

5. Саенко С. Ю. Основы САПР: навч. посіб. / С.Ю. Саенко, І.В. Нечипоренко. – Харків: ХДУХТ, 2017. – 120 с.

УДК 519.711.3

## САМОСОГЛАСОВАННАЯ ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАМАГНИЧИВАНИЯ ВОЛНОВОДА МАГНИТОСТРИКЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Ю.Н. Слесарев<sup>1</sup>, А.Н. Саламатин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> профессор кафедры "Автоматизация и управление", д.т.н., Пензенский Государственный Технологический Университет, г. Пенза, Россия, e-mail: [SlesarevUN@gmail.com](mailto:SlesarevUN@gmail.com)

<sup>2</sup> аспирант гр.19ТИ, Пензенский Государственный Технологический Университет, г. Пенза, Россия, e-mail: [salamatin1994@yandex.ru](mailto:salamatin1994@yandex.ru)

**Аннотация.** В данной статье рассмотрена динамическая модель намагничивания волновода магнитострикционного преобразователя угловых перемещений. Она позволяет с учетом влияния размагничивающих полей определить намагниченность волновода как на локальном участке, так и вдоль всей длины волновода магнитострикционного преобразователя угловых перемещений. Численный метод расчета, представленный в статье также можно использовать при расчете процесса намагничивания волновода магнитострикционного преобразователя линейных перемещений

*Ключевые слова:* модель, динамическая модель, моделирование, численный метод, волновод, магнитострикция, магнитострикционный преобразователь, преобразователь угловых перемещений, численный метод, численный метод расчета.

## SELF-CONSISTENT DYNAMIC MODEL OF MAGNETOSTRICTION ANGULAR MOVEMENT WAVEGUIDE MAGNETIZATION

Yu.N. Slesarev<sup>1</sup>, A.N. Salamatin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ph.D., professor of department "Automation and Control", Penza State Technological University, s. Penza, Russia, e-mail: [SlesarevUN@gmail.com](mailto:SlesarevUN@gmail.com)

<sup>2</sup> postgraduate, Penza State Technological University, s. Penza, Russia, e-mail: [salamatin1994@yandex.ru](mailto:salamatin1994@yandex.ru)

**Abstract.** This article discusses a dynamic model of magnetization of a waveguide of a magnetostrictive angular displacement transducer. It allows, taking into account the influence of demagnetizing fields, to determine the magnetization of the waveguide both in the local area and along the entire length of the waveguide of the magnetostrictive transducer of angular displacements. The numerical calculation method presented in the article can also be used in the calculation of the magnetization of the waveguide of a magnetostrictive linear displacement transducer.

*Keywords: model, dynamic model, modeling, numerical method, waveguide, magnetostriction, magnetostrictive transducer, angular displacement transducer, numerical method, numerical calculation method.*

**Введение.** Метод самосогласованного динамического моделирования (СДМ) получил широкое распространение для моделирования записи информации на ферромагнитных носителях посредством приложения локального магнитного поля, создаваемого, например, магнитной головкой.

Некоторые общие положения данной методики могут быть применены и для моделирования намагничивания волновода в двухкоординатных магнитоstrictionных преобразователях угловых перемещений (ДМПУП) на ультразвуковых волнах кручения с учетом особенностей физики перемагничивания круговым полем, методик определения магнитных полей и моделей перемагничивания материала волновода.

#### **Цель работы.**

Целью работы является разработка самосогласованной динамической модели намагничивания волновода магнитоstrictionного преобразователя угловых перемещений

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

СДМ представляют собой модели и методы приближенного решения нелинейной задачи, которые для случая формирования намагниченности в волноводе имеют вид:

$$\bar{M}(\bar{r}, t) = \bar{m}_{ff}(\bar{H}_{\Sigma}(\bar{r}, t), \text{история } \bar{H}_{\Sigma}) \quad (1)$$

$$\bar{H}_{\Sigma}(\bar{r}, t) = H_{\text{внеш}}(\bar{r}, t) + H_{\text{разм}}(\bar{r}, t),$$

где  $\bar{M}(\bar{r}, t)$  – вектор намагниченности в точке с радиусом–вектором  $\bar{r}$  в момент времени  $t$ ;

$\bar{H}_{\Sigma}(\bar{r}, t)$  – вектор напряженности полного магнитного поля, включающий сумму внешнего поля  $H_{\text{внеш}}(\bar{r}, t)$ , создаваемого совместным действием постоянного магнита и циркулярного магнитного поля в отсутствие магнитного волновода, и внутреннего поля  $H_{\text{разм}}(\bar{r}, t)$ , существующего в магнитном материале ;

$\bar{m}_{ff}$  – моделирующая функция, связывающая остаточную намагниченность волновода с напряженностью магнитного поля;

$\bar{H}_{разм}(\bar{r}, t)$  – размагничивающее поле, определяется из магнито-статических уравнений Максвелла;

$$\text{div } \bar{H}_{разм}(\bar{r}, t) = -4 \cdot \pi \cdot \text{div } \bar{M}(\bar{r}, t); \quad (2)$$

$$H_{разм}(r \rightarrow \infty) \rightarrow 0.$$

Различные СДМ отличаются выбором моделирующей функции  $\bar{m}_{tf}(\bar{H}, \text{история } \bar{H})$  и математическими методами приближенного решения уравнений (1), (2).

Следует отметить, что в традиционных моделях формирования намагниченности для описания процесса формирования распределения намагниченности использовались и различные модели образования доменов, где основой рассмотрения является минимизация термодинамического потенциала.

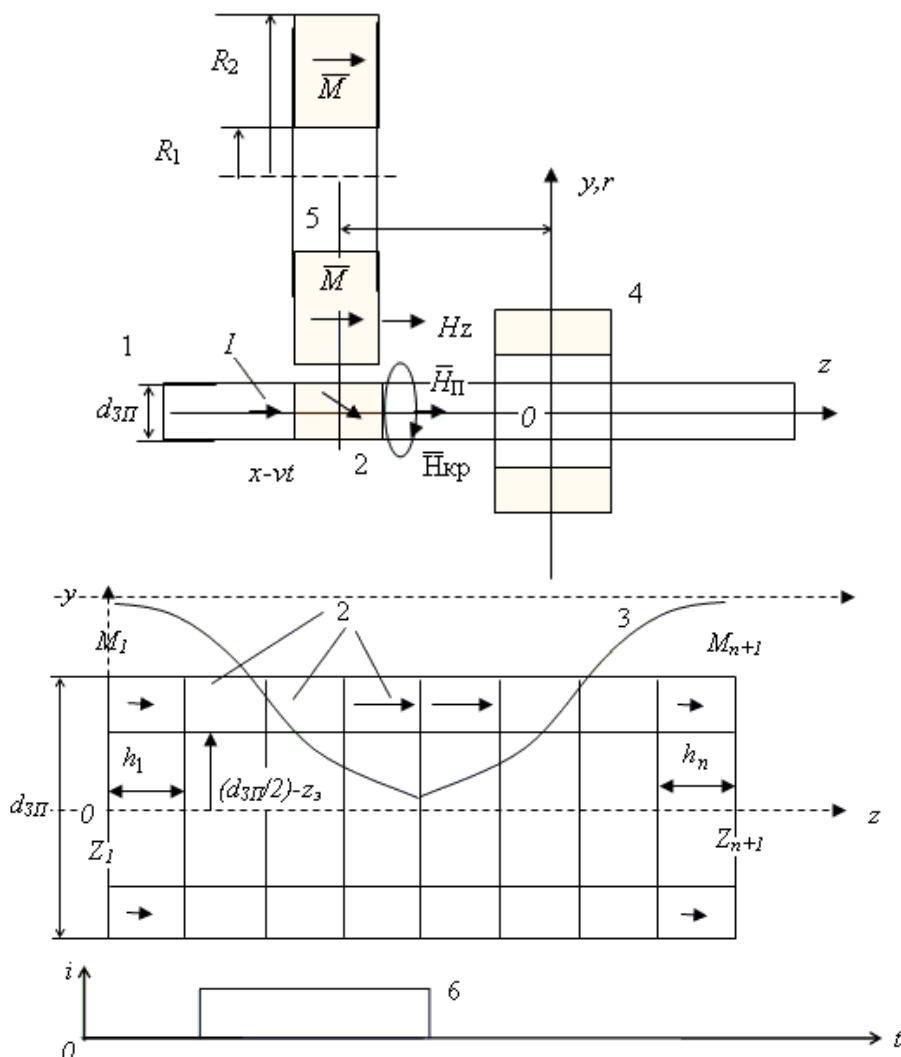


Рисунок 1 - Модель формирования намагниченности в волноводе(ЗП), где 1- волновод, 2 –области разбиения ЗП, 3- распределение продольной

составляющей результирующего магнитного поля, 4- катушка воспроизведения, 5- постоянный магнит (ПМ), 6– импульс тока в волноводе в зависимости от времени

Между тем известно, что в большинстве магнитных материалов, в том числе и в волноводе, собственная доменная структура может иметь размеры гораздо меньшие, чем области, перемагничиваемые под действием магнитного поля. Если это так, то эти области можно описать при помощи параметров, характерных для макрообластей, в частности, коэрцитивной силой, коэффициентом прямоугольности петли гистерезиса, которые могут быть легко измерены и отражают структурное состояние реального материала. Использование этих параметров позволяет применить к рассмотрению явлений в волноводе некоторые подходы, развитые для моделирования магнитной записи магнитной головкой

Задача расчета изменения намагниченности волновода при изменении магнитного поля решается следующим образом (Рисунок 1):

Для определения намагниченности и магнитных полей при перемагничивании волновода рассматриваемая область (позиция 2 рисунка 1) волновода разбивается на  $n$  элементов длиной  $h$ , ограниченных узловыми точками  $Z_i$ . В каждый момент времени можно задать поле температур  $T_i=T(Z_i)$ .

Практически самосогласованное распределение намагниченности численно вычисляется с помощью метода итерации. Обобщенная процедура итеративного расчета приведена на рисунке 2.

Для описания намагниченности в предшествующий момент времени между узлами  $Z_i$  и  $Z_{i+1}$  применяется линейная интерполяция.

Суммарное магнитное поле  $H_{\Sigma}(Z_i, t)$  определяется в соответствии с выражением

$$H_{\Sigma}(Z_i, t) = H_{\text{внеш}} + \sum A_{ij} \cdot M_j(t), \quad (3)$$

где  $A_{ij}$  – матрица форм-факторов, получаемая с учетом интерполяции намагниченности в элементе из интегрального решения магнитоэлектростатических уравнений Максвелла в форме скалярного потенциала;  $i$  – положение границы точки наблюдения (рисунок 1);  $j$  –расположение границы конечного элемента с магнитным материалом.

Для расчетов суммарного магнитного поля  $H_{\Sigma}(Z_i, t)$ , описываемого выражением (3), возможно использование методов итерации, наиболее адаптированным под рассматриваемую модель из которых является метод релаксации. Данный метод решения систем алгебраических уравнений об-

ладает большой скоростью сходимости благодаря тому, что в нем после вычисления очередной  $i$ -ой компоненты  $(k+1)$ -го приближения по формуле метода Зейделя производят дополнительное смещение этой компоненты.

Выбор данного метода был также осуществлен из-за возможности дополнительного введения в расчеты релаксации по индукции, что повышает устойчивость.

Согласно этому методу значение напряженности магнитного поля  $H$  определится в соответствии с выражением:

$$H^{(k)} = H^{(k-1)} + \lambda_1 ( H^{(k-1)} + A(B^{(k-1)} - H^{(k-1)}) ), \quad (4)$$

где  $\lambda_1$  - коэффициент ускорения сходимости по напряженности магнитного поля, определяющее метод решения выражения (3),  $B^{(k-1)}$  - значение магнитной индукции, вычисленной для  $(k-1)$ -го шага итерации.

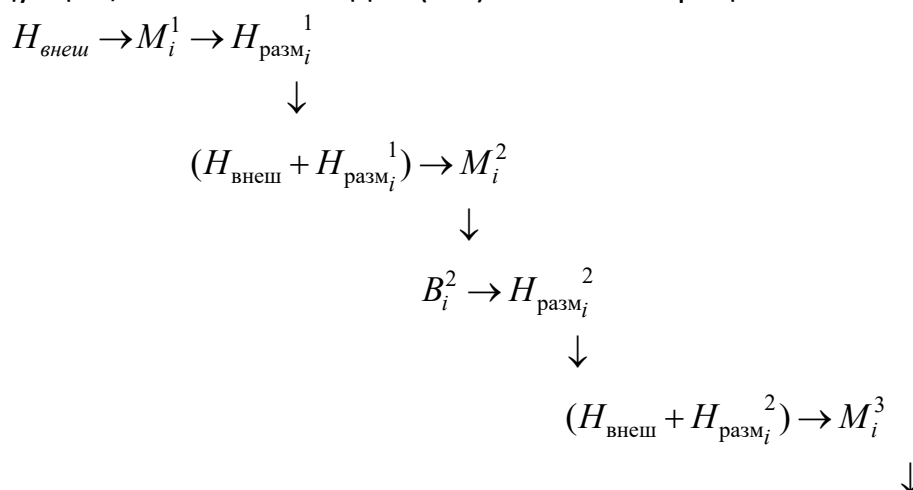


Рисунок 2 - Обобщенная процедура итеративного расчета намагниченности в волноводе

Как уже отмечалось, для повышения устойчивости, в известный метод расчета СДМ дополнительно вводится релаксация по индукции, значение которой на  $k$ -ом шаге итерации можно будет определить согласно выражению:

$$B^{(k)} = (1 - \lambda_1') \cdot B^{(k-1)} + \lambda_1' \cdot B(H^{(k)}), \quad (5)$$

где  $H^{(k)}$  - значение напряженности магнитного поля на  $k$ -ом шаге итерации, определяемое согласно выражению (4),  $\lambda_1'$  - коэффициент ускорения сходимости по магнитной индукции.

Введение дополнительной релаксации по индукции повышает устойчивость рассматриваемого метода и является отличием предложенного численного метода от существующих.

**Вывод.** Таким образом, описанная методика позволяет с учетом влияния размагничивающих полей определить намагниченность волновода как на локальном участке, так и вдоль всей длины волновода магнитострикционного преобразователя угловых перемещений.

## 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. Мартышкин А.И., Бикташев Р.А., Воронцов А.А. Численный метод для определения пропускной способности приоритетного потока заявок в многопроцессорной системе с общим диспетчером задач по каждому конкретному типу приоритета. XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. Пенза: ПензГТУ. - 2014. № 3 (19). С. 137-145.
3. Прошкин В.Н. Конструкторско-технологические способы совершенствования магнитострикционных преобразователей линейных перемещений для специальных условий эксплуатации: Дис....канд. техн. наук. – Астрахань, 2007. – 229 с.
4. 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.
5. Воронцов, А.А. Математическое моделирование магнитных полей двухкоординатных магнитострикционных наклономеров, содержащих кольцевой или сплошной постоянный магнит / Ю.Н. Слесарев, А.А. Воронцов, Э.В. Карпухин // Известия Пензенского государственного педагогического университета. Физико-математические и технические науки. – 2012. – № 30. С. 467–472.
6. Воронцов А.А. Моделирование магнитной системы конструкций двухкоординатных магнитострикционных наклономеров с расположением магниточувствительных элементов под углом 90 градусов / Ю.Н. Слесарев, А.А. Воронцов, С.В. Родионов, А.М. Зелик // В сб.: Новое слово в науке: перспективы развития Сборник материалов международной научно–практической конференции. Чебоксары, 2014. С. 238 – 240.
7. Прецизионные сплавы. Справочник /Под ред. Молотилова Б.В. -М.: Металлургия, 1983.-439 с.
8. Голямина И.П. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. – М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
9. Немцов М.В. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности/ М.В. Немцов, Ю.М. Шамаев. – М.: Энергоиздат, 1981. – 136 с.
10. Слесарев Ю.Н. Реверсивные методы записи для оптических дисковых накопителей: Дис....д-ра техн. наук. – Пенза, 2004. – 342 с.

11. Воронцов А.А. Математическое моделирование магнитных полей в двухкоординатных магнитострикционных наклономерах: 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. Слесарев<sup>1</sup>, А.Н. Саламатин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> профессор кафедры "Автоматизация и управление", д.т.н., Пензенский Государственный Технологический Университет, г. Пенза, Россия, e-mail: [SlesarevUN@gmail.com](mailto:SlesarevUN@gmail.com)

<sup>2</sup> аспирант гр.19ТИ, Пензенский Государственный Технологический Университет, г. Пенза, Россия, e-mail: [salamatin1994@yandex.ru](mailto: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. Slesarev<sup>1</sup>, A.N. Salamatin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ph.D., professor of department "Automation and Control", Penza State Technological University, s. Penza, Russia, e-mail: [SlesarevUN@gmail.com](mailto:SlesarevUN@gmail.com)

<sup>2</sup>postgraduate, Penza State Technological University, s. Penza, Russia, e-mail: [salamatin1994@yandex.ru](mailto: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.

