

УДК 519.711.3

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ В МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ НАКЛОНОМЕРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНСТРУМЕНТОВ MATHCAD

Малышев Б.В., Минеева Т.В., Воронцов А.А.

Пензенский государственный технологический университет, Пенза,

e-mail: Aleksander.Vorontsov@gmail.com

В статье рассмотрено моделирование магнитных полей постоянных магнитов цилиндрической формы в магнитоотрицательных наклонмерах. Отличительными особенностями магнитоотрицательных наклонмеров, то есть приборов, предназначенных для определения отклонения объекта относительно горизонтали или вертикали, являются высокая точность, быстродействие, широкий диапазон преобразования, и др., а также относительно невысокая себестоимость и простота реализации. Задачей этой статьи является оценка влияния каждого из основных факторов, влияющих на формирование магнитного поля созданных кольцевым постоянным магнитом, используемых в двухкоординатных магнитоотрицательных наклонмерах методом математического моделирования. Это позволит улучшить характеристики двухкоординатного магнитоотрицательного наклонмера и снизить его себестоимость. Проведено математическое моделирование результирующей напряженности магнитного поля магнитоотрицательных наклонмеров и ее составляющих – созданных токовым импульсом и постоянным магнитом.

Ключевые слова: магнитное поле, моделирование магнитных полей, двухкоординатный магнитоотрицательный наклонмер, напряженность магнитного поля, расчет напряженности

RESEARCH AND THE ANALYSIS OF MAGNETIC FIELDS OF CONSTANT MAGNETS OF THE CYLINDRICAL FORM IN MAGNETOSTRICTIVE TILTMETERS WITH USE OF MATHCAD TOOLS

Malyshev B.V., Mineeva T.V., Vorontsov A.A.

Penza State Technological University, Penza, e-mail: Aleksander.Vorontsov@gmail.com

The simulation of magnetic fields of permanent magnets of cylindrical shape in magnetostriuctive tiltmeters is considered in the article. Distinctive features of magnetostriuctive tiltmeters, that is, instruments designed to determine the deviation of an object relative to the horizontal or vertical, are high accuracy, speed, wide conversion range, etc., as well as relatively low cost and ease of implementation. The aim of this article is to evaluate the influence of each of the main factors influencing the formation of the magnetic field created by an annular permanent magnet used in two-coordinate magnetostriuctive tiltmeters by mathematical modeling. This will improve the characteristics of the two-coordinate magnetostriuctive tiltmeter and reduce its cost price. Mathematical modeling of the resultant magnetic field strength of magnetostriuctive tiltmeters and its components – created by a current pulse and a permanent magnet – is performed.

Keywords: magnetic field, modelling of magnetic fields, two-coordinate magnetostriuctive tiltmeter, intensity of a magnetic field, intensity calculation

Чувствительность, разрешающая способность и диапазон измерений магнитоотрицательных наклонмеров непосредственно зависят от используемого в них первичного преобразователя [1–3]. Интерес к математическим модели процессам и явлениям в системах, в которых используются или возможно использование магнитоотрицательных преобразователей перемещений обусловлен множеством работ, в частности [4]. Основными элементами первичного магнитоотрицательного преобразователя (ПМП) магнитоотрицательного наклонмера (МН) состоит из волновода, источника импульсного тока и постоянного магнита (ПМ).

При протекании в МН в среде волновода (ВЛ) токового импульса создается круговое магнитное поле напряженностью H_{KP} вдоль

всей длины ВЛ. В месте взаимодействия кругового магнитного поля H_{KP} и поля, созданного постоянным магнитом $H_{П}$, формируется результирующее магнитное поле H_r , которое находится в соответствии с рисунком 1 в виде векторной суммы напряженностей двух полей (принцип суперпозиций для напряженностей магнитного поля) согласно выражению

$$\overline{H_r} = \overline{H_{П}} + \overline{H_{KP}}, \quad (1)$$

абсолютное значение которого с учетом взаимноперпендикулярности векторов $H_{П}$ и H_{KP} определится в соответствии с выражением

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

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

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

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

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, ρ – 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,

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

Следует отметить, что составляющая напряженности магнитного поля, созданная ПМ представляет наибольший интерес, так как она зависит от множества факторов, основными из которых являются форма и размеры ПМ, а также значение остаточной намагниченности и коэрцитивной силы.

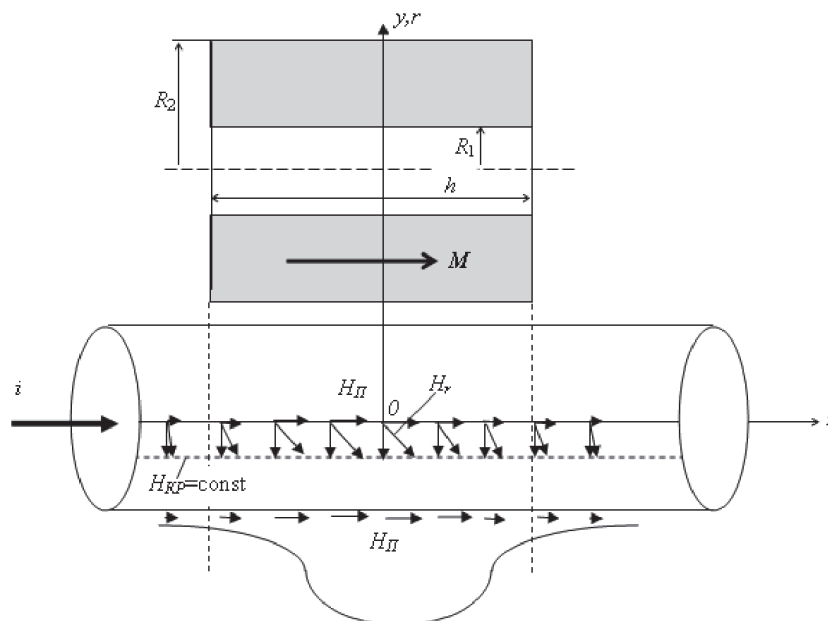


Рис. 1. Формирование крутильных колебаний

Задачей данной статьи является оценка влияния каждого из основных факторов, влияющих на формирование магнитного поля созданных кольцевым (КПМ) ПМ, используемых в ДМН методом математического моделирования. Это позволит улучшить характеристики ДМН и снизить его себестоимость.

Одним из способов аналитического преобразования уравнений магнитного поля является их предварительное сведение к уравнению относительно скалярного магнитного потенциала [4]. Данный метод расчета является наиболее эффективным, так как скалярными здесь являются не только рассчитываемая величина, но и решаемое уравнение в целом.

Для моделирования магнитных полей, созданных кольцевым ПМ, воспользуемся формулой проекции вектора напряженности магнитного поля на ось Z, созданного ПМ радиусом R_M и высотой h_M для КПМ (рис. 2):

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

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

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

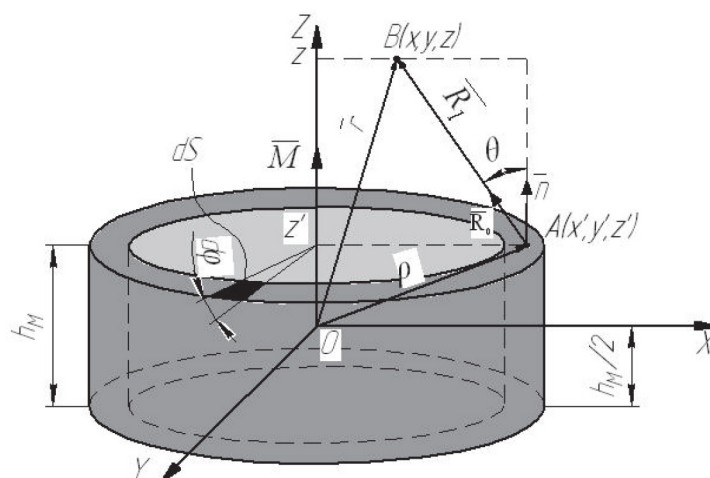


Рис. 2. Кольцевой постоянный магнит

На основании формулы (2) можно сделать вывод, что напряженность магнитного поля, созданная ПМ в разной степени зависит от его размеров и величины остаточной намагниченности.

Это также наглядно демонстрируют результаты моделирования зависимостей напряженности магнитного поля, созданные кольцевым ПМ от высоты h_M (рис. 3) и внутреннего диаметра d_M КПМ (рис. 4). Для моделирования в качестве основного был выбран КПМ с размерами $D_M \times d_M \times h_M = 110 \times 90 \times 5$ мм соответственно со значением остаточной индукции $B_r = 0,35$ Тл. Моделируемое значение напряженности определялось вдоль оси абсцисс, совмещенной с центром ПМ.

Анализ результатов моделирования, приведенных на рис. 2–3, позволяет сделать вывод, что наиболее эффективным способом изменения напряженности магнитного поля вне ПМ является изменение значения остаточной индукции, определяемой маркой ПМ и высоты.

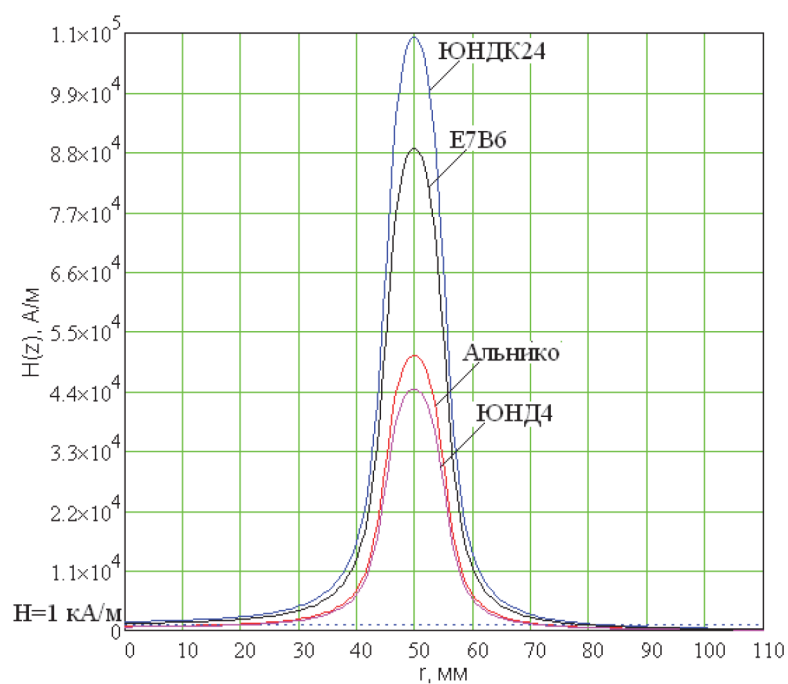


Рис. 3. Зависимость напряженности магнитного поля от высоты КПМ

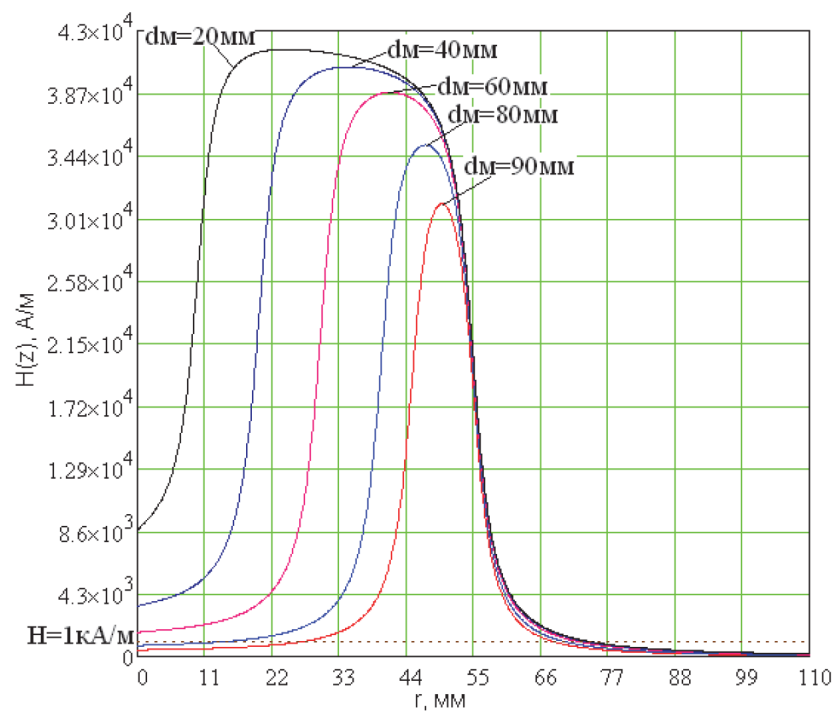


Рис. 4. Зависимость напряженности магнитного поля от внутреннего диаметра КПМ

Изменение диаметра ПМ при значениях $D_M - d_M > 5$ мм сопровождается незначительным изменением значения напряженности магнитного поля вне ПМ. Поэтому дальнейшее увеличение этого значения является необоснованным.

Таким образом, полученные в результате теоретического исследования математические формулы позволяют найти оптимальное значение параметров конструкции, что позволяет подобрать оптимальное значение массы и габаритов ДМН, уменьшая при этом его себестоимость изготовления.

Список литературы

1. Воронцов А.А. Математическое моделирование и расчет магнитных полей магнитострикционных преобразователей

угловых перемещений, содержащих сплошной постоянный магнит / Ю.Н. Слесарев, А.А. Воронцов, С.В. Родионов // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. – 2015. – № 3 (25). – С. 169–175.

2. Воронцов А.А. Исследование и моделирование блока обработки сигнала магнитострикционных преобразователей линейных перемещений на ультразвуковых волнах кручения / Ю.Н. Слесарев, С.В. Родионов, А.А. Воронцов // Современные информационные технологии. – 2015. – № 21. – С. 195–198.

3. Vorontsov A.A. The mathematical modeling and calculation of magnetic fields two-co-ordinate magnetostrictive tiltmeters taking into account skin-effect / Y.N. Slesarev, A.A. Vorontsov, S.V. Rodionov // Наука и технологии. – 2015. – № 1. – С. 8–18.

4. Vorontsov A.A. Mathematical modelling of optimum distance from the continuous constant magnet to the waveguide / U.N. Slesarev, A.A. Vorontsov, S.V. Rodionov // Japanese Educational and Scientific Review. – 2015. – Т. XI. – № 1 (9). – С. 716–722.