

11. Воронцов А.А. Математическое моделирование магнитных полей в двухкоординатных магнитострикционных наклонмерах: Дис....канд. техн. наук. – Пенза, 2013. – 160 с.

УДК 519.711.3

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СПЛОШНЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЛИНЕЙНЫХ ИЛИ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Ю.Н. Слесарев¹, А.Н. Саламатин²

¹ профессор кафедры "Автоматизация и управление", д.т.н., Пензенский Государственный Технологический Университет, г. Пенза, Россия, e-mail: SlesarevUN@gmail.com

² аспирант гр.19ТИ, Пензенский Государственный Технологический Университет, г. Пенза, Россия, e-mail: salamatin1994@yandex.ru

Аннотация. в статье подробно рассмотрен анализ основных факторов, влияющих на формирование магнитных полей магнитострикционных преобразователей линейных или угловых перемещений при использовании в них сплошного постоянного магнита. Выполнен анализ влияния каждого фактора. Выведены расчетные формулы по расчету напряженностей магнитных полей, созданных сплошным постоянным магнитом.

Ключевые слова: моделирование, магнитострикция, магнитострикционный преобразователь, преобразователь угловых перемещений, магнитное поле, математическое моделирование магнитных полей.

STUDY OF THE MAGNETIC FIELD TENSION OF CONTINUOUS CONSTANT MAGNETS OF MAGNETOSTRICTION CONVERTERS OF LINEAR OR ANGULAR MOVEMENTS

Yu.N. Slesarev¹, A.N. Salamatin²

¹Ph.D., professor of department "Automation and Control", Penza State Technological University, s. Penza, Russia, e-mail: SlesarevUN@gmail.com

²postgraduate, Penza State Technological University, s. Penza, Russia, e-mail: salamatin1994@yandex.ru

Abstract. The article discusses in detail the analysis of the main factors affecting the formation of magnetic fields of magnetostrictive converters of linear or angular displacements when using a continuous permanent magnet in them. The analysis of the influence of each factor is carried out. Calculation formulas are derived for calculating the strengths of magnetic fields created by continuous permanent magnets.

Keywords: modeling, magnetostriction, magnetostrictive transducer, angular displacement transducer, magnetic field, mathematical modeling of magnetic fields.



Введение. В настоящее время во многих видах промышленности для определения углов наклона объекта относительно горизонтали или вертикали все чаще используют различные виды преобразователи угловых перемещений. По ряду основных параметров, таких как точность, стоимость, масса, габариты и быстродействие [1-13] привлекательными являются магнитострикционные преобразователи угловых перемещений (МПУП). В зависимости от области применения, МПУП подразделяют на два основных класса: однокоординатные и двухкоординатные МПУП (ДМПУП). Последние позволяют одновременное определение углов наклона относительно горизонтали или вертикали в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Одной из перспективных разновидностей ДМПУП, из-за отсутствия в них дисперсии скорости, является ДМПУП с использованием ультразвуковых волн (УЗВ) кручения.

Цель работы.

Целью работы является исследование напряженности магнитного поля сплошных постоянных магнитов магнитострикционных преобразователей линейных или угловых перемещений.

Материал и результаты исследований.

В качестве объекта исследования выберем один из вариантов ДМПУП на УЗВ кручения, схема которого приведена на рис. 1.

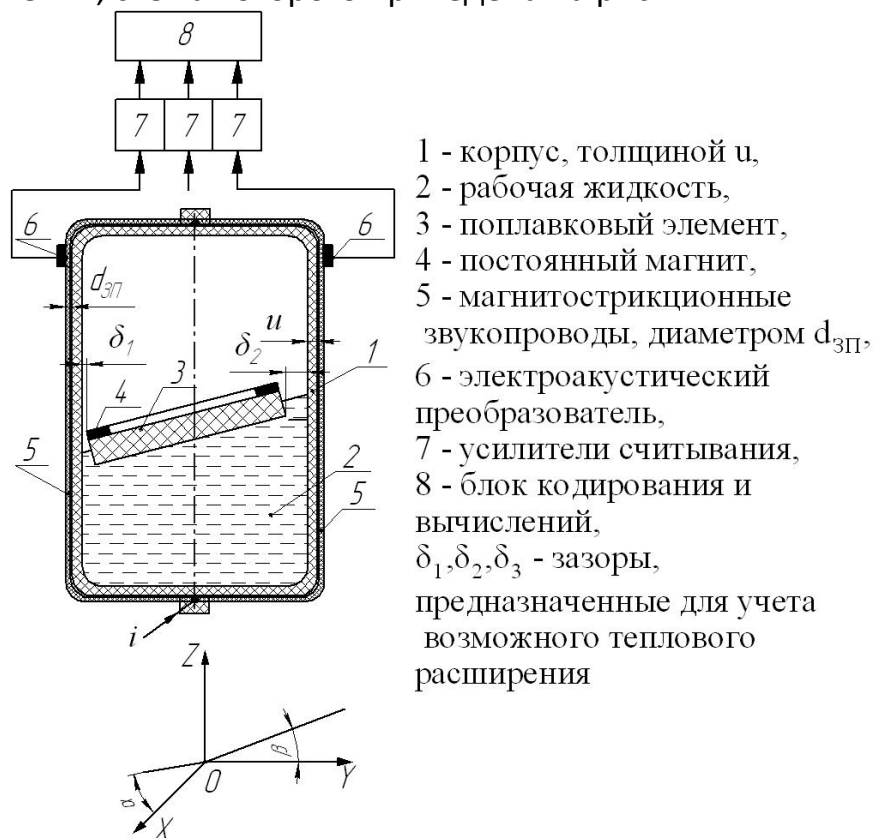


Рисунок 1 – Структурная схема ДМПУП на УЗВ кручения

Следует отметить, что результирующее магнитное поле, формируемое ДМПУП, состоит из двух составляющих – созданной токовым импульсом при протекании им в среде волновода (ВЛ) и созданной постоянным магнитом (ПМ). Последняя составляющая представляет наибольший интерес, так как она зависит от множества факторов, основными из которых являются форма и размеры ПМ, а также значение остаточной намагниченности B_r и коэрцитивной силы H_C .

Задачей данной статьи является оценка влияния каждого из основных факторов, влияющих на формирование магнитного поля созданных сплошным (СПМ) ПМ, используемого в ДМПУП методом математического моделирования. Это позволит улучшить характеристики ДМПУП 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 сплошным ПМ, выведем соответствующую формулу расчета с учетом влияния перечисленных факторов указанным методом применительно к различным конструкциям ДМН.

Известно, что напряженность магнитного поля \bar{H} , созданного фиктивными поверхностными зарядами сплошного ПМ с плотностью $\sigma'_M = M$, согласно рисунку 2, определяется по формуле [5]

$$\bar{H} = \int \frac{dp_m}{R_1^2} \cdot \bar{R}_0, \quad (1)$$

где dp_m - элементарный магнитный момент; \bar{R}_1 - вектор, направленный из точки $A(x, y, z)$, расположенной на верхней или нижней поверхности ПМ в точку $B(x', y', z')$, расчета напряженности магнитного поля; \bar{R}_0 - единичный вектор в направлении \bar{R}_1 .

Элементарный магнитный момент dp_m можно рассчитать согласно [5] по формуле

$$dp_m = \bar{n} \cdot \bar{M} \cdot ds, \quad (2)$$

где \bar{n} - нормаль к плоскости ПМ, \bar{M} - вектор намагниченности, ds - элементарная площадь ПМ.

С учетом того, что косинус угла θ между векторами \bar{n} и \bar{R}_0 согласно рисунка 2, можно записать как $\cos \theta = \bar{n} \cdot \bar{R}_0 = (z - z') / R_1$, формулы (2), а также,

что $z' = \pm h_M / 2$, $z = 0$, напряженность магнитного поля \bar{H} из (1) определится выражением:

$$\bar{H} = -\frac{h_M}{2} \int \frac{\bar{M} \cdot ds}{R_1^3} - \frac{h_M}{2} \int \frac{\bar{M} \cdot ds}{R_1^3} = -h_M \int \frac{\bar{M} \cdot ds}{R_1^3}, \quad (3)$$

где h_M - высота ПМ.

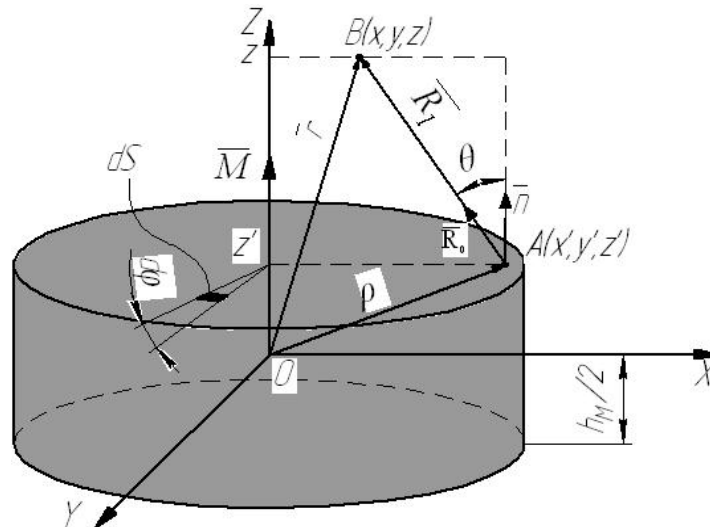


Рисунок 2 - Поясняющий рисунок к расчету магнитного поля ПМ цилиндрической формы

Так как проекции векторов намагниченности и напряженности магнитного поля на ось Z равны $H_z = \bar{H} \cdot \bar{n}$ и $M_z = \bar{M} \cdot \bar{n}$, то выражение (3) для проекции H_z можно записать:

$$H_z = -h_M \int \frac{M_z \cdot ds}{R_1^3} \quad (4)$$

В цилиндрической системе координат выражение (2.4) имеет вид:

$$H_z(r) = -h_M \cdot M \int_{R_M}^{\infty} \int_0^{2\pi} \frac{\rho \cdot d\rho \cdot d\varphi}{(r^2 + \rho^2 - 2 \cdot r \cdot \rho \cdot \cos\varphi + \frac{h_M^2}{4})^{\frac{3}{2}}}, \quad (5)$$

где r - расстояние от центра ПМ до точки расчета напряженности магнитного поля, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$; ρ - полярный радиус, определяемый расстоянием от центра ПМ до точки, лежащей на его верхней или нижней поверхности, $\rho = \sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2}$; R_M - радиус ПМ.

Выражение (5) можно упростить, используя известное равенство [6]:

$$\int_0^{2\pi} \frac{d\gamma'}{(a' + b' \cos \gamma')^{\frac{3}{2}}} = \frac{1}{(a'^2 - b'^2)^{\frac{3}{2}}} \int_0^{2\pi} \frac{1}{(a' + b' \cos \gamma')^2} d\gamma', \quad (6)$$

где a' и b' - константы, γ' - угол.

Окончательно, проекция вектора напряженности магнитного поля на ось Z, созданного ПМ радиусом R_M и высотой h_M будет рассчитываться:

$$H_z(r) = 4h_M \cdot M \int_{R_M}^{\infty} \frac{E(k_2) \rho \cdot d\rho}{[(r - \rho)^2 + \frac{h_M^2}{4}] \cdot [(r + \rho)^2 + \frac{h_M^2}{4}]^{\frac{1}{2}}}, \quad (7)$$

где $E(k_2) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k_2^2 (\sin \varphi)^2} d\varphi$ - полный эллиптический интеграл второго рода, $k_2^2 = \frac{4 \cdot r \cdot \rho}{(r + \rho)^2 + \frac{h_M^2}{4}}$.

На основании формулы (7) можно сделать вывод, что напряженность магнитного поля, созданная ПМ в разной степени зависит от его размеров и величины остаточной намагнитченности.

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

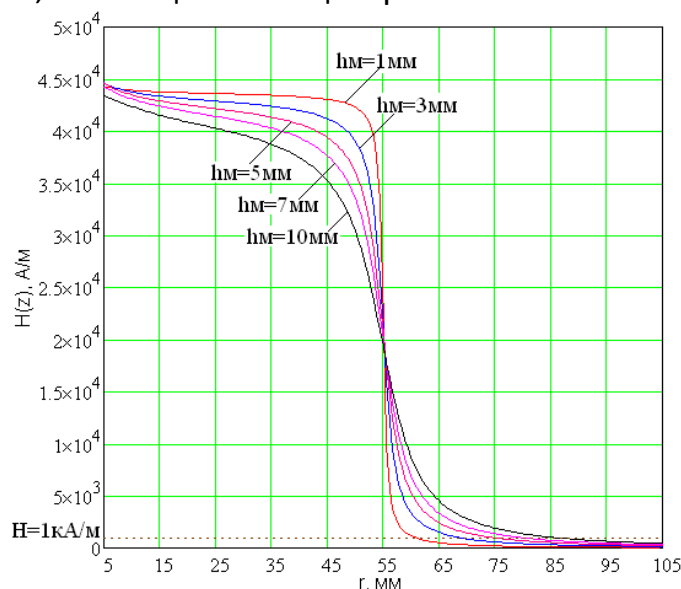


Рисунок 3 - Зависимость напряженности магнитного поля от высоты СПМ

Анализ результатов моделирования, приведенных на рисунках 3 –5, позволяет сделать вывод, что наиболее эффективным способом изменения

напряженности магнитного поля вне ПМ является изменение значения остаточной индукции, определяемой маркой ПМ и высоты.

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

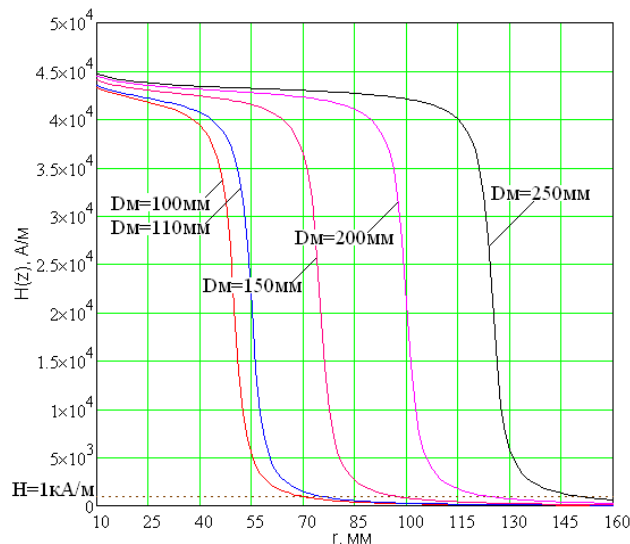


Рисунок 4 – Зависимость напряженности магнитного поля от диаметра СПМ

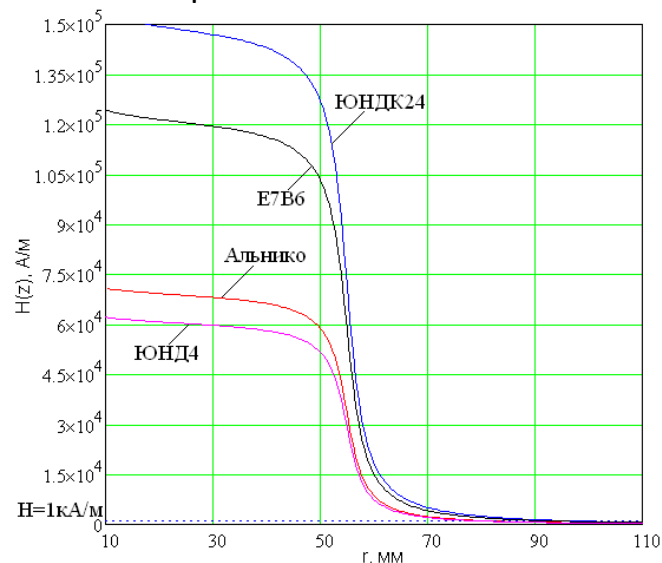


Рисунок 5 – Зависимость напряженности магнитного поля от марки СПМ

Также необходимо отметить, что максимальное значение напряженности магнитного поля было зафиксировано в центре ПМ.

Вывод. 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.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Прошкин В.Н. Конструкторско-технологические способы совершенствования магнитострикционных преобразователей линейных перемещений для специальных условий эксплуатации: Дис....канд. техн. наук. – Астрахань, 2007. – 229 с.
3. Воронцов, А.А. Двумерная модель формирования сигнала воспроизведения магнитострикционного наклономера / Ю.Н. Слесарев, А.А. Воронцов // Известия Пензенского государственного педагогического университета. Физико-математические и технические науки. – 2012. – № 30. – С. 462–466.
4. Воронцов, А.А. Математическое моделирование магнитных полей двухкоординатных магнитострикционных наклономеров, содержащих кольцевой или сплошной постоянный магнит / Ю.Н. Слесарев, А.А. Воронцов, Э.В. Карпунин // Известия Пензенского государственного педагогического университета. Физико-математические и технические науки. – 2012. – № 30. С. 467–472.
5. Прецизионные сплавы. Справочник /Под ред. Молотилова Б.В. -М.: Metallurgia, 1983.-439 с.
6. Голямина И.П. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
7. Немцов М.В. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности/ М.В. Немцов, Ю.М. Шамаев. – М.: Энергоиздат, 1981. – 136 с.
8. Слесарев Ю.Н. Реверсивные методы записи для оптических дисковых накопителей: Дис....д-ра техн. наук. – Пенза, 2004. – 342 с.
9. Воронцов А.А. Математическое моделирование магнитных полей в двухкоординатных магнито-стрикционных наклономерах: Дис....канд. техн. наук. – Пенза, 2013. – 160 с.
10. Cozzolino J. Magnet engineering and test results of the high field magnet R&D program at BNL. / J. Cozzolino, M. Anerella, J. Escallier, G. Ganetis, A. Ghosh, R. Gupta, M. Harrison, A. Jain, A. Marone, J. Muratore, B. Parker, W. Sampson, R. Soika, P. Wanderer // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2003. - Vol.13, Issue 2, PP. 1347 – 1350.
11. Pradhan S. First Engineering Validation Results of SST-1 TF Magnets System. /S. Pradhan, K. Doshi, A. Sharma, U. Prasad, Y. Khristi, V. Tanna, Z. Khan, A. Varadharajalu, D. Sharma, M. Vora, A. Singh, B. Parghi, M. Banaudha, J. Dhongde, P. Varmora, D. Patel // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2014. - Vol. 24, Issue 3, Art. Seq. Num. 4301904.
12. Wiegers S. A. J. Conceptual Design of the 45 T Hybrid Magnet at the Nijmegen High Field Magnet Laboratory. / S. A. J. Wiegers, A. den Ouden, J. Rook, J. A. A. J. Perenboom, H. H. J. ten Kate, M. D. Bird, A. Bonito-Oliva, J. C. Maan // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2010. – Vol. 20, Issue 3, PP. 688 – 691.
13. Park D. K. MgB₂ for MRI Magnets: Test Coils and Superconducting Joints Results. / D. K. Park, J. Ling ; M. Rindfleisch ; J. Voccio ; S. Hahn ; J. Bascunan ; M. Tomsic ; Y. Iwasa // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2012. – Vol. 22 , Issue 3. Art. Seq. Num. 4400305.