

УДК: 519.711.3

DOI: 10.46548/21vek-2021-1054-0003

ОБОБЩЕННАЯ МЕТОДИКА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

© 2021

Карпукхин Эдуард Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Математика и физика»

Дементьева Елена Сергеевна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Математика и физика»

Пензенский государственный технологический университет

(440039, Россия, Пенза, проезд Байдукова/улица Гагарина, 1А/11, e-mail: edvar1@rambler.ru)

Аннотация. В статье рассматривается проблемы улучшения технических характеристик магнитоотрицательных устройств – магнитоотрицательных преобразователей перемещения (МПП). Одним из центральных моментов функционирования МПП, является передача информации посредством взаимодействия магнитных полей. Исследования таких взаимодействий для разных частных случаев проведены в работах многих авторов, но общая методика моделирования магнитных полей МПП на настоящее время отсутствует. Поэтому целью статьи является попытка сделать обобщение известных моделей и магнитных полей МПП и на его основе сформировать общую методику моделирования магнитных полей МПП. Для этого предлагается обобщенная структурная схема МПП, учитывающая все возможные конструктивные особенности и физические явления, имеющие место в подобных устройствах. Основное внимание уделяется анализу моделей импульсного магнитного поля магнитоотрицательного звукопровода МПП, магнитного поля обмотки записи и постоянного магнита МПП. Отмечаются способы получения магнитных полей указанных элементов и особенности каждого из них. Проведенный анализ позволяет предложить обобщенную методику математического моделирования МПП и, в частности, их магнитных полей, путем введения объединяющего функционала, принимающего значения конкретных параметров МПП, с возможностью расширения его возможностей.

Ключевые слова: магнитоотрицательные преобразователи перемещений, математическое моделирование, математические модели импульсных магнитных полей, математические модели магнитных полей постоянных магнитов, обобщенная методика моделирования МПП.

GENERALIZED METHOD OF MATHEMATICAL SIMULATION OF MAGNETIC FIELDS OF MAGNETOSTRICTIVE DISPLACEMENT CONVERTERS

© 2021

Karpukhin Eduard Vladimirovich, candidate of technical sciences,
associate professor sub-department of «Mathematics and physics»

Dementyeva Elena Sergeevna, candidate of pedagogical sciences,
associate professor sub-department of «Mathematics and physics»

Penza State Technological University

(440039 Russia, Penza, pr. Baidukova / ul. Gagarina, 1a / 11, e-mail: edvar1@rambler.ru)

Abstract. The article discusses the problems of improving the technical characteristics of magnetostriuctive devices - magnetostriuctive displacement converters (WFP). One of the central points of WFP's operation is the transfer of information through the interaction of magnetic fields. Studies of such interactions for different private cases have been carried out in the works of many authors, but there is currently no general method for modeling WFP magnetic fields. Therefore, the purpose of the article is to attempt to summarize WFP's known models and magnetic fields and, on its basis, to form a general methodology for modeling WFP magnetic fields. For this purpose, a generalized WFP structural diagram is proposed, taking into account all possible design features and physical phenomena that occur in such devices. The main focus is on the analysis of models of the impulse magnetic field of the magnetostriuctive sound line WFP, the magnetic field of the recording winding and the permanent magnet WFP. Methods of obtaining magnetic fields of said elements and peculiarities of each of them are noted. The analysis suggests a generalized methodology for mathematical modelling of WFP and, in particular, their magnetic fields, by introducing a unifying functionality that takes on the values of specific parameters of WFP, with the possibility of expanding its capabilities.

Keywords: magnetostriuctive displacement converters, mathematical modeling, mathematical models of pulse magnetic fields, mathematical models of magnetic fields of permanent magnets, a generalized method of modeling WFP.

Введение. В настоящее время в химической, перерабатывающей, военной промышленности для автоматизации различных технических процессов применяются магнитоотрицательные устройства. По ряду основных параметров, таких как точность, разрешающая способность, быстродействие, взрыво- и пожаробезопасность, наилучшими показателями обладают магнитоотрицательные преобразователи перемеще-

ний (МПП) [1,2]. Существует множество вариантов конструкций МПП, однако, все они содержат следующие основные элементы, которые могут различаться формой и материалом [3]:

- магнитоотрицательный звукопровод (МЗП);
- постоянные магниты (ПМ).

Другими, не менее важными, составными элементами МПП являются электроакустические преобразо-

ватели (ЭАП) и акустические демпферы (АД).

Эти элементы входят в состав первичного магнитострикционного преобразователя перемещений (МПП), основным назначением которого является формирование в среде МЗП продольных или крутильных акустических волн, содержащих информацию об измеряемой величине и подлежащих дальнейшему считыванию с помощью ЭАП.

Построение новых МПП с улучшенными характеристиками, а также модернизация существующих, является важной практической задачей, решение которой представляется возможным, с помощью проведения моделирования работы как МПП в целом, так и отдельных их элементов. Одним из центральных моментов, оказывающего существенное влияние на работу любого МПП, является взаимодействие магнитных полей в области прямого магнитострикционного преобразования.

Задача исследования магнитных полей МПП путем их математического моделирования для различных частных случаев решалась в работе многих авторов, например [4-9].

В работе [4] показано исследование магнитострикционных преобразователей уровня накладного типа, получены модели импульсного магнитного поля МЗП и поля подмагничивания МП.

В работе [5] показано исследование МПУ для байпсных систем, получены модели магнитных полей МПУ, учитывающие сложность геометрии расчетной области.

В работах [6-9] также исследуются магнитные поля ПМ и получены аналогичных результаты.

Целью статьи является проведение обзора известных математических моделей магнитных полей МПП, их анализ и обобщение, а также предложение на их основе нового общего подхода к моделированию МПП.

В основе такого подхода может лежать известный из области системного анализа принцип перехода от частного к общему с помощью проведения декомпозиции рассматриваемого объекта, в данном случае математических моделей магнитных полей МПП, и выявление на ее основе закономерностей.

Материалы и результаты исследования. Все МПП, известные на сегодняшний день, являются сложными техническими устройствами, имеющими разнообразную структуру, определяемую их назначением, функциональными возможностями, условиями работы и другими факторами. Однако, в составе любого МПП можно выделить некоторые общие элементы, присущие всем подобным устройствам, такие как МЗП, ПМ, ЭАП. Также МПП могут содержать и другие элементы, такие как АД, электромагнитные экраны, корпуса элементов с ПМ. Существенное влияние на работу МПП оказывают параметры технологического объекта, на котором он установлен. К основным из них можно отнести: параметры резервуара с контролируемой средой, расстояния и зазоры между элементами МПП и технологического объекта, его

физические свойства.

С учетом этого, обобщенную структуру МПП можно представить в виде (рис. 1):

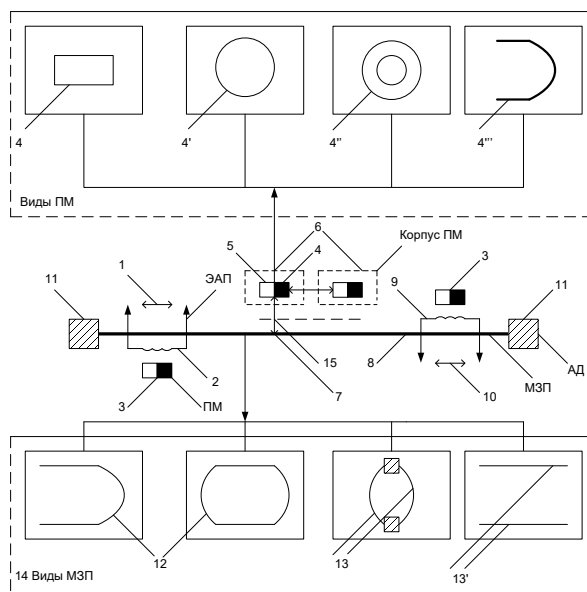


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема МПП

На этой схеме отмечено наличие следующих физических явлений и параметров конструкции МПП: 1 – импульс тока записи; 2 – магнитное поле катушки записи; 3 – магнитное поле подмагничивания; 4 – магнитное поле ПМ (в зависимости от его параметров); 5 – краевой эффект; 6 – экранирование (влияние корпуса) ПМ и МЗП; 7 – прямое магнитострикционное преобразование; 8 – процесс распространения УЗВ в МЗП (затухание волн, поверхностный эффект, влияние температуры, перемагничивания, механического напряжения МЗП); 9 – магнитное поле катушки чтения; 10 – форма выходной э.д.с.; 11 – демпфирование УЗВ (или его отсутствие); 12 – геометрическая форма МЗП; 13 – количество МЗП; 14 – вид МЗП; 15 – работа через немагнитную стенку или другие конструктивные особенности МПП.

Рассмотрим подробнее математические модели некоторых из отмеченных физических явлений и их особенности.

1. Модель импульсов тока записи. Цикл опроса МПП начинается с подачи на обмотку входного ЭАП (или на сам МЗП для некоторых вариантов конструкций МПП, например [4]) импульсов тока записи $i_x(t)$.

Прямоугольные импульсы $i_x(t)$ амплитудой I_m , длительностью τ , поступающие с частотой $f=1/T$, для дальнейшего использования в составе математических моделей удобно представить рядом Фурье в виде:

$$i_x(t) = I_m \left[\frac{\tau}{T} + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \left(\sin \left(\frac{2n\pi}{T} (\tau - t) \right) + \sin \left(\frac{2n\pi t}{T} \right) \right) \right]. \quad (1)$$

В некоторых моделях МПП могут быть использованы импульсы тока записи пилообразной или экспоненциальной формы, для которых возможно получить представления рядом Фурье, аналогичные

выражению (1).

2. Модель магнитного поля катушки записи.

Под действием импульсов тока записи $i_x(t)$, описываемых выражением вида (1), вблизи обмотки записи входного ЭАП (или вблизи самого МЗП для некоторых вариантов конструкций МПП, например [3]) формируется импульсное магнитное поле напряженностью $H_x(t)$, которая на основании закона полного тока может быть найдена

- для МЗП с радиусом поперечного сечения в виде:

$$H_x(t) = \frac{i_x(t)}{2\pi R}; \quad (2)$$

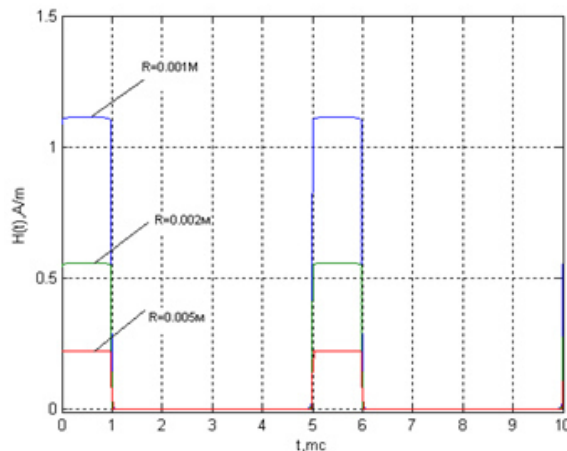
- для обмотки входного ЭАП с числом витков в виде:

$$H_x(t) = 2W_2 \iint_S H_1(t, x, y) dx dy, \quad (3)$$

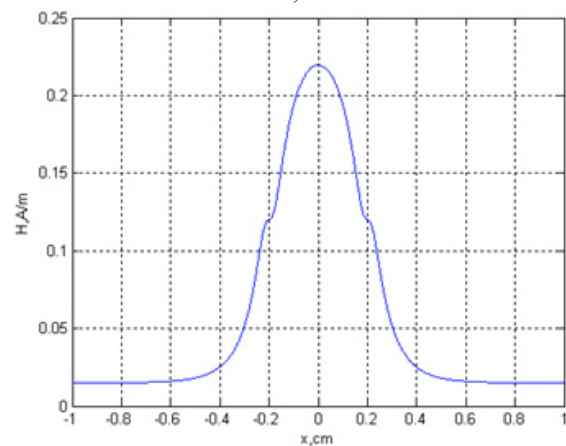
где S – область, ограниченная обмоткой, x, y – координаты точки наблюдения, $H_1(t, x, y)$ – напряженность магнитного поля одного витка обмотки, равная [11]:

$$H_1(t, x, y) = \frac{y}{2\pi(x^2 + y^2)} i_x(t). \quad (4)$$

В случае (2), напряженность $H_x(t)$ имеет вид, показанный на рисунке 2а, а в случае (3) – на рисунке 2б.



а)



б)

Рисунок 2 – Напряженность магнитного поля МЗП (а) и ЭАП (б)

Напряженность поля $H_x(t)$ катушки или МЗП подвержена влиянию поверхностного эффекта, выражаемого в виде сужения области проникновения магнитного поля в среду МЗП.

3. Модель магнитного поля подмагничивания.

Магнитное поле подмагничивания необходимо для работы МПП на основе продольных УЗВ. Оно формируется вблизи обмотки ЭАП с целью усиления результирующего магнитного поля. Для этого применяются ПМ определенной конфигурации.

Описание магнитных полей ПМ могут быть получены различными способами, наиболее распространенным из которых является метод эквивалентного соленоида.

Метод заключается в замене постоянного магнита эквивалентным соленоидом с числом витков W_2 и проведении его расчета на основе закона Био-Савара-Лапласа, описываемого выражением:

$$\vec{H} = \int_{(l)} \frac{Id\vec{l} \times \vec{r}}{r^3(x_0, y_0, z_0, x, y, z)}, \quad (5)$$

где $d\vec{l}(x_0, y_0, z_0)$ – элемент контура (l), сонаправленный с током I , \vec{r} – расстояние между данным элементом и точкой наблюдения $P(x, y, z)$ (рис. 3) [12].

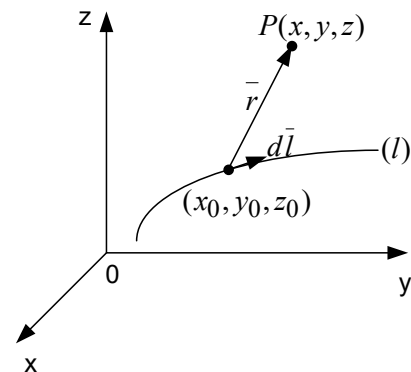


Рисунок 3 – Расчет магнитного поля на основе закона Био-Савара-Лапласа

С помощью (5) удобно определить напряженность H_i одного витка соленоида, и в случае равномерности его обмотки, для расчета напряженности магнитного поля ПМ воспользоваться выражением, аналогичным (3). При использовании соленоида с неравномерной обмоткой или сложной геометрической формой, а также для расчета магнитного поля многослойного соленоида, может быть использован принцип суперпозиции. В этом случае, формула для соленоида, имеющего обмотку из K слоев, по M витков в каждом имеет вид:

$$\vec{H}(x, y, z) = \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^M \vec{H}_{kj}(x, y, z_j), \quad (6)$$

где $\vec{H}_{kj}(x, y, z_j)$ – вектор напряженности поля, создаваемый j -ым витком в k -ом слое [1].

Модели магнитных полей ПМ наиболее распространенных геометрических форм, полученные с применением этого метода имеют вид:

- ПМ прямоугольной формы [5]:

$$H_x(t, x_0, y_0) = i_x(t) \frac{W_2}{\pi} \left[b \left(\arctg \left(\frac{x_0 + y_0 / 2}{b} \right) - \arctg \left(\frac{x_0 - y_0 / 2}{b} \right) \right) - a \left(\arctg \left(\frac{x_0 + y_0 / 2}{a} \right) - \arctg \left(\frac{x_0 - y_0 / 2}{a} \right) \right) + \frac{x_0 + y_0 / 2}{2} \ln \alpha_1 + \frac{x_0 - y_0 / 2}{2} \ln \alpha_2 \right] \quad (7)$$

где x_0, y_0 – координаты точки наблюдения, α_1, α_2 – коэффициенты, зависящие от конструкции МПП, $i_x(t), W_2$ – амплитуда токового импульса и число витков эквивалентного соленоида соответственно, a, b – его геометрические размеры.

• ПМ сплошной или кольцевой формы [6]:

$$H_x(t, x_0, y_0) = i_x(t) \frac{W_2}{2\pi\mu(R_M - r_M)} \times \left[\ln \frac{R_M + \sqrt{R_M^2 - (h_M/2)^2}}{r_M + \sqrt{r_M^2 + R_M^2 - (h_M/2)^2}} - \frac{1}{h_M^2} \left(\frac{R_M^3}{(R_M^2 + h_M^2/4)^{3/2}} - \frac{r_M^3}{(r_M^2 + h_M^2/4)^{3/2}} \right) \cdot (2x_0^2 - y_0^2) + C_0 \right], \quad (8)$$

где h_M, R_M, r_M – высота, внешний и внутренний радиусы ПМ соответственно, μ – магнитная проницаемость, x_0, y_0 – расстояние от центра соленоида до расчетной точки, C_0 – корректирующий параметр.

Заключение. Обобщая известные математические модели магнитных полей МПП, можно предложить методику их моделирования, путем построения функционала $L\{f_1, f_2, f_3\}$, где f_1 – математические модели импульсов тока записи вида (1), f_2 – математические модели магнитного поля катушки записи, например, вида (2) – (4), f_3 – математические модели магнитного поля подмагничивания, например, вида (5) – (8). Подобный подход, при решении различных задач использовался, например, в работах [12-19].

Значением функционала L является модель результирующего магнитного поля МПП, которая может быть использована для исследования магнитных полей как известных, так и новых магнитоотрицательных устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Карпунин Э.В. Математическое моделирование магнитных полей накладных магнитоотрицательных устройств: Монография/ Э.В. Карпунин, С.Б. Демин. – Пенза: ПензГУ, 2014. – 116 с.
2. Демин С.Б. Магнитоотрицательные системы для автоматизации технологического оборудования: Монография. – Пенза: ИИЦ ПГУ, 2002. – 182 с.
3. Патент RU №2298156. МПК: G01F23/28, G01F23/30. Уровнемер-индикатор/ С.Б. Демин, И.А. Демина, А.С. Фролов, Э.В. Карпунин/. Опубл. 27.04. 2007. – Бюл. №12.
4. Карпунин Э.В. Математическое моделирование магнитных полей накладных магнитоотрицательных устройств: Дис...канд. техн. наук. – Пенза, 2012. – 157 с.
5. Мокроусов Д.А. Математическое моделирование магнитоотрицательных преобразователей уровня жидких сред накладного типа для герметизированного оборудования: Автореферат дис...канд. техн. наук. – Пенза, 2014 – 24 с.
6. Герасимова Л.А. Магнитоотрицательные преобразователи положения с повышенной точностью и быстродействием: Автореферат дис...канд. техн. наук. – Уфа, 2009. – 18 с.
7. Прошкин В.Н. Конструкторско-технологические способы совершенствования магнитоотрицательных преобразователей линейных перемещений для специальных условий эксплуатации: Дис...канд. техн. наук. – Астрахань, 2007. – 229 с.
8. Сливинская А.Г. Электромагниты и постоянные магниты. – М.: Энергия, 1972. – 248 с.
9. Пчелинцева О.Н. Моделирование бездемпферных магнитоотрицательных преобразователей уровня на крутильных волнах: Дис...канд. техн. наук. – Пенза, 2011. – 174 с.
10. Кушлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем./ Под ред. Е.М. Лейкина. – М.: Мир, 1983. – 520 с.
11. Корытчинков Д.Е. Численное моделирование магнитного поля соленоида/ Д.Е. Корытчинков, А.А. Трубицын, А.А. Дягилев// Вестник РГРТУ. – 2008. – №3. – С.45-48.
12. Баженов Ю.М. Сверхтяжелый бетон для защиты от радиации/ Ю.М. Баженов, А.П. Прошин, А.И. Еремкин, Е.В. Королев, А.Н. Бормотов// Строительные материалы. – 2005. – № 8. – С. 6-9.
13. Бормотов А.Н. Имитационное моделирование деструкции и метод прогнозирования стойкости композиционных материалов*/ А.Н. Бормотов, И.А. Прошин, Е.В. Королев// Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2010. – № 4. – С. 113-118.
14. Прошин А.П. Методологические принципы выбора оптимальных наполнителей композиционных материалов/ А.П. Прошин, А.М. Данилов, Е.В. Королев, В.А. Смирнов, А.Н. Бормотов// Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2004. – № 10 (550). – С. 15-20.
15. Бормотов А.Н. Методика представления композиционного материала как объекта исследования и моделирования/ А.Н. Бормотов, Е.А. Колобова, Ю.В. Коно-

пакций// Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 3. – С. 44-51.

16. Королев Е.В. Глетглицириновые строительные материалы для защиты от радиации/ Е.В. Королев, А.Н. Бормотов, А.С. Иноземцев, С.С. Иноземцев// Строительные материалы. – 2009. – № 12. – С. 69-71.

17. Бормотов А.Н. Методологические принципы математического моделирования и синтеза композиционных материалов из отходов нефтепереработки/ А.Н. Бормотов, М.В. Кузнецова, Е.А. Колобова// Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – № 2 (38). – С. 85-94.

18. Коновалова И.И. Алгоритм настройки адаптивных регуляторов/ И.И. Коновалова, С.В. Селезнёва, А.Н. Коновалов, А.Н. Бормотов// В мире научных открытий. – 2013. – № 6 (42). – С. 22-33.

19. Бормотов А.Н. Система управления качеством при математическом моделировании и многокритериальном синтезе наномодифицированных композитов специального назначения/ А.Н. Бормотов, И.А. Прошин, М.В. Кузнецова// Труды Института системного анализа Российской академии наук. – 2014. – Т. 64. № 2. – С. 110-118.

Статья поступила в редакцию 27.04.2021

Статья принята к публикации 16.06.2021