

ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА

УДК: 608.2, 004.021, 004.94

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ
АКУСТИЧЕСКИХ ТРАКТОВ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ****Ю. Н. Слесарев**, профессор кафедры ВМиС ПензГТУ, д.т.н.; SlesarevUN@gmail.com**А. А. Воронцов**, доцент кафедры ВМиС ПензГТУ, к.т.н.; Aleksander.Vorontsov@gmail.com**С. В. Родионов**, аспирант кафедры ВМиС ПензГТУ; rodionov-sergei@yandex.ru

Статья посвящена моделированию в магнитоотрицательных преобразователях перемещений магнитных полей, а также возможных и рекомендуемых расстояний от постоянного магнита до волновода. Целью работы является исследование акустических трактов магнитоотрицательных преобразователей перемещения и реализация в них нового способа расчета возможных и рекомендуемых расстояний от постоянного магнита до волновода с помощью соответствующих значений результирующей напряженности магнитного поля. Объектами исследования являются акустические тракты магнитоотрицательных преобразователей перемещения. В них выполнены теоретические и экспериментальные исследования по определению возможных и рекомендуемых расстояний от постоянного магнита до волновода. Рассмотрены основные элементы, входящие в состав акустических трактов, методики расчета результирующей напряженности магнитного поля, произведено математическое моделирование магнитных полей. Предложен способ расчета результирующей напряженности магнитного поля и допустимого расстояния от постоянного магнита до волновода. Моделирование и расчет по предложенному способу рекомендуемых и возможных расстояний от постоянного магнита до волновода позволит на этапе моделирования рассчитать параметры акустического тракта и магнитоотрицательных преобразователей перемещений в целом. Это позволит снизить затраты на разрабатываемые и модернизируемые магнитоотрицательные преобразователи линейных перемещений. В заключение сделаны соответствующие выводы.

Ключевые слова: магнитоотрицательный преобразователь, рекомендуемое расстояние, математическая модель, результирующая напряженность.

DOI: 10.21667/1995-4565-2016-56-2-169-176

Введение

Магнитоотрицательные преобразователи линейных перемещений на сегодняшний день серийно используются во многих сферах науки и техники. Их многообразие на отечественных и зарубежных рынках обусловлено низкой стоимостью и энергопотреблением, возможностью работать с агрессивными средами и различными жидкостями.

Независимо от предназначения и конструкции акустические тракты магнитоотрицательных преобразователей перемещений условно состоят из блока формирования токовых импульсов, одного или нескольких волноводов и постоянных магнитов различной формы, блока считывания и обработки продольных или крутильных механических волн, блока формирования аналогового или цифрового кода линейных перемещений.

Важной задачей, возникающей при проектировании магнитоотрицательных преобразователей линейных перемещений, является расчет допустимых размеров, форм и свойств элементов конструкции и возможных расстояний между ними. Расчет позволяет определить габариты и массу разрабатываемого устройства в целом.

Основным этапом решения данной задачи, с точки зрения авторов, является определение возможного расстояния S_{MV} от постоянного магнита до волновода. Способ расчета минимального, рекомендуемого и максимального расстояний S_{MV} (S_{MVMIN} , S_{MVREK} и S_{MVMAX} соответственно), а также их моделирование в двухкоординатных магнитоотрицательных наклонных является целью данной работы.

Так как магнитоотрицательные приборы позволяют выполнять бесконтактные измерения

(измерения через “стенку” в химической и нефтегазовой промышленности, а также в приборах, использующих жидкость), то материалы, изложенные в работе, будут полезны разработчикам приборов в указанных отраслях, например при выборе толщины немагнитной стенки и величин возможных зазоров.

Постановка задачи

В статье планируется провести исследования в акустических трактах магнитострикционных преобразователей перемещений на крутильных волнах, направленные на определение возможных расстояний от постоянного магнита трех различных форм до волновода. Для решения поставленной задачи планируется провести обзор существующих математических моделей, методов и способов расчета акустических трактов магнитострикционных преобразователей линейных перемещений. На основании обзора планируется связать расстояние от постоянного магнита до волновода с результирующей напряженностью магнитного поля волновода. Далее планируется провести теоретические и экспериментальные исследования возможных и рекомендуемого расстояния от постоянного магнита до волновода, на основании которых планируется сделать соответствующие выводы.

Теоретические исследования

Работа акустических трактов существующих магнитострикционных преобразователей линейных перемещений связана с процессом распространения токовых импульсов в среде волновода. В процессе распространения происходит формирование магнитного поля напряженностью \vec{H}_{IM} , проекция которого на ось OY H_{IMY} на поверхности цилиндрического волновода, в соответствии с рисунком 1, определится по известной формуле [1]:

$$H_{IMY} = I_M / 2 \cdot \pi \cdot R_V, \tag{1}$$

где I_M – амплитуда токовых импульсов, R_V – радиус волновода.

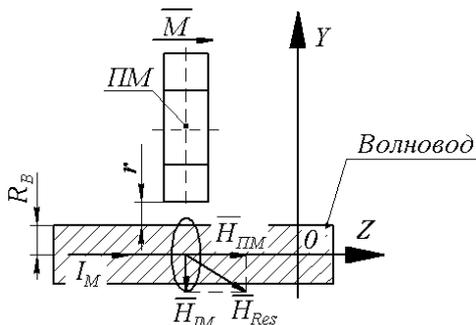


Рисунок 1 – Процесс взаимодействия магнитных полей в среде волновода

Магнитное поле напряженностью \vec{H}_{IM} взаимодействует с магнитным полем, созданным постоянным магнитом (ПМ) $\vec{H}_{ПМ}$, что приводит к формированию результирующего магнитного поля \vec{H}_{RES} (рисунок 1).

Наиболее распространенными формами постоянных магнитов, используемых в конструкциях магнитострикционных преобразователей линейных перемещений, являются постоянные магниты формы прямоугольного параллелепипеда, а также сплошной и кольцевой.

Напряженность постоянного магнита формы прямоугольного параллелепипеда, а также сплошного и кольцевого постоянных магнитов можно определить в соответствии с известными выражениями (2) – (4) соответственно [1, 2, 3].

$$H_{ИИМЗ} = M \times \left[\frac{\left(\frac{x}{z - h_M} \right) \cdot \left(\frac{y - b_M}{\sqrt{(y - b_M)^2 + (z - h_M)^2}} \right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{x}{z - h_M} \right)^2}} \right] - \left[\frac{\left(\frac{x}{z - h_M} \right) \cdot \left(\frac{y}{\sqrt{(y)^2 + (z - h_M)^2}} \right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{x}{z - h} \right)^2}} \right] - \left[\frac{\left(\frac{x - a_M}{z - h_M} \right) \cdot \left(\frac{y - b_M}{\sqrt{(y - b_M)^2 + (z - h_M)^2}} \right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{x - a_M}{z - h_M} \right)^2}} \right] + \left[\frac{\left(\frac{x - a_M}{z - h_M} \right) \cdot \left(\frac{y}{\sqrt{(y)^2 + (z - h_M)^2}} \right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{x - a_M}{z - h_M} \right)^2}} \right] + \left[\frac{\left(\frac{x - a_M}{z} \right) \cdot \left(\frac{y - b_M}{\sqrt{(y - b_M)^2 + (z)^2}} \right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{x - a_M}{z} \right)^2}} \right] -$$

$$\begin{aligned}
 & - \arcsin \left[\frac{\left(\frac{x - a_M}{z} \right) \cdot \left(\frac{y}{\sqrt{(y)^2 + (z)^2}} \right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{x - a_M}{z} \right)^2}} \right] - \\
 & - \arcsin \left[\frac{\left(\frac{x}{z} \right) \cdot \left(\frac{y - b_M}{\sqrt{(y - b_M)^2 + (z)^2}} \right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{x - a_M}{z} \right)^2}} \right] + \\
 & + \arcsin \left[\frac{\left(\frac{x}{z} \right) \cdot \left(\frac{y}{\sqrt{(y)^2 + (z)^2}} \right)}{\sqrt{1 + \left(\frac{x}{z} \right)^2}} \right] , (2)
 \end{aligned}$$

$$H_{СПМЗ}(r) = \frac{1}{\pi} h_M \cdot M \int_0^{D_M} \left(\frac{E(k_2)\rho}{[(r - \rho)^2 + \frac{h_M^2}{4}] \times \frac{d\rho}{[(r + \rho)^2 + \frac{h_M^2}{4}]^{\frac{1}{2}}}} \right) , (3)$$

$$H_{КПМЗ}(r) = \frac{1}{\pi} h_M \cdot M \int_{d_M}^{D_M} \left(\frac{E(k_2)\rho}{[(r - \rho)^2 + \frac{h_M^2}{4}] \times \frac{d\rho}{[(r + \rho)^2 + \frac{h_M^2}{4}]^{\frac{1}{2}}}} \right) . (4)$$

В выражениях (2) – (4), $H_{СПМЗ}$, $H_{КПМЗ}$, $H_{ПМЗ}$ – проекция напряженности $\vec{H}_{ПМ}$ на ось OZ сплошного, кольцевого постоянного магнита, а также магнита формы прямоугольного параллелепипеда соответственно; a_M , b_M и h_M – длина, ширина и высота ПМ; M – намагниченность ПМ; x, y, z, r – координаты точки наблюдения и расстояние до нее от центра ПМ; D_M и d_M – соответственно внешний и внутренний радиусы ПМ; h_M – высота ПМ; ρ – полярный радиус; $E(k_2)$ – полный эллиптический интеграл второго рода, $k_2^2 = (4 \cdot r \cdot \rho) / [(r + \rho)^2 + h_M^2 / 4]$.

Результирующая напряженность магнитного поля на поверхности волновода \vec{H}_{RES} определится в соответствии с рисунком 1 для вектор-

ных и скалярных величин согласно выражениям (5) и (6).

$$\vec{H}_{RES} = \vec{H}_{ПМ} + \vec{H}_{ИМС} , (5)$$

$$H_{RES}^2 = H_{ПМ}^2 + H_{ИМС}^2 . (6)$$

Используя выражения (1) – (6), можно подобрать необходимое расстояние от центра постоянного магнита до ближайшей точки, расположенной на поверхности волновода (на расстоянии R_V от оси OZ).

Указанное расстояние предлагается выбирать исходя из допустимых значений результирующей напряженности магнитного поля H_{RES} , необходимых для формирования волн кручения.

В соответствии с одной из известных математических моделей [4] значение результирующей напряженности магнитного поля H_{RES} должно быть в интервале $H_1 \leq H_{RES} \leq H_S$, где H_1 и H_S – напряженности (H_S – напряженность технического насыщения, как определить значение которого, в приведенном источнике не указано), лежащие на краях линейного участка кривой намагниченности (рисунок 2, а).

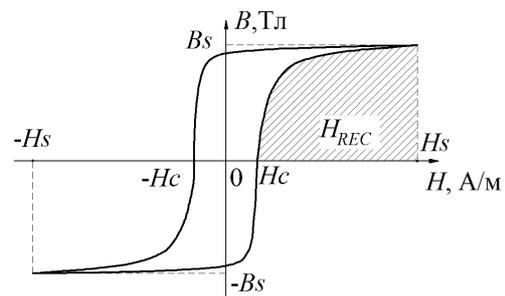
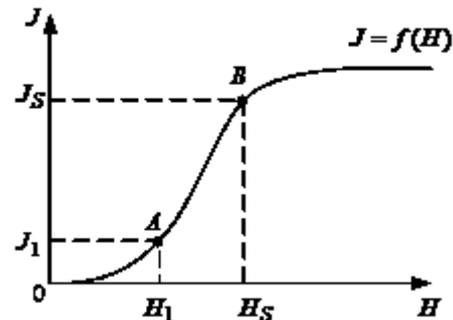


Рисунок 2 – Характеристики материала волновода – характеристическая кривая намагничивания (а) и петля гистерезиса (б)

Основным недостатком данной математической модели является отсутствие справочных данных и формул, позволяющих определить значения напряженностей H_1 и H_S , что вносит некую неопределенность в расчеты.

Также необходимо отметить, что использо-

вание начальной кривой намагниченности ферромагнетика возможно лишь в случаях, когда волновод не находился в состоянии насыщения, что на практике случается крайне редко. Поэтому, более правильным, с точки зрения авторов, будет использование для расчетов значения результирующей напряженности магнитного поля петли гистерезиса, приведенной на рисунке 2, б.

В соответствии с рисунком 2, б минимальное H_{RMIN} и максимальное H_{RMAX} значения результирующей напряженности магнитного поля определяются согласно выражениям (7) и (8) соответственно:

$$H_{RMIN} = H_C, \quad (7)$$

$$H_{RMAX} = H_S, \quad (8)$$

где H_C – коэрцитивная сила (справочная величина, значение которой можно взять, например, из [5]); H_S – напряженность насыщения, значение которой можно определить по известной [1] формуле (9).

$$H_S = B_S / (\mu \cdot \mu_0), \quad (9)$$

где B_S – индукция насыщения; μ и μ_0 – магнитная проницаемость и магнитная постоянная (справочные величины, значения которых можно взять, например, из [5,6]).

Из рисунка 2, б очевидно, что рекомендуемое значение результирующей напряженности магнитного поля должно быть в интервале:

$$H_C \leq H_{REC} \leq H_S. \quad (10)$$

Правильный выбор рекомендуемого значения результирующей напряженности магнитного поля позволит определить оптимальное расстояние от постоянного магнита до волновода, что позволит рассчитать необходимые параметры разрабатываемой конструкции магнотстрикционных преобразователей перемещений.

Определению рекомендуемого значения результирующей напряженности магнитного поля в указанном в выражении (10) диапазоне посвящены экспериментальные исследования.

Экспериментальные исследования

Для проведения экспериментальных исследований по определению рекомендуемого значения результирующей напряженности магнитного поля в акустических трактах магнотстрикционных преобразователей линейных перемещений на крутильных волнах будем использовать конструкцию, которую для удобства будем называть базовой, содержащую постоянный магнит формы прямоугольного параллелепипеда с размерами $a_M \times b_M \times h_M = 40 \times 40 \times 5$ мм марки

8БИ230 (остаточная индукция $B_r = 0,21$ Тл), волновод марки 42НХТЮ ($\mu = 650$, $B_S = 0,33$ Тл, $H_C = 60$ А/м) радиусом $R_V = 0,5$ мм и токовые импульсы i прямоугольной формы с амплитудным значением $I_M = 50$ мА.

В экспериментальных исследованиях будем также использовать величину $H_{CP} = (H_{RMIN} + H_{RMAX})/2$ или с учетом выражений (7) и (8)

$$H_{CP} = (H_C + H_S)/2, \quad (11)$$

где H_{CP} – среднее из допустимых значение результирующей напряженности H_{RES} магнитного поля на поверхности волновода.

Результаты моделирования результирующей напряженности магнитного поля H_{RES} базовой конструкции при изменении амплитудного значения токовых импульсов представлены на рисунке 3, а.

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод о неэффективности изменения возможных кратчайших расстояний r (показано на рисунке 1) от боковой поверхности постоянного магнита до поверхности волновода – как минимального r_{MIN} (значение расстояния r при $H_{RES} = H_{RMAX}$), так и максимального r_{MAX1} ($r_{MAX1} = r_{MAX} - 2R_V$, r_{MAX} – значение расстояния r при $H_{RES} = H_{RMIN}$). Так, при изменении амплитудного значения токовых импульсов минимальное расстояние от постоянного магнита до волновода для рассмотренного случая составляет $r_{MIN} \approx 18$ мм, а максимальное r_{MAX1} – от 47 мм, то есть $(48 - 2 \cdot 0,5)$ при $I_M = 10$ мА до 52 мм $(53 - 2 \cdot 0,5)$ при $I_M = 100$ мА.

Расстояние r_H (r при $H_{RES} = H_{CP}$) от постоянного магнита до волновода составило $r_H \approx 23$ мм.

Рассмотрим динамику изменения возможных значений результирующей напряженности магнитного поля H_{RES} для значения амплитуды токовых импульсов $I_M = 10$ мА.

При изменении расстояния r от r_{MIN} до r_H , то есть на $\Delta r_1 = 23 - 18 = 5$ мм, значение результирующей напряженности изменилось на $\Delta H_1 = H_{RMAX} - H_{CP} = 410 - 230 = 180$ А/м. Изменение же расстояния r от r_H до r_{MAX1} , то есть на $\Delta r_2 = 47 - 23 = 24$ А/м, способствовало изменению напряженности на $\Delta H_2 = H_{CP} - H_{RMIN} = 230 - 60 = 170$ А/м.

Таким образом, анализ результатов, приведенных на рисунке 3, а показал, что изменение отношения $\Delta H / \Delta r$ на отрезках Δr_1 и Δr_2 различно и максимальное изменение результирующей напряженности магнитного поля наблюдается на расстоянии Δr_1 от поверхности волновода до постоянного магнита формы прямоугольного параллелепипеда.

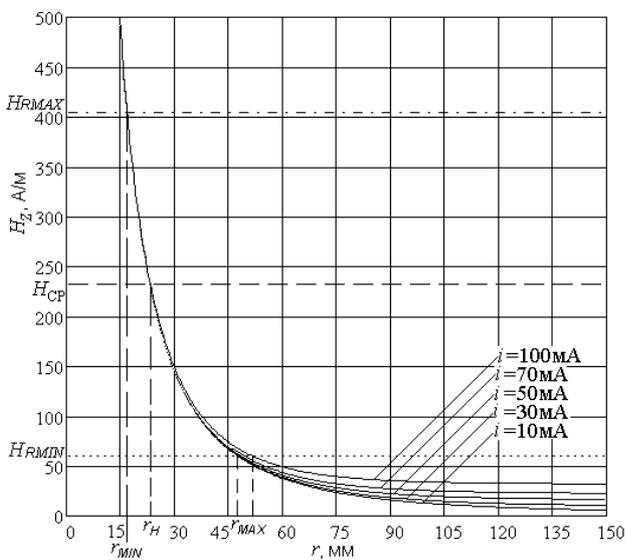
Результаты экспериментальных исследований по определению оптимального расстояния r от постоянного магнита до ближайшей точки, расположенной на поверхности волновода для базовой конструкции при изменении марки волновода, а также высоты и длины (и ширины)

постоянного магнита приведены на рисунке 3, б, в, г и д соответственно.

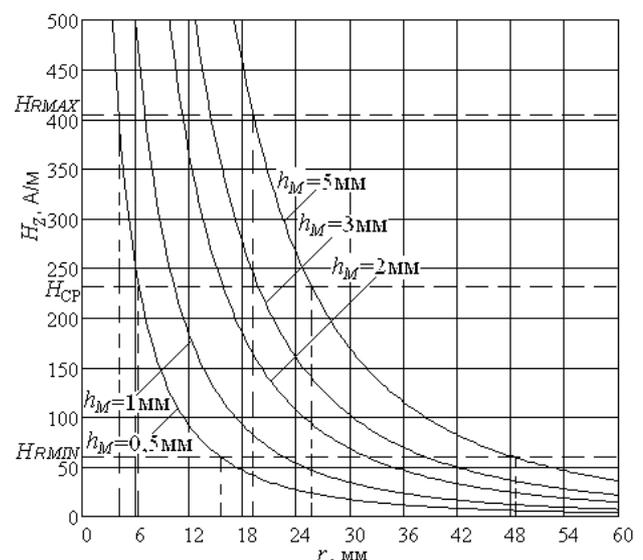
Анализ результатов моделирования позволяет сделать следующие выводы.

1. Изменения размеров и свойств волновода и постоянного магнита являются эффективными способами изменения возможных расстояний от постоянного магнита до поверхности волновода

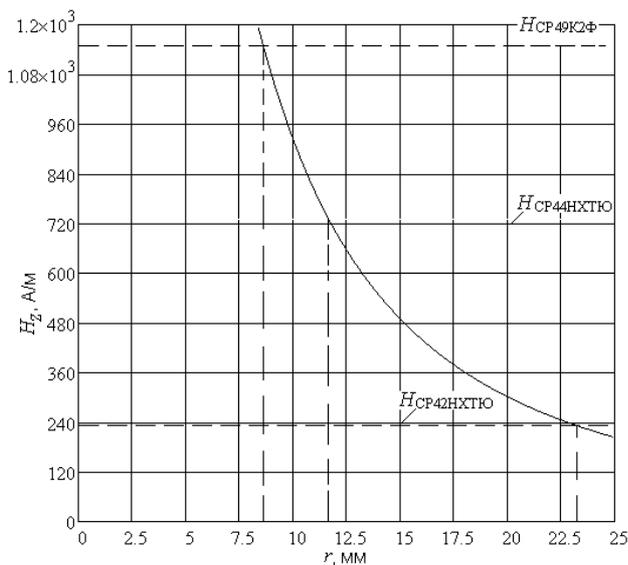
2. Отношение $\Delta H / \Delta r$ на участках Δr_1 и Δr_2 различно. Максимальное изменение результирующей напряженности H_{RES} магнитного поля наблюдается на расстоянии Δr_1 от поверхности волновода до постоянного магнита.



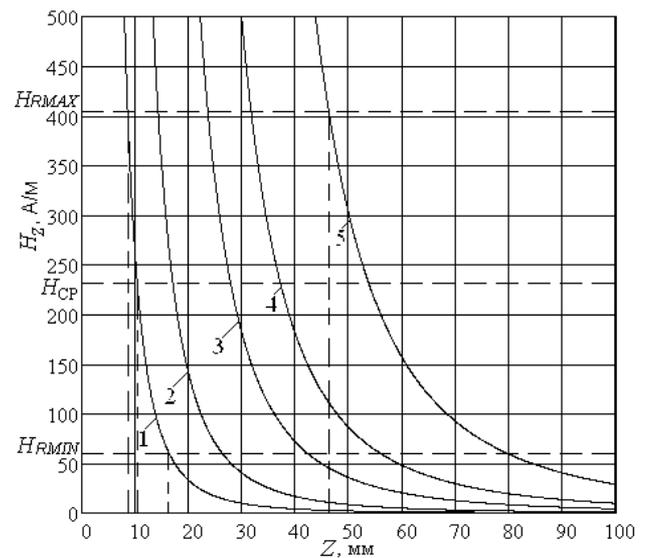
а



б



б



г 1 – $a_M = b_M = 5$ мм, 2 – $a_M = b_M = 10$ мм,
3 – $a_M = b_M = 20$ мм, 4 – $a_M = b_M = 30$ мм,
5 – $a_M = b_M = 50$ мм

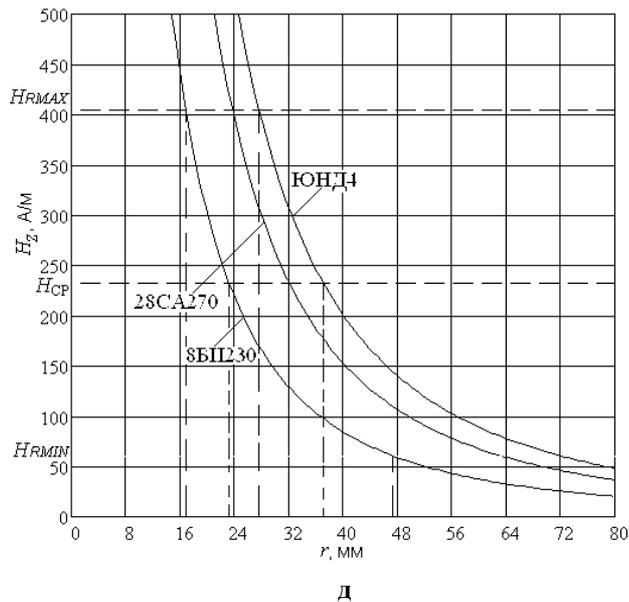


Рисунок 3 – Исследование возможного расстояния от боковой поверхности (r) или центра (Z) до ближайшей точки, расположенной на поверхности волновода для постоянного магнита формы прямоугольного параллелепипеда при изменении амплитуды токовых импульсов (a), марки волновода (b), его высоты (v), его длины и ширины ($г$) и его марки (d)

Аналогичные результаты наблюдаются при экспериментальных исследованиях со сплошными и кольцевыми постоянными магнитами.

Таким образом, на основании изложенного материала можно сделать вывод, что оптимальное расстояние от постоянного магнита до волновода должно быть от r_{MIN} ($H_{RES} = H_{RMAX}$) до r_H ($H_{RES} = H_{CP}$).

Поэтому значение рекомендуемого расстояния r_{REC} (r при $H_{RES} = H_{REC}$) предлагается выбирать с учетом рекомендуемого значения результирующей напряженности магнитного поля на поверхности волновода, определяемой согласно выражению $H_{REC} = (H_{RMAX} + H_{CP}) / 2$, то есть с учетом выражений (7), (8), (9) и (11) по формуле

$$H_{REC} = (H_C + 3B_S / (\mu \cdot \mu_0)) / 4. \quad (12)$$

В заключение необходимо отметить, что в некоторых справочниках, например в [6], существует термин “Оптимальное поле подмагничивания” магнитоотрицательных материалов. Но они охватывают лишь материалы, которые выпускались серийно до распада СССР. Методика расчета значения оптимального поля подмагничивания или рекомендуемого значения результирующей напряженности магнитного поля, изложенная в работе, позволит рассчитать значение H_{REC} для магнитоотрицательных материа-

лов как изложенных в справочниках [5,6], так и для не упомянутых в указанных источниках, например для 44НХТЮ. Отличием предложенной методики расчета H_{REC} является учет формы, размеров и свойств как волновода, так и постоянного магнита.

Выводы

В результате проделанной работы рассмотрены основные процессы, возникающие в акустических трактах магнитоотрицательных преобразователей перемещений при распространении ультразвуковых волн кручения. Было установлено, что расчет рекомендуемого расстояния r_{REC} от постоянного магнита до волновода зависит от свойств и параметров как волновода, так и постоянного магнита и слабо зависит от амплитудных значений токовых импульсов. Показано, что расчет расстояния r_{REC} необходимо выбирать на основании значения результирующей напряженности магнитного поля на поверхности волновода, определяемой согласно выражению (12).

Расчеты и теоретические выкладки, лежащие в основе моделирования приведенной системы [7-9,11-12] и приведенные в работе, позволяют как выбрать возможные расстояния от постоянного магнита до волновода, так и рассчитать рекомендуемое расстояние. Это особенно важно в случае бесконтактных измерений при выборе толщины немагнитной стенки и возможных зазоров (в химической и нефтегазовой промышленности, а также в приборах, использующих жидкость, например [3,10]). Расчет рекомендуемого расстояния от постоянного магнита до волновода позволит уже на этапе проектирования прибора определить его габаритные размеры.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта УМНИК на тему “Исследование и разработка блока обработки информации магнитоотрицательных преобразователей линейных перемещений на ультразвуковых волнах кручения”.

Библиографический список

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебник. – 9-е изд., перераб. и доп. – М.: Гардарики, 2001. – 317 с.
2. Слесарев Ю. Н. Реверсивные методы записи для оптических дисковых накопителей: дис.... д-ра техн. наук. – Пенза, 2004. – 342 с.
3. Воронцов А. А. Математическое моделирование магнитных полей в двухкоординатных магнитоотрицательных наклонных: дис.... канд. техн. наук. – Пенза, 2013. – 160 с.

4. Демин С. Б. Информационные измерительные системы с использованием магнитострикционных приборов: дис.... доктора техн. наук. – Пенза, 2003. – 463 с.

5. Прецизионные сплавы. Справочник /под ред. Б. В. Молотилова. – М.: Металлургия, 1983. – 439 с.

6. Голямина И. П. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.

7. Мартышкин А. И. Математическое моделирование диспетчеров задач в многопроцессорных вычислительных системах на основе стохастических сетей массового обслуживания: дис....канд. техн. наук. – Пенза, 2013. – 160 с.

8. Мартышкин А. И. Математическое моделирование диспетчеров задач в многопроцессорных вычислительных системах на основе стохастических сетей массового обслуживания: автореферат дис....канд. техн. наук. – Пенза, 2013. – 23 с.

9. Мартышкин А. И. Комплекс программ для определения характеристик диспетчеров задач мно-

гопроцессорных систем с использованием приоритетных стохастических сетей массового обслуживания [Текст] / Р.А. Бикташев, А.И. Мартышкин, Н.Г. Востоков// Фундаментальные исследования. 2013. № 10. С. 13.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013613426. Программа моделирования магнитных полей ДМН на УЗВ кручения. Правообладатель: ФГБОУ ВПО «Пензенская государственная технологическая академия». Авторы: Слесарев Ю.Н., Воронцов А.А., Карпучин Э.В. Заявл. 20.02.2013 г.

11. Бершадская Е. Г. Моделирование. Модели систем и методы принятия решений: учеб. пособие. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. технол. акад., 2012. – 144 с.

12. Сальников И. И. Размерная селекция бинарных изображений локальных объектов при анализе аэрофотоснимков. [Текст] // Телекоммуникации. – М.: Наука и технологии. 2015. № 2. С. 17-23.

UDC 608.2, 004.021, 004.94

INCREASING THE EFFICIENCY OF CALCULATING THE PARAMETERS OF ACOUSTIC PATHS OF MAGNETOSTRICTION CONVERTERS OF MOVEMENT

Yu. N. Slesarev, PhD (technical sciences), full professor at the Department of computers and systems, PSTU, Penza; SlesarevUN@gmail.com

A. A. Vorontsov, Ph.D.(technical sciences), associate Professor at the Department of computers and systems, PSTU, Penza; Aleksander.Vorontsov@gmail.com

S. V. Rodionov, post-graduate student at the Department of computers and systems, PSTU, Penza; rodionov-sergei@yandex.ru

The article is devoted to modeling in magnetostriction converters of movements of magnetic fields, and also possible and recommended distances from a permanent magnet to a wave guide. The purpose of work is research of acoustic paths of magnetostriction converters of movement and realization in them a new way of calculation of possible and recommended distance from a permanent magnet to a wave guide by means of corresponding values of resultant intensity of a magnetic field. The objects of research are acoustic paths of magnetostriction converters of movement. In them theoretical and pilot studies of possible by definition and recommended distances from a permanent magnet to a wave guide are executed. The basic elements which are a part of acoustic paths, method of calculation of resultant intensity of a magnetic field are considered, mathematical modeling of magnetic fields is made. The way of calculation of resultant intensity of a magnetic field and admissible distance from a permanent magnet to a wave guide is offered. Modeling and calculation for the offered way of recommended and possible distances from a permanent magnet to a wave guide will allow to calculate at a stage of modeling the parameters of an acoustic path and magnetostriction converters of movements in general. It will allow to lower costs of the developed and upgraded magnetostriction converters of linear movements. In the end corresponding conclusions are made.

Key words: magnetostriction converter, recommended distance, mathematical model resulting intensity.

DOI: 10.21667/1995-4565-2016-56-2-169-176

References

1. Bessonov L. A. *Teoreticheskie osnovy ehlektrotekhniki. EHlektromagnitnoe pole: uchebnik.* 9-e izd.,

pererab. i dop. (Theoretical Foundations of Electrical Engineering. The electromagnetic field: a textbook). Moscow.: Gardariki, 2001, 317 p. (in Russian).

2. Slesarev Yu. N. *Reversivnye metody zapisi dlya*

opticheskikh diskovykh nakopitelej (Reversible methods of record for optical disk stores): dis. ... dokt. tehn. nauk (Reversible methods of recording for optical disk drives): dis. dr. tehn. Sciences). Penza: penzenskij gosudarstvennyj universitet, 2004, 342 p. (in Russian).

3. **Vorontsov A. A.** *Matematicheskoe modelirovanie magnitnyh polej v dvuhkoordinatnyh magnitostriktionnyh naklonomerah (Mathematical modeling of magnetic fields in two-coordinate magnetostriction tiltmeters): dis. ... cand tehn. nauk. – Penza: penzenskij gosudarstvennyj technologicheskij universitet, 2013, 160 p. (in Russian).*

4. **Demin S. B.** *Informacionnye izmeritel'nye sistemy s ispol'zovaniem magnitostriktionnyh priborov (Information measuring systems with use of magnetostriction devices): dis. ... dokt. tehn. nauk. Penza: penzenskij gosudarstvennyj universitet, 2003, 463 p. (in Russian).*

5. *Precizionnye splavy. Spravochnik / pod red. B. V. Molotilova (Precision alloys. Directory / ed. B. V. Molotilova). Moscow: Metallurgiya, 1983, 439 p. (in Russian).*

6. **Golyamina I. P.** *Ul'trazvuk. Malen'kaya ehnciklopediya (Ultrasound. Little encyclopedia). Moscow: sovetskaya ehnciklopediya, 1979, 400 p. (in Russian).*

7. **Martyshkin A. I.** *Matematicheskoe modelirovanie dispetcherov zadach v mnogoprocessornyh vychislitel'nyh sistemah na osnove stohasticheskikh setej massovogo obsluzhivaniya (Mathematical modeling of task managers in the multiprocessor computing systems on the basis of stochastic networks of mass service): dis. ... cand tehn. nauk. Penza: penzenskij gosudarstvennyj technologicheskij universitet, 2013, 160 p. (in Russian).*

8. **Martyshkin A. I.** *Matematicheskoe modelirovanie dispetcherov zadach v mnogoprocessornyh vychislitel'nyh sistemah na osnove stohasticheskikh setej massovogo obsluzhivaniya (Mathematical modeling of task managers in the multiprocessor computing systems on the basis of stochastic networks of mass service): avtoref. dis. ... cand tehn. nauk. Penza: penzenskij gosudarstvennyj technologicheskij universitet, 2013, 23 p. (in Russian).*

9. **Martyshkin A. I.** *Kompleks programm dlya opredeleniya harakteristik dispetcherov zadach mnogo-processornyh sistem s ispol'zovaniem prioritetnyh stohasticheskikh setej massovogo obsluzhivaniya [Tekst] / R. A. Biktashev, A. I. Martyshkin, N. G. Vostokov. Fundamental'nye issledovaniya. 2013, № 10, p. 13 (in Russian).*

10. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM № 2013611117. Programmyj kompleks dlja rascheta veroyatnostno-vremennyh harakteristik stohasticheskikh setej massovogo obsluzhivaniya (The certificate of state registration of computer programs No. 2013611117. Software complex for calculation of probability – time characteristics of stochastic queueing networks) / A. I. Martyshkin, R. A. Biktashev (in Russian).*

11. **Bershadskaya E. G.** *Modelirovanie. Modeli sistem i metody prinyatiya reshenij: uchebnoe posobie (Modeling. The models and methods of decision-making: Proc. Allowance). Penza: izd-vo Penz. gos. tekhnol. akad., 2012, 144 p. (in Russian).*

12. **Sal'nikov I. I.** *Razmernaya selekciya binarnykh izobrazhenij lokal'nyh ob"ektov pri analize aehrofotodokumentov [Tekst] // Telekommunikacii. Moscow: Nauka i tekhnologii. 2015, № 2, p. 17 – 23 (in Russian).*