей напряженности магнитного поля, необходимое для уверенного формирования УЗВ кручения должно определяться из условия  $H_{MIN} \leq H_r \leq H_{MAX}$ , где согласно разработанной МД  $H_{MIN} = H_C$  и  $H_{MAX} = H_s$  - минимально и максимально допустимые значения результирующей напряженности магнитного поля,  $H_C$  и  $H_s$  - коэрцитивная сила и напряженность насыщения ПМ.

Отличием предложенной математической модели от известных [1] является возможность определения возможных значений результирующей напряженности магнитного поля используя справочные данные. Так, значение коэрцитивной силы ПМ  $H_C$  в разработанной МО определяется справочно из [1]. Значение напряженности насыщения  $H_s$  рассчитывается по

формуле  $H_s = B_s / \mu \mu_0$ , где  $B_s$ ,  $\mu$  и  $\mu_0$  - индукция насыщения, магнитная проницаемость вещества и магнитная постоянная соответственно, определяемые из справочных данных, например из [1].

В разработанной математической модели МО вводится понятие оптимального значения результирующей напряженности  $H_{ОПТ}$ , определяемое

$$\text{по формуле } H_{ОПТ} = \frac{H_C + H_s}{2}.$$

Так как значение составляющей результирующего магнитного поля зависит от расстояния до ПМ [1,2], то одним из важных этапов математического моделирования магнитных полей ДМН является расчет минимального  $r_{MIN}$ , максимального  $r_{MAX}$  и оптимального расстояния от волновода (ВЛ) до боковой поверхности ПМ, где  $r_{MIN}$ ,  $r_{ОПТ}$  и  $r_{MAX}$  - расстояния

$$\text{вдоль горизонтальной прямой, проходящей через центр ПМ, от боковой поверхности ПМ до точек на поверхности ВЛ со значениями напряженностей результирующего магнитного поля } H_r \text{ равными } H_r = H_s = H_{MAX},$$

$$H_r = \frac{H_C + H_s}{2} = H_{ОПТ} \text{ и } H_r = H_C = H_{MIN} \text{ соответственно.}$$

Определим экспериментально расстояния  $r_{MIN}$ ,  $r_{ОПТ}$  и  $r_{MAX}$ , в ДМН с использованием кольцевых ПМ (КПМ) и проанализируем, как изменяются их значения при изменении размеров элементов конструкции рассматриваемых моделей ДМУ, а также их свойств.

Проведем эксперимент по определению расстояний  $r_{MIN}$ ,  $r_{ОПТ}$  и  $r_{MAX}$  с использованием КПМ различных размеров и значений остаточных индукций  $B_r$ . В качестве базового выбираем КПМ марки 8БИ230 со значением остаточной индукции  $B_r = 0,21$  Тл и коэрцитивной силы  $H_C = 220$  кА/м [1], внешним  $D_M$  и внутренним  $d_M$  диаметрами  $D_M = 110$  мм и  $d_M = 90$  мм соответственно, высотой  $h_M = 5$  мм. В качестве основного будем использовать ВЛ диаметром  $d_{ВЛ} = 1$  мм из сплава 42НХТЮ с  $H_{МИН} = H_C = 60$  А/м [1],  $H_{MAX} = H_s \approx 404$  А/м и  $H_{ОПТ} = 232$  А/м с протекающим по нему токовым импульсом прямоугольной формы амплитудой  $I_m = 50$  мА.

Результаты эксперимента, для данных, рассчитанных комплексом программ "Двухкоординатный МН" и интегрированных в систему MathCad по определению  $r_{МИН}$ ,  $r_{ОПТ}$  и  $r_{MAX}$  для КПМ с различным значением высоты  $h_M$  приведены на рисунке 1.

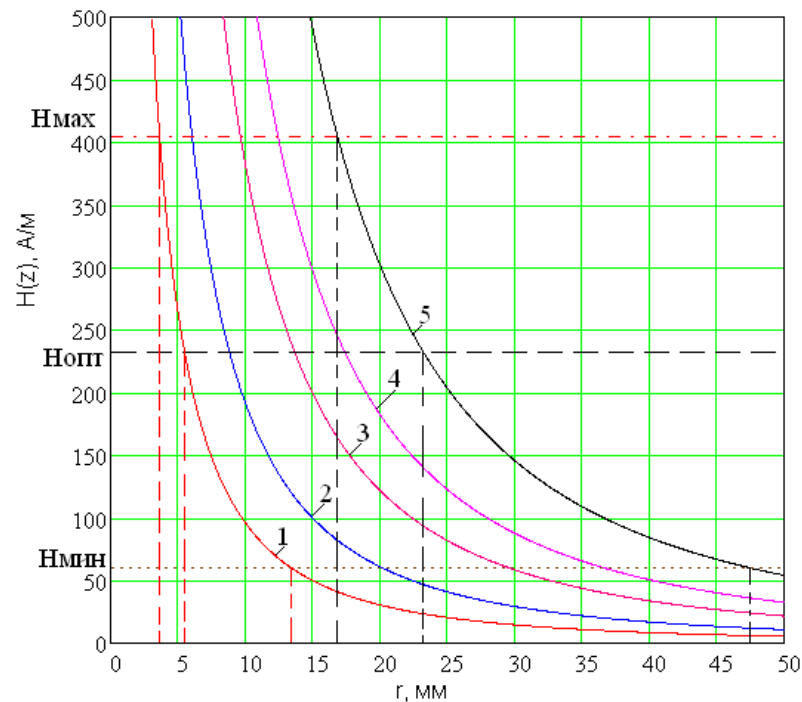


Рисунок 1 - Результаты исследования значений  $r_{\text{MIN}}$ ,  $r_{\text{ОПТ}}$  и  $r_{\text{МАХ}}$  при изменении высоты  $h_M$  КПМ высотой  $h_M$  равной: 1 -  $h_M = 0,5\text{мм}$ , 2 -  $h_M = 1\text{мм}$ , 3 -  $h_M = 2\text{мм}$ , 4 -  $h_M = 3\text{мм}$ , 5 -  $h_M = 5\text{мм}$

Анализ данных, полученных в результате эксперимента, позволяет сделать вывод, что изменение высоты ПМ позволяет в несколько раз изменить допустимое расстояние от боковой поверхности КПМ до ВЛ при условии уверенного формирования в среде ВЛ УЗВ кручения. Так, изменение высоты КПМ с  $h_M = 0,5\text{мм}$  до  $h_M = 5\text{мм}$  в рассматриваемых примерах позволяет удалить ВЛ от боковой поверхности с оптимального расстояния  $r_{\text{ОПТ}} = 6\text{мм}$  до  $r_{\text{ОПТ}} = 24\text{мм}$ , что соответствует увеличению расстояния в 4 раза.

**Вывод.** Результаты проведенных экспериментов по выбору оптимального расстояния от КПМ до ВЛ, приведенные на рисунке 1 позволяют сделать вывод, что указанное расстояние должно быть в диапазоне  $r_{\text{МИН}} \leq r \leq r_{\text{МАХ}}$  и зависит от геометрических размеров ПМ и ВЛ, их остаточной намагниченности и токового импульса. Выбор расстояния  $r$  в указанном интервале способствует уверенному возбуждению УЗВ кручения в среде ВЛ, что является необходимым условием работы ДМУ.

## 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 магнитоотрицательных наклонных, содержащих постоянный магнит в форме прямоугольного параллелепипеда/ Ю.Н. Слесарев, А.А. Воронцов, Э.В. Карпунин// Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2013. – т.19. – №1. – С.25-29.
5. 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
6. Повышение эффективности расчета параметров акустических трактов магнитоотрицательных преобразователей перемещения. Слесарев Ю.Н., Воронцов А.В., Родионов С.В Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2016.№2 (Выпуск 56). С. 169–175.

УДК 519.711.3

## К ВОПРОСУ ИССЛЕДОВАНИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЗМОЖНОГО РАССТОЯНИЯ ОТ ВОЛНОВОДА ДО СПЛОШНОГО ПОСТОЯННОГО МАГНИТА

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 работе рассмотрено моделирование в магнитоотрицательных углах возможных расстояний от сплошного постоянного магнита до волновода, необходимого для уверенного формирования ультразвуковой волны кручения. Моделирование осуществляется с помощью разработанного программного комплекса «Двухкоординатный МН», ориентированного на анализ магнитных полей двухкоординатных магнитоотрицательных угломеров. Расчет оптимальных расстояний осуществляется по предложенной методике определения допустимых значений результирующей напряженности магнитного поля.

*Ключевые слова:* сплошной магнит, расстояние от постоянного магнита до волновода, моделирование магнитных полей, расчет напряженности, оптимальное расстояние.