**DOI: 10.15514/ISPRAS-2023-35(3)-3**

# К вопросу использования в образовательном процессе разработанного программного обеспечения для исследования акустических трактов магнитострикционных преобразователей перемещений

*А.А. Ивзанов,* ORCID: 0009-0009-9664-4137 <*devilkbmod@gmail.com*>
*А.А. Воронцов,* ORCID: 0000-0002-3451-8815 <*aleksander.vorontsov@gmail.com*>
*Ю.Н. Слесарев,* ORCID: 0000-0003-1508-3235 <*slesarevun@gmail.com*>

*Пензенский государственный технологический университет,*
*Россия, 440039, г. Пенза, проезд Байдукова/ул. Гагарина, 1а/11.*

**Аннотация.** Статья посвящена исследованиям процессов, возникающих при формировании, трансляции и считывании информационных сигналов в акустических трактах магнитострикционных преобразователях линейных и угловых перемещений. Приводятся математические модели, позволяющие осуществить расчет магнитных полей кольцевых постоянных магнитов и сформированных токовыми импульсами при протекании ими в среде волновода. Для расчета намагниченности волновода был разработан численный метод, позволяющий учесть намагниченность материала волновода в предыдущий момент времени. Также приведены математические модели, позволяющие рассчитать параметры магнитного потока соленоида и выходного сигнала. Математические модели расчета магнитных полей постоянного магнита, разработанный численный метод и математические модели формирования магнитного потока и выходного сигнала были реализованы в разработанном программном обеспечении, используемом в образовательном процессе. Результаты исследований, а также уточненные и разработанные методы расчета магнитных полей и численный метод могут использоваться для исследований магнитострикционных приборов как на этапе их проектирования, так и их эксплуатации, что снижает их конечную стоимость. Также необходимо отметить, что в статье не рассмотрены вопросы, связанные с обработкой выходного сигнала, что предоставляет возможности для дальнейших исследований и дальнейшей модификации программного обеспечения.

**Ключевые слова:** акустический тракт; магнитострикция; магнитострикционный прибор; программное обеспечение; образовательный процесс.

**Для цитирования**: Ивзанов А.А., Воронцов А.А., Слесарев Ю.Н. К вопросу использования в образовательном процессе разработанного программного обеспечения для исследования акустических трактов магнитострикционных преобразователей перемещений. Труды ИСП РАН, том 35, вып. 3, 2023 г., стр. 47–62. DOI: 10.15514/ISPRAS–2023–35(3)–3

# On the Issue of Using the Developed Software in the Educational Process for the Study of Acoustic Paths of Magnetostrictive Displacement Transducers

*A.A. Ivzanov,* ORCID: 0009-0009-9664-4137 <*devilkbmod@gmail.com*>
*A.A. Vorontsov,* ORCID: 0000-0002-3451-8815 <*aleksander.vorontsov@gmail.com*>
*Yu.N. Slesarev,* ORCID: 0000-0003-1508-3235 <*slesarevun@gmail.com*>

*Penza State Technological University,*
*1a/11, Baydukova passage/st. Gagarina, Penza, 440039, Russia.*

**Abstract.** The article is devoted to the research of the processes arising during the formation, translation and reading of information signals in the acoustic paths of magnetostrictive linear and angular displacement transducers. Mathematical models are given that make it possible to calculate the magnetic fields of annular permanent magnets and those formed by current pulses when they flow in a waveguide medium. To calculate the magnetization of the waveguide, a numerical method was developed that allows taking into account the magnetization of the waveguide material at a previous time. Mathematical models are also given to calculate the parameters of the magnetic flux of the solenoid and the output signal. Mathematical models for calculating permanent magnet magnetic fields, the developed numerical method and mathematical models for the formation of magnetic flux and output signal were implemented in the developed software used in the educational process. The research results, as well as refined and developed methods for calculating magnetic fields and the numerical method can be used to study magnetostrictive devices both at the stage of their design and operation, which reduces their final cost. It should also be noted that the article does not address issues related to the processing of the output signal, which provides opportunities for further research and further modification of the software.

**Keywords:** acoustic tract; magnetostriction; magnetostrictive device; software; educational process.

**For citation:** Ivzanov A.A., Vorontsov A.A., Slesarev Yu.N. On the issue of using the developed software for the study of acoustic paths of magnetostrictive displacement transducers in the educational process. *Trudy ISP RAN/Proc.ISP RAS*, vol. 35, issue 3, 2023. pp. 47-62 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2023-35(3)-3

## *1 Введение*

Динамика исследований и открытий в сфере научных изысканий и информационных технологий за последние годы позволила существенно расширить возможности для их дальнейшего изучения [1-12]. Это стало возможно благодаря успешной работе не только ученых и научных школ, но и исследованиям студентов и преподавателей [13-20].

Подготовка квалифицированных специалистов в образовательном процессе малоэффективна без наглядных методов обучения, позволяющих объяснить и продемонстрировать базовые основы, принципы работы и конструктивные особенности процессов и явлений.

Так, для изучения явления магнитострикции, а также процессов формирования, трансляции и считывания сигнала в акустических трактах магнитострикционных преобразователей перемещений можно использовать разработанное авторами публикации программное обеспечение, позволяющее не только понять принцип работы этих устройств, но и разрабатывать для них новые элементы и конструкции. Одной из особенностей программного обеспечения является реализация разработанного численного метода по расчету намагниченности материала волновода. Разработанные и уточненные математические модели позволяют рассчитать значения напряженностей магнитных полей постоянного магнита и созданным токовыми импульсами, магнитного потока и выходного сигнала, сформированного соленоидом с графическим отображением последнего. Теоретическим основам процессов, возникающих при трансляции сигнала в акустических трактах магнитострикционных преобразователях перемещений, а также вычислительным

экспериментам с использованием разработанного программного обеспечения и экспериментальной проверке полученных результатов и посвящена статья.

## *2 Теоретический анализ*

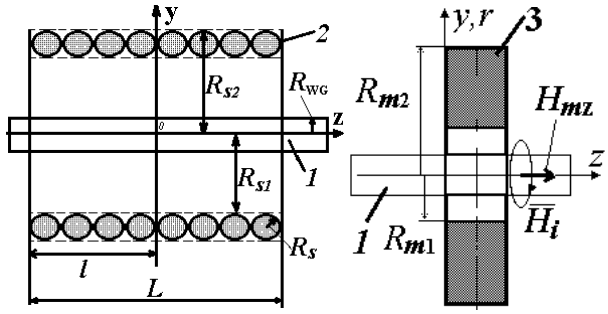
Принцип работы магнитострикционных приборов основывается на двух эффектах, заключающихся в изменении размеров материала волновода (ферромагнетик) под воздействием изменения его намагниченности, что приводит к изменению его размеров на локальном участке и формированию ультразвуковых волн (эффект Видемана) и обратному эффекту, называемому эффектом Виллари – изменении намагниченности материала волновода под воздействием механических колебаний (ультразвуковых волн).

Конструкция акустического тракта магнитострикционного преобразователя перемещений представлена на *Рис. 1*. В ней токовые импульсы *i* поступая в среду волновода (позиция 1) формируют магнитное поле, напряженность которого на его поверхности можно определить согласно выражению (1).

$$H_i = i/(2 \cdot \pi \cdot R_{WG}) \quad (1)$$

где $R_{WG}$ – радиус волновода.

Магнитное поле, созданное токовыми импульсами, взаимодействует с магнитным полем постоянного магнита (позиция 3), что приводит к изменению намагниченности материала волновода и формированию механических колебаний, называемых ультразвуковыми волнами. Процесс расчета изменения намагниченности сложный и зависит от множества факторов и параметров. Более точно это изменение предлагается вычислить с использованием разработанного численного метода.




*а)* *б)*

*Рис. 1. Поясняющий рисунок для дальнейших исследований. Изображение волновода (позиция 1) а) однослойного соленоида (позиция 2) и b) кольцевого постоянного магнита (позиция 3)*

*Fig. 1. An explanatory drawing for further research. Image of a waveguide (position 1) a) a single-layer solenoid (position 2), and b) an annular permanent magnet (position 3)*

Ультразвуковые волны (акустический сигнал) распространяясь в среде волновода достигают соленоида (позиция 2), то есть элемента, формирующего выходной сигнал и считываются, после чего временной интервал их распространения преобразуется в измеряемое значения перемещения.

Для воспроизведения волны кручения может быть применен принцип взаимности. На *Рис. 1* показана катушка воспроизведения (соленоид), воспринимающая информативный параметр – продольную составляющую магнитного поля ультразвуковой волны кручения. На этом рисунке приняты следующие обозначения: $R_S$ – радиус провода соленоида; $2l=L$ – длина соленоида; $z$ – текущая координата, измеряемая вдоль оси 0Z; $R_{S1}$ и $R_{S2}$ – соответственно внутренний и внешний радиусы соленоида, $R_{S2}= R_{S1}+R_S$; $R_{m1}$ и $R_{m2}$ – внутренний и внешний радиусы кольцевого постоянного магнита соответственно.

Зная распределение поля соленоида $H_{CZ}(z)$, можно рассчитать значение проекции его магнитного потока на ось $0Z$ $\Phi z$ через произвольное поперечное сечение волновода, вызванный током $i$ через обмотку воспроизведения, так как в соответствии с теоремой взаимности тот же ток $i$, обтекая поперечное сечение поверхности волновода, возбуждает идентичный поток $\Phi$ через обмотку соленоида [1].

При движении волны кручения последовательность намагниченностей $M_Z$ движется относительно соленоида. Следовательно, $M_Z=M(z-z_0)$, где $z_0=\upsilon t$, $\upsilon$ — скорость распространения ультразвуковой волны кручения. Переменная $(z-z_0)$ устанавливает среднюю линию центра неподвижного соленоида как начало системы отсчета для $M_Z$. Значение $t$ (или $z$), равное нулю, соответствует определенной форме намагниченности, расположенной непосредственно под центром соленоида. Поле рассеяния соленоида $H_{col}(z)$, фиксируется по отношению к оси $z$.

Пусть величина поля рассеяния соленоида будет приведена к единичной магнитодвижущей силе (т. е. $H$ определяется для $N1 = 1,0$, где $N$ — число витков обмотки соленоида воспроизведения). Поле рассеяния соленоида воспроизведения, связанное с носителем, состоит из двух составляющих магнитного поля $H_{cz}$ и $H_{cy}$. Таким образом, один ампер-виток обмотки воспроизведения будет возбуждать бесконечно малый поток через элемент волновода радиуса $r$ и толщиной $dy$ в декартовой системе координат или $dr$ в цилиндрической системе координат определится согласно формуле (2).

$$d\Phi_Z=\mu_0 H_{CZ}\cdot 2\cdot\pi\cdot r\cdot dr \tag{2}$$

где $\mu_0=4\cdot\pi\cdot 10^{-7}$ Гн/м — магнитная постоянная.

Согласно теореме взаимности, единичный ток (ток через один виток вокруг элемента $rdr$), будет наводить аналогичный поток в обмотке соленоида воспроизведения.

Поскольку в волноводе ультразвуковой волны кручения распространяются со скоростью $\upsilon$ и горизонтальной составляющей намагниченности $M_z(z-\upsilon t)$ то магнитный момент элемента длиной $dz$ и поперечного сечения $r\ dr$ эквивалентен току, текущему вокруг элемента $rdr$. Величина тока равна $M_z(z-\upsilon t)dz$. Этот эквивалентный ток представляет собой масштабный коэффициент, который должен быть использован в уравнении (3) для получения из последнего действительного уровня намагниченности волноводе.

Полный поток, пересекающий обмотку соленоида воспроизведения, вызванный намагниченностью $M_z$ получается в этом случае посредством интегрирования бесконечно малых потоков, возникающих из последовательности намагниченностей вдоль волновода, и определяется согласно выражению (3).

$$\Phi_z(z_0)=k\cdot\int_{-\infty}^{\infty}\int_{0}^{\frac{d_{WG}}{2}}\mu_0\cdot M_z(z-z_0,r)\cdot H_{cr}(z,r)\cdot 2\pi r\cdot dr\cdot dz \tag{3}$$

где $d_{WG}$ — диаметр волновода, $z_0=\upsilon t$, $k$ — обобщенный коэффициент, включающий магнитострикционные коэффициенты.

Сигнал воспроизведения определяется производной от $\Phi_Z(z)$ (выражение (4)).

$$u(z_0)=\mathrm{d}\Phi_Z(z_0)/\mathrm{d}t \tag{4}$$

Намагниченность $M_z$ определяется воздействием на материал волновода поля равного геометрической сумме кругового поля $H_i$ волновода и горизонтальной составляющей поля постоянного магнита $Hz(r,z)$.

Для кольцевого постоянного магнита с намагниченностью $M$ и с внешним и внутренним радиусами соответственно $Rm_2$ и $Rm_1$ значение напряженности магнитного поля $Hz(r,z)$ определится по формуле (5).

$$H_z(r,z)=H_{z2}(r,z)-H_{z1}(r,z) \tag{5}$$

где:

$$H_{z2}(r,z)=\frac{1}{\pi}\cdot\int_{Rm1}^{Rm2}\frac{M\cdot\rho\cdot z\cdot E2(k2)}{\left[(r-\rho)^2+z^2\right]\cdot\sqrt{(r+\rho)^2+z^2}}d\rho \tag{6}$$

$$H_{z1}(r,z)=\frac{1}{\pi}\cdot\int_{Rm1}^{Rm2}\frac{M\cdot\rho\cdot(z-h)\cdot E2(k1)}{\left[(r-\rho)^2+(z-h)^2\right]\sqrt{(r+\rho)^2+(z-h)^2}}d\rho \tag{7}$$

В соответствии с одной из моделей, поле $H_{CZ}$ на оси соленоида в точке, отстоящей на расстоянии $z$ от его центра, определяется по формуле (8).

$$H_{cz}(z)=\frac{ni}{4(Rs2-Rs1)}\left\{(l-z)\ln\frac{R_{s2}+\sqrt{R_{s2}^2+(l-z)^2}}{R_{s1}+\sqrt{R_{s1}^2+(l-z)^2}}+(l+z)\ln\frac{R_{s2}+\sqrt{R_{s2}^2+(l+z)^2}}{R_{s1}+\sqrt{R_{s1}^2+(l+z)^2}}\right\} \tag{8}$$

где $n=N/L$ — число витков на единицу длины соленоида, $Rs_1$ и $Rs_2$ – соответственно внутренний и внешний радиусы соленоида, $2l=L$ – длина соленоида, $i$ – значение токового импульса, $s$ – площадь поперечного сечения волноводе.

Используя выражение (5) можно получить распределение продольной намагниченности $M_Z(z)$ в волноводе, которое определяется функциональной зависимостью от $H_Z(r,z)$ то есть согласно выражению (9).

$$M_Z(z) = f(H_Z(r,z)) \tag{9}$$

Для моделирования намагниченности волновода также желательно аналитически определить зависимость, как это представлено в выражении (10).

$$M_i = M(H(x_i,t), M(H(x_i,t-\Delta t)), \tag{10}$$

где $H(x_i,t)$ – суммарное поле, действующее на магнитный элемент в момент времени $t$;

$M(H(x_i,t-\Delta t))$ – намагниченность элемента, определяемая в предшествующий момент времени $t-\Delta t$.

Вид этой функциональной зависимости определяется выбранной моделью намагничивания волноводе, моделями петли гистерезиса и многими другими параметрами.

Петля гистерезиса – одно из свойств ферромагнетиков (материал волновода). Оно позволяет определить его намагниченность по значению напряженности магнитного поля и наоборот. Существует множество моделей построения и методов аппроксимации петель Гистерезиса, одним из которых, используемым в разработанном программном обеспечении является полиномиальный метод аппроксимации [2] (выражение 11) модели петли гистерезиса по Нишимото [3].

$$M(H,\alpha_1)=M_s(T)\cdot\operatorname{sign}\alpha_1+M_s\cdot\alpha_1\cdot f(H\cdot\operatorname{sign}\alpha_1) \tag{11}$$

где $Ti$ — температура переключаемого элемента, $f(H)$ — функция, описывающая предельную петлю гистерезиса и имеющая вид, приведенный в формуле (12) [3].

$$f(H)=\begin{cases}\dfrac{H_C-H}{H-\dfrac{H_C}{s_p}} & \text{при } H<H_C\\[2ex] 1-\left(\dfrac{H_C}{H}\right)^{\frac{s_p}{1-s_p}\cdot K_S} & \text{при } H>H_C\end{cases} \tag{12}$$

В данном описании петли гистерезиса $s_P=Mr/Ms$, $K_S$ – коэффициент, меньший 1.

Графики, построенные по формулам (11), (12), приведены на *Рис. 2*.

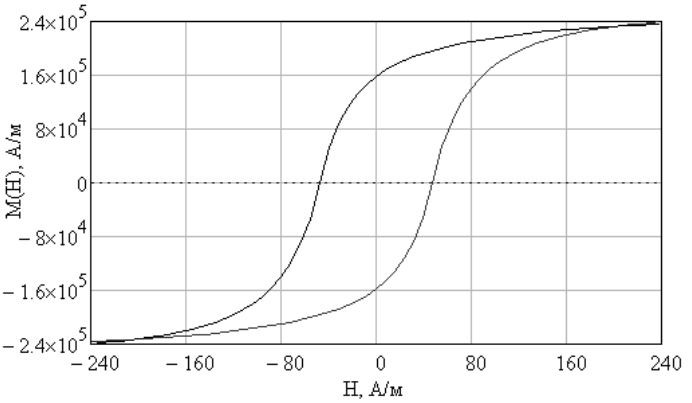



*Рис. 2. Модель петли гистерезиса по Нишимото [3]: $H_C=150/\pi$ А/м, $M_S=33\cdot10^5/(4\cdot\pi)$ А/м, $s_p=0,6$, $M_r=s_p\cdot M_s$*

*Fig. 2. Nishimoto hysteresis loop model [3]: $H_C=150/\pi$ A/m, $M_S=33\cdot10^5/(4\cdot\pi)$ A/m, $s_p=0,6$, $M_r= s_p\cdot M_s$*

Использование зависимости (9) производилось путем моделирования предельных и частных циклов петли гистерезиса [2,3] по формулам (10) и (11).

Индекс петли $\alpha_1$ определяется из условий равенства величин намагниченностей в точке возврата [2] согласно выражению (13).

$$\alpha_1^{(k+1)} = \alpha_1^{(k)} \frac{M\left(H^{(k)}, \alpha_1^{(k)}\right) + M_S \cdot \operatorname{sign}\left(\alpha_1^{(k)}\right)}{M\left(H^{(k)}, -\alpha_1^{(k)}\right) + M_S \cdot \operatorname{sign}\left(\alpha_1^{(k)}\right)} \tag{13}$$

где $k$ — порядковый номер цикла изменения намагниченности по петле гистерезиса.

Для вычисления по формулам (11) и (12) модель позволяет использоваться также температурные зависимости $H_c\,(x_i) = H_c\,(T_i\,(x_i))$ и $M(x_i) = M_S\,(T_i\,(x_i))$, получаемые путем интерполяции экспериментальных данных.

Общим недостатком методов расчета намагниченности волноводов по статическим петлям гистерезиса является невозможность учета в них влияния саморазмагничивающих полей. Их учет возможен при использовании разработанного численного метода.

Метод самосогласованного динамического моделирования (МСДМ) получил широкое распространение для моделирования записи информации на ферромагнитных носителях посредством приложения локального магнитного поля, создаваемого например магнитной головкой [4,5].

Некоторые общие положения данной методики могут быть применены и для моделирования намагничивания волноводов магнитострикционных приборов на ультразвуковых волнах кручения с учетом особенностей физики перемагничивания круговым полем, методик определения магнитных полей и моделей перемагничивания материала волновода.

МСДМ представляют собой модели и методы приближенного решения нелинейной задачи, которые для случая формирования намагниченности в волноводе имеют вид, представленный в формуле (14).

$$\begin{aligned} \overline{M}(\bar{r},t) &= \overline{m}_{tf}\left(\overline{H}_\Sigma(\bar{r},t), history\overline{H}_\Sigma\right) \\ \overline{H}_\Sigma(\bar{r},t) &= H_{\text{external}}(\bar{r},t) + H_{\text{demagnetizing}}(\bar{r},t), \end{aligned} \tag{14}$$

где $\overline{M}(\bar{r},t)$ – вектор намагниченности в точке с радиусом–вектором $\bar{r}$ в момент времени $t$; $\overline{H}_\Sigma(\bar{r},t)$ – вектор напряженности полного магнитного поля, включающий сумму внешнего

поля $H_{\text{external}}(\bar{r},t)$, создаваемого совместным действием постоянного магнита и циркулярного магнитного поля в отсутствие магнитного волновода, и внутреннего поля $H_{\text{demagnetiz ing}}(\bar{r},t)$, существующего в магнитном материале; $\overline{m}_{tf}$ – моделирующая функция, связывающая остаточную намагниченность волновода с напряженностью магнитного поля; $\overline{H}_{\text{demagnetiz ing}}(\bar{r},t)$ – размагничивающее поле, определяется из магнитостатических уравнений Максвелла согласно выражению (15).

$$\begin{aligned} &\text{div}\overline{H}_{\text{demagnetiz ing}}(\bar{r},t) = -4\cdot\pi\cdot\text{div}\overline{M}(\bar{r},t); \\ &H_{\text{demagnetiz ing}}(r\to\infty)\to 0. \end{aligned} \tag{15}$$

Различные МДСМ отличаются выбором моделирующей функции $\overline{m}_{tf}(\overline{H}, history\overline{H})$ и математическими методами приближенного решения уравнений (14), (15).

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.

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: (*Рис. 3*).

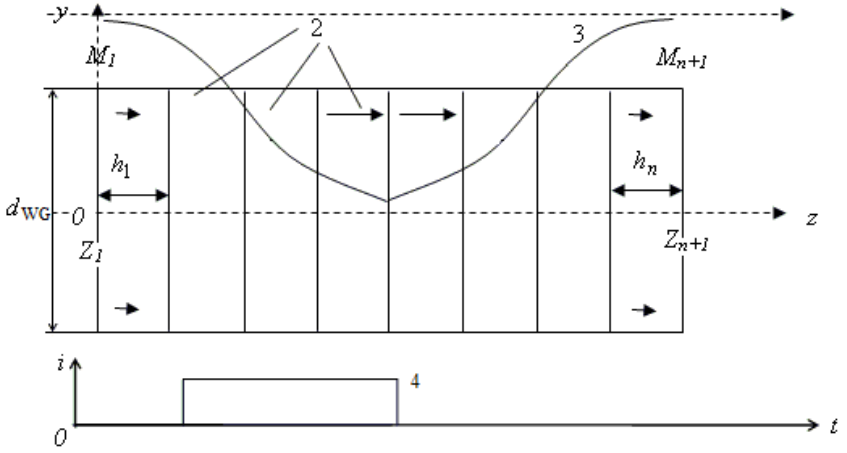



*Рис. 3. Модель формирования намагниченности в волноводе, где 1— волновод, 2 — области разбиения волновода, 3 — распределение продольной составляющей результирующего магнитного поля, 4 — импульс тока в волноводе в зависимости от времени*

*Fig. 3. Model of magnetization formation in a waveguide, where 1 is a waveguide, 2 is a waveguide partition region, 3 is the distribution of the longitudinal component of the resulting magnetic field, 4 is a current pulse in the waveguide depending on time*

Для определения намагниченности и магнитных полей при перемагничивании волновода рассматриваемая область волновода разбивается на *n* элементов длиной *h*, ограниченных

узловыми точками $Z_i$. В каждый момент времени можно задать поле температур $T_i=T(Z_i)$. При разработке модели принимаются следующие допущения:

1 Считается, что в каждом элементе разбиения намагниченность является постоянной величиной.

2 Соответственно каждый элемент разбиения будет представлять цилиндрическую область радиусом $d_{WG}$ /2.

Практически распределение намагниченности численно вычисляется с помощью метода итерации. Обобщенная процедура итеративного расчета приведена на *Рис. 4*. Детализированный алгоритм разработанного численного метода приведен на *Рис. 5*.

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(16).

$$H_\Sigma(Z_i, t) = H_{\text{external}}+\Sigma A_{i,j}\cdot M_j(t), \tag{16}$$

где $A_{i,j}$ – элемент матрицы форм-факторов, получаемой с учетом интерполяции намагниченности в элементарном магните путем интегрального решения магнитостатических уравнений Максвелла в форме скалярного потенциала; $i$ — положение точки наблюдения (*Рис. 3*); $j$ – положение границы конечного элемента с магнитным материалом.

Для расчетов суммарного магнитного поля $H_\Sigma(Z_i,t)$, описываемого выражением (16), возможно использование методов итерации, наиболее адаптированным под рассматриваемую модель из которых является метод релаксации. Данный метод решения систем алгебраических уравнений обладает 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.

$$H_{external} \rightarrow M_i^1 \rightarrow H_{\text{demagnetizing}}{}_i^1$$
$$\downarrow$$
$$(H_{external} + H_{\text{demagnetizing}}{}_i^1) \rightarrow M_i^2$$
$$\downarrow$$
$$B_i^2 \rightarrow H_{\text{demagnetizing}}{}_i^2$$
$$\downarrow$$
$$(H_{external} + H_{\text{demagnetizing}}{}_i^2) \rightarrow M_i^3$$
$$\downarrow$$

*Рис. 4. Обобщенная процедура итеративного расчета намагниченности в волноводе*
*Fig. 4. Generalized procedure for iterative calculation of magnetization in a waveguide*

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 (17).

$$H^{(k)}=H^{(k-1)}+\lambda_1(H^{(k-1)}+A(B^{(k-1)} - H^{(k-1)})), \tag{17}$$

где $\lambda_1$ – некоторое число, называемое коэффициентом ускорения сходимости по напряженности магнитного поля, определяющее метод решения выражения (15). Так, при $\lambda_1<1$, формула (17) является формулой метода нижней релаксации, $\lambda_1=1$ – формулой Зейделя,

$\lambda_1$>1 – формулой верхней релаксации. $B^{(k-1)}$ – значение магнитной индукции, вычисленной для ($k$-1)-го шага итерации.

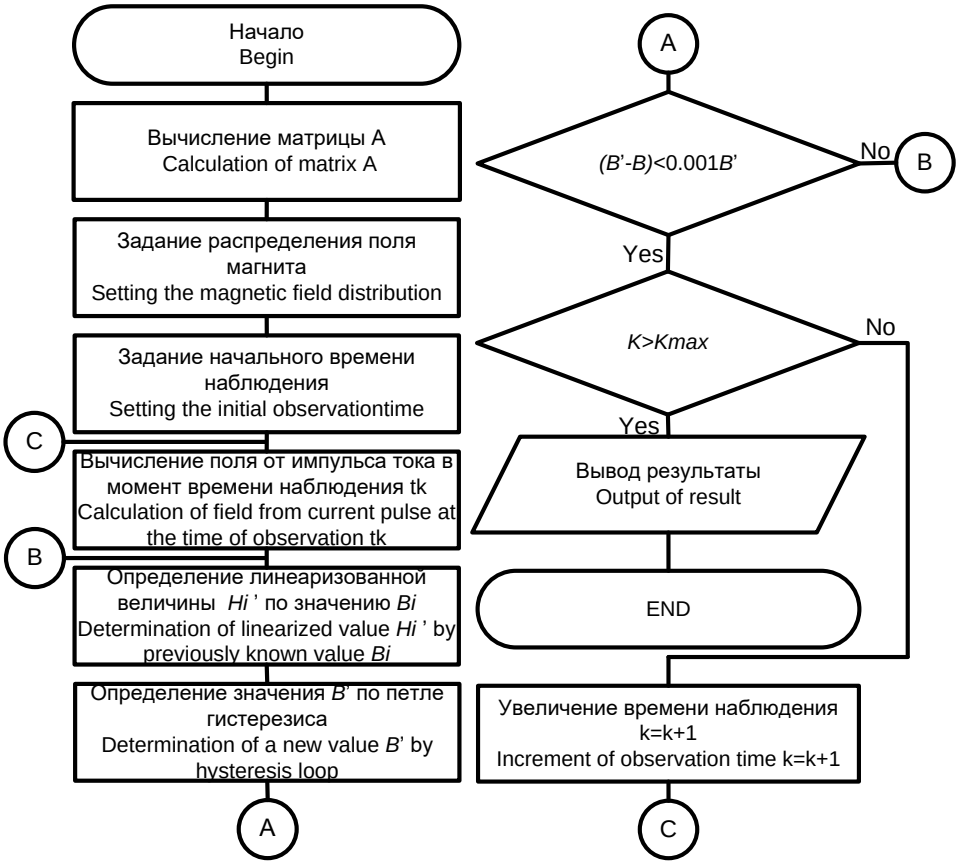



*Рис. 5. Алгоритм работы разработанного численного метода*
*Fig. 5. Algorithm of the developed numerical method*

Как уже отмечалось, для повышения устойчивости, в известный метод расчета MSDM дополнительно вводится релаксация по индукции, значение которой на $k$-ом шаге итерации можно будет определить согласно выражению (18).

$$\overline{B}^{(k)} = (1-\lambda_1^{'}) \cdot \overline{B}^{(k-1)} + \lambda_1^{'} \cdot \overline{B}(\overline{H}^{(k)}), \tag{18}$$

where $\overline{H}^{(k)}$ – значение напряженности магнитного поля на $k$-ом шаге итерации, определяемое согласно выражению (17), $\lambda_1$' – коэффициент ускорения сходимости по магнитной индукции.

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

Вид матрицы форм-факторов зависит от ориентации намагниченности относительно поверхности волновода, способа интерполяции намагниченности между узлами элементов разбиения.

Элементы матрицы форм-факторов определяются вкладом магнитного поля от областей волновода, лежащих вне его участков, ограниченных точками разбиения $Z_1$ и $Z_{n+1}$, а также элементами разбиения $h_i$.

Для определения величины размагничивающего поля используется следующее известное выражение [6].

$$H_{\text{demagnetizing}}(r) = \int(-\nabla M)\left[(\bar{r}-\bar{\rho})/\left|\bar{r}-\bar{\rho}\right|^3\right]dV + \int \bar{M}\cdot\bar{n}\left[(\bar{r}-\bar{\rho})/\left|\bar{r}-\bar{\rho}\right|^3\right]ds \qquad (19)$$

где $\bar{r}$ – радиус–вектор точки наблюдения; $\bar{\rho}$ – радиус–вектор, проведенный к магнитному материалу; $n$ – единичная нормаль к боковой поверхности элемента разбиения; $V,s$ – соответственно объем и поверхность магнетика; $\nabla M$ – оператор дивергенции намагниченности.

Интегрирование (19) позволяет определить поле от первого элемента разбиения в соответствии с выражением (20).

$$H_1(r,z) = \frac{1}{\pi}\cdot\int_0^{d_{WG}/2}\left[\frac{M_1\cdot(z-h)\cdot E(k_1)\rho\cdot d\rho}{[(r-\rho)^2+(z-h)^2]}\times\frac{1}{[(r+\rho)^2+(z-h)^2]^{\frac{1}{2}}}\right] - \frac{1}{\pi}\cdot\int_0^{d_{WG}/2}\frac{M_1\cdot z\cdot E(k_2)\rho\cdot d\rho}{[(r-\rho)^2+z^2]\cdot[(r+\rho)^2+z^2]^{\frac{1}{2}}} \qquad (20)$$

где $E(k_2) = \int_0^{\frac{\pi}{2}}\sqrt{(1-k_2^2(\sin\varphi)^2)}d\varphi$ – полный эллиптический интеграл второго рода, $k_1^2 = (4\cdot r\cdot\rho)/\left[(r+\rho)^2+(z-h)^2\right]$;. $k_2^2 = (4\cdot r\cdot\rho)/\left[(r+\rho)^2+(z)^2\right]$; $r$ – радиус точки наблюдения, отсчитываемый от выбранного начала координат, $z$ – координата, параллельная направлению намагниченности волновода.

Аналогично интегрирование выражения (20) позволяет также определить соответственно поле от второго, третьего и т.п. элементов.

$$H_2(r,z) = \frac{1}{\pi}\cdot\int_0^{d_{WG}/2}\left[\frac{M_2\cdot(z-2\cdot h)\cdot E(k_1)\rho\cdot d\rho}{[(r-\rho)^2+(z-2\cdot h)^2]}\times\frac{1}{[(r+\rho)^2+(z-2\cdot h)^2]^{\frac{1}{2}}}\right] - \frac{1}{\pi}\cdot\int_0^{d_{WG}/2}\left[\frac{M_2\cdot(z-h)}{[(r-\rho)^2+(z-h)^2]}\times\frac{E(k_2)\rho\cdot d\rho}{[(r+\rho)^2+(z-h)^2]^{\frac{1}{2}}}\right]$$

$$H_3(r,z) = \frac{1}{\pi}\cdot\int_0^{d_{WG}/2}\left[\frac{M_3\cdot(z-3\cdot h)\cdot E(k_1)\rho\cdot d\rho}{[(r-\rho)^2+(z-3\cdot h)^2]}\times\frac{1}{[(r+\rho)^2+(z-3\cdot h)^2]^{\frac{1}{2}}}\right] - \frac{1}{\pi}\cdot\int_0^{d_{WG}/2}\left[\frac{M_3\cdot(z-h)^2}{[(r-\rho)^2+(z-2\cdot h)^2]}\times\frac{E(k_2)\rho\cdot d\rho}{[(r+\rho)^2+(z-2\cdot h)^2]^{\frac{1}{2}}}\right]$$

$$H_n(r,z) = \frac{1}{\pi}\cdot\int_0^{d_{WG}/2}\left[\frac{M_n\cdot(z-n\cdot h)\cdot E(k_1)\rho\cdot d\rho}{[(r-\rho)^2+(z-n\cdot h)^2]}\times\frac{1}{[(r+\rho)^2+(z-n\cdot h)^2]^{\frac{1}{2}}}\right] - \frac{1}{\pi}\cdot\int_0^{d_{WG}/2}\left[\frac{M_n\cdot(z-(n-1)\cdot h)}{[(r-\rho)^2+(z-(n-1)\cdot h)^2]}\times\frac{E(k_2)\rho\cdot d\rho}{[(r+\rho)^2+(z-(n-1)\cdot h)^2]^{\frac{1}{2}}}\right]$$

где $k_1^2 = (4\cdot r\cdot\rho)/\left[(r+\rho)^2+(z-n\cdot h)^2\right]$ и $k_2^2 = (4\cdot r\cdot\rho)/\left[(r+\rho)^2+(z-(n-1)\cdot h)^2\right]$.

При $r=d_{WG}/2$ и $z=z_i=h\cdot$i можно определить коэффициенты матрицы форм-факторов $A_{i,j}$ по формуле (21).

$$A_{i,j}=\frac{1}{\pi}\cdot\int_0^{d_{\mathrm{WG}}/2}\left[\frac{(i\cdot h-j\cdot h)E(k_1)\rho\cdot d\rho}{[(\frac{d_{\mathrm{WG}}}{2}-\rho)^2+(i\cdot h-j\cdot h)^2][(\frac{d_{\mathrm{WG}}}{2}+\rho)^2+(i\cdot h-j\cdot h)^2]^{\frac{1}{2}}}\right]-$$
$$-\frac{1}{\pi}\cdot\int_0^{d_{\mathrm{WG}}/2}\left[\frac{(i\cdot h-(j-1)\cdot h)E(k_2)\rho\cdot d\rho}{[(\frac{d_{\mathrm{WG}}}{2}-\rho)^2+(i\cdot h-(j-1)\cdot h)^2][(\frac{d_{\mathrm{WG}}}{2}+\rho)^2+(i\cdot h-(j-1)\cdot h)^2]^{\frac{1}{2}}}\right] \quad (21)$$

где $k_1^2=(2\cdot d_{\mathrm{WG}}\cdot\rho)/\left[(d_{\mathrm{WG}}/2+\rho)^2+(i\cdot h-j\cdot h)^2\right]$ и $k_2^2=(2\cdot d_{\mathrm{WG}}\cdot\rho)/\left[(d_{\mathrm{WG}}/2+\rho)^2+(i\cdot h-(j-1)\cdot h)^2\right]$.

Описанная методика позволяет с учетом влияния размагничивающих полей определить намагниченность волновода как на локальном участке, так и вдоль всей длины волновода.

Разработанный численный метод позволяет рассчитать значение намагниченности материала волновода, значение которого при подстановке в выражения (3) и (4) позволяет найти значения проекции на ось $0Z$ магнитного потока и выходного сигнала, сформированного соленоидом. Представленные в данном разделе математические модели и разработанный численный метод были реализованы в используемом в образовательном процессе программном обеспечении, о котором более подробно будет изложено в разделе, посвященном вычислительным экспериментам.

## 3 Вычислительный эксперимент

Используя уточненные и разработанные модели и численный метод, представленные в теоретической части, было разработано программное обеспечение, используемое в образовательном процессе, позволяющее произвести исследования в акустических трактах магнитострикционных преобразователей перемещений.

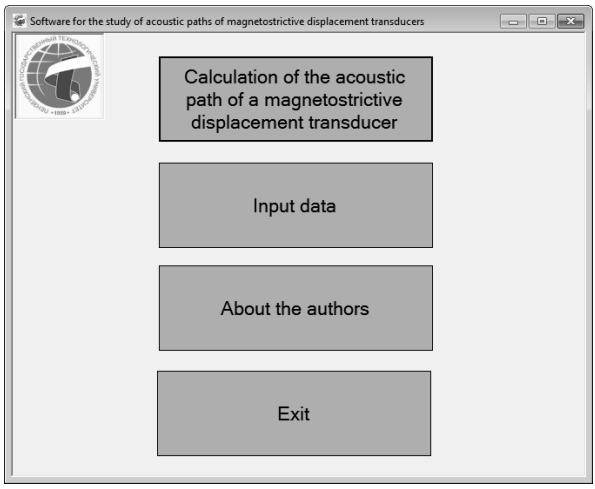



*Рис. 6. Основная форма разработанного программного обеспечения*
*Fig. 6. The main form of the developed software*

Оно состоит из 5 модулей, в том числе основного, содержащего меню и представленного на *Рис. 6*. При нажатии на кнопку “About the authors” появляется окно, показанное на *Рис. 7*.

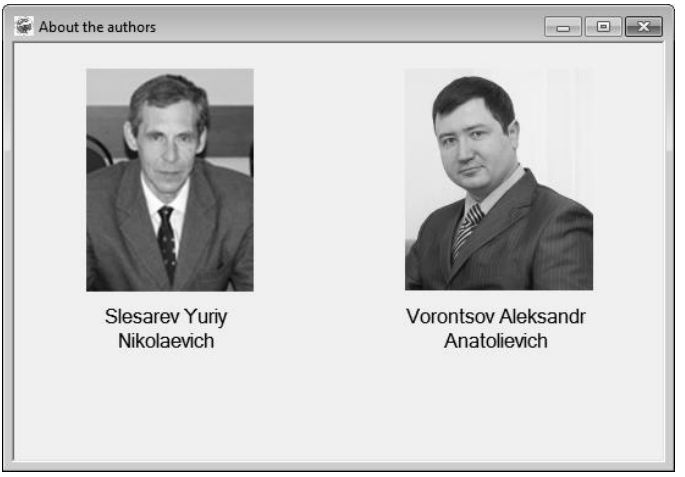



*Рис. 7. Форма, содержащая информацию об авторах*
*Fig. 7. A form containing information about the authors*

Форма “Input data” (*Рис. 8*) появляется при нажатии в основной форме соответствующей кнопки и позволяет сохранить в текстовый файл, извлечь из него и работать с информацией о основных параметрах и свойствах элементов конструкции акустического тракта магнитострикционного преобразователя линейных перемещений. В этой форме имеется возможность выбрать форму, марку и свойства постоянного магнита и ввести его параметры, ввести значение диаметра и свойств материала волновода, амплитуду токовых импульсов и их циклическую частоту колебаний, параметры и размеры соленоида, количество витков и коэффициент заполнения его обмотки. После заполнения этой формы появляется возможность расчета выходных данных либо с использованием кнопки “Calculate” либо нажатием верхней кнопки основной формы. Форма расчета выходных данных, экранная форма которой представлена на *Рис. 9* позволяет получить вычисленные программным обеспечением данные о свойствах постоянного магнита и волновода, а также сравнить полученное значение результирующей напряженности магнитного поля с ее минимальным и максимальным возможными значениями (проверить, находится ли это значение в рабочей области).

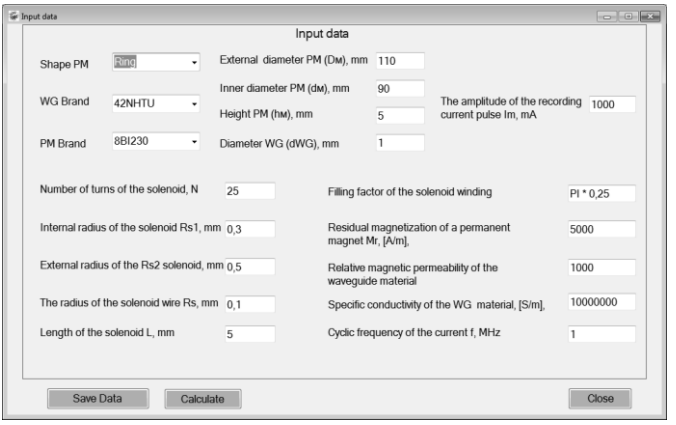



*Рис. 8. Форма редактирования входных данных*
*Fig. 8. Input Data Editing Form*

Также программное обеспечение может получить графическое представление выходного напряжения, сформированного соленоидом или передать полученные значения в MathCad для построения данных в этой системе.

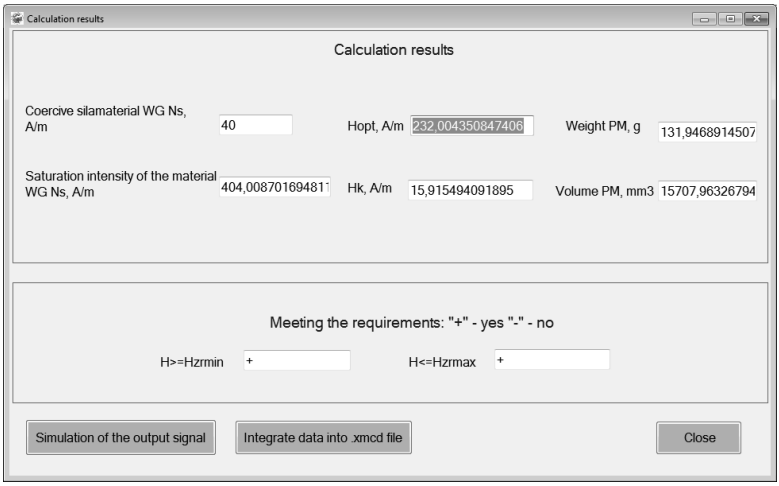



*Рис. 9. Форма расчета выходных данных*
*Fig. 9. Output data calculation form*

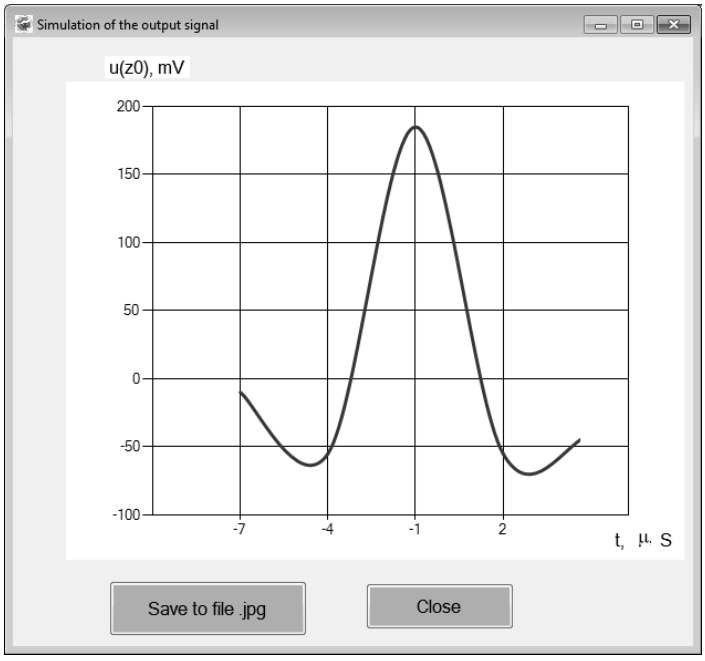



*Рис. 10. Форма графического построения выходного сигнала*
*Fig. 10.The form of graphical construction of the output signal*

Результаты одного из вычислительных экспериментов по исследованию выходного сигнала, сформированного соленоидом от времени с использованием разработанного программного обеспечения приведен на *Рис. 10*. Для проверки адекватности его отображения возможно проведение экспериментальной проверки, осуществляемой в экспериментальной части.

## 4 Экспериментальная часть

Для проверки адекватности вычислительных экспериментов была проведена экспериментальная проверка, с использованием лабораторного стенда (*Рис. 11*), собранного авторами статьи, содержащего генератор импульса треугольной формы, соленоид воспроизведения, преобразующий перемещающуюся крутильную волну в электрический сигнал, усилитель сигнала воспроизведения. Осциллограмма сигнала возбуждения и измерительного сигнала приведена на *Рис. 12*. Результаты экспериментальной проверки для значений, использованных в вычислительных экспериментах показали совпадение не только формы выходного сигнала, но и его длительности. Амплитудное значение выходного сигнала отличалось не более 10%, что обусловлено погрешностями в свойствах и параметрах кольцевого постоянного магнита, волновода и соленоида, а также несовершенством намотки и коммутации соленоида.

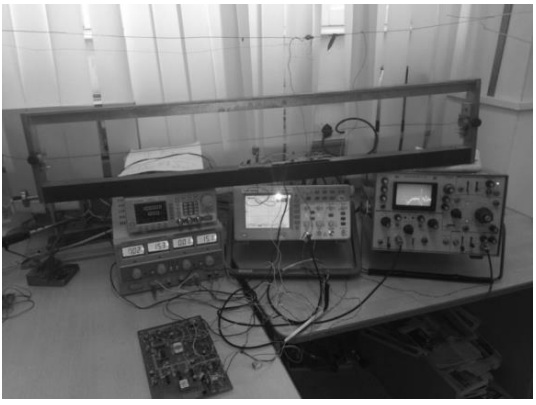
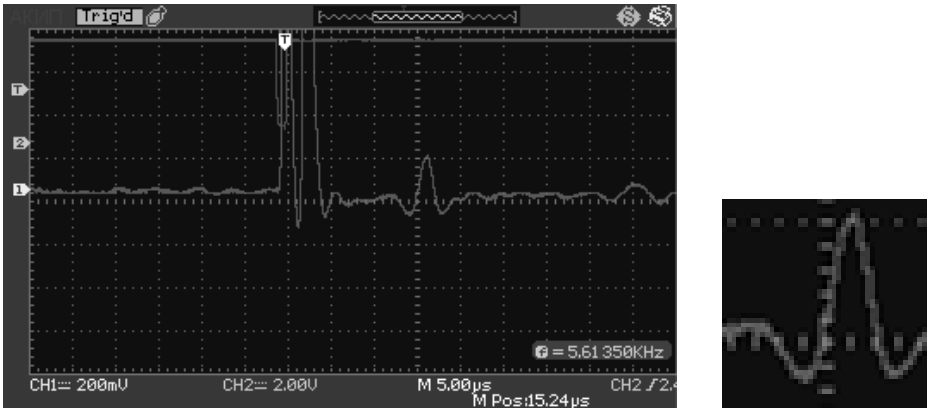


*Рис. 11. Экспериментальная установка*
*Fig. 11. Experimental installation.=*




*а)* *б)*

*Рис. 12. Экспериментальная проверка по определению выходного сигнала*
*а) Полученный выходной сигнал и б) его масштабированная часть, содержащая выходной сигнал, сформированный токовым импульсом записи*
*Fig. 12. Experimental verification to determine the output signal. a) The received output signal and b) its scaled part containing the output signal generated by the recording current pulse*

## 5 Заключение

Таким образом, в работе были уточнены и разработаны математические модели и численный метод, позволяющий проводить исследования в акустических трактах магнитострикционных преобразователях перемещений. Использование разработанного программного обеспечения в образовательном процессе позволит не только изучать основные явления и процессы, происходящие в акустических трактах магнитострикционных приборов, но и проектировать новые конструкции и подбирать необходимые габариты и свойства элементов конструкции, что представляет перспективы для разработки новых классов и конструкций магнитострикционных приборов. Результаты вычислительных экспериментов, полученных разработанным программным обеспечением совпали с экспериментальной проверкой с использованием экспериментальной установки, что подтверждает адекватность представленных моделей и разработанного численного метода.

## Список литературы / References

[1]. Хогленд А. Цифровая магнитная запись. М.: Советское радио, 1967. 280 с. / Hoagland A. Digital Magnetic Recording. M.: Soviet radio, 1967. 280 P.

[2]. Not Just Another Self- Consistent Magnetic Recording Model/ G.G. Hughes, D.S. Bloomberg, V. Castelli, R. Hoffman// IEEE Trans. Magn.- 1981.- MAG-17, № 2.- P. 1192-1199.

[3]. Computer simulation of high- density multiple transition in magnetic disk recording/ K. Nichimoto, Y. Nagao, Y. Suganuma, H. Tonaka// IEEE Trans. Magn.- 1974.- MAG.10.- №3.- P. 769-775.

[4]. George D.J., King S. F., Carr A.R. A self-Consistent Calculation of the Magnetic Transition Recording on a Thin Film Disc.- IEEE Transaction on Magnetics, June, 1971, p.240-243.

[5]. Ивасаки С. Динамическая модель процесса магнитной записи/ С. Ивасаки, Т. Судзуки // Проблемы магнитной записи: Пер. с англ. /Под ред. В.Г. Корольков.- М.: Энергия, 1975.- С. 25-34. / Iwasaki S. Dynamic model of the magnetic recording process/ S. Iwasaki, T. Suzuki // Problems of magnetic recording: Translated from English /Edited by V.G. Korolkov.- M.: Energiya, 1975.- pp. 25-34.

[6]. Михайлов В.И. Запоминающие устройства на оптических дисках / В.И. Михайлов, Г.И. Князев, П.П. Макарычев. -Москва: Радио и связь, 1991.-224 с. / Mikhailov V.I. Storage devices on optical disks/V.I. Mikhailov, G.I. Knyazev, P.P. Makarychev. -Moscow: Radio and Communications, 1991.-224 P.

[7]. Расчет электрических цепей и электромагнитных полей на ЭВМ/ Александрова М.Г., Белянин А.Н., Брукнер и др.: Под ред. Л. В. Данилов и Е. С. Филиппов. – Москва: Радио и связь, 1983. – 344 с. / Calculation of electrical circuits and electromagnetic fields on a computer/ M. G. Alexandrova, A. N. Belyanin, Bruckner et al.: Ed. L. V. Danilov and E. S. Filippov. – Moscow: Radio and communication, 1983. – 344 p.

[8]. Слесарев Ю. Н. Исследование аксиальной составляющей магнитного поля кольцевого магнита / Ю. Н. Слесарев, А.А. Воронцов//XX1 век: Итоги прошлого и проблемы настоящего. 2018 №4(44) Том 7, с. 92-96. / Slesarev Yu. N. Investigation of the axial component of the magnetic field of the ring magnet / Yu. N. Slesarev, AA Vorontsov //XX1 century: the results of the past and the problems of the present 2018 №4(44) Vol. 7, p. 92-96. /

[9]. Jen S. Magnetic and magneto-mechanical vibration properties of non-oriented electrical steel. / S. Jen, Y. Lin, C. Hsu, K. Lin // 2015 IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG). – 2015. PP. 1 – 1.

[10]. N. Mohan, M. Sachdev, "A Static Power Reduction Technique for Ternary Content Addressable Memories," Proceedings of the IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2004.

[11]. Martyshkin A I. Basic operation principles of associate coprocessor module for specialized computer systems based on programmable logical integral schemes. Journal of Fundamental and Applied Sciences, 2018, no. 10(6S), pp. 1449-1463.

[12]. Mathematical Modeling of Magnetic Fields of the Permanent Magnets and Solenoids, and Comparing the Results Obtained. Slesarev U.N., Mikhajlov P.G. and Vorontsov A.A. International Journal of Applied Engineering Research (IJAER) Volume 11, Number 20 (2016) pp. 10338–10342.

[13]. Vorontsov A.A., Slesarev Yu.N. Mathematical Modeling and Experimental Check of Output Signals of Magnetostrictive Converters of Movement. 2019 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2019. DOI 10.1109/RUSAUTOCON.2019.8867715.

[14]. Кулинг Х., Справочник по физике: Пер. с нем./ Под ред. Е. М. Лейкина. – М.: Мир, 1983. – 520 с./ Kuhling H., Handbook of physics: TRANS. with it./ Under the editorship of E. M. Leykin. – M.: Mir, 1983. – 520 P.

[15]. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учебник. – 9-е изд., перераб. и доп.. – М: Гардарики, 2001. – 528 с. / Bessonov L. A. Theoretical bases of electrical engineering. Electromagnetic field: Textbook. – 9th ed., – M: Gardariki, 2001. – 528 P.

[16]. Jia Yu. Fatigue Characteristics of Magnetostrictive Thin-Film Coated Surface Acoustic Wave Devices for Sensing Magnetic Field. / Y.Jia, W.Wang, Yu.Sun, M.Liu, X.Xue, Yu.Liang, Z.Du, J.Luo. // IEEE Access. - 2020. - Vol. 8. - P. 38347 - 38354. DOI 10.1109/ACCESS.2020.2976052.

[17]. Li Yu. High-Frequency Output Characteristics of Giant Magnetostrictive Transducer. / Yu.Li, W.Huang, B.Wang, L.Weng // IEEE Transactions on Magnetics. – 2019. - Vol. 55 (Issue 6). DOI 10.1109/TMAG.2019.2910854.

[18]. Купалян С. Д. Теоретические основы электротехники. Часть 3. Электромагнитное поле. Издание 3-е, исправленное и дополненное. – М.: Энергия, 1970. – 248 с./ Kupalyan S. D. Theoretical bases of electrical engineering. Part 3. Electromagnetic field. 3rd edition, revised and expanded. – M.: Energy, 1970. – 248 P.

[19]. 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.

[20]. 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.

## *Информация об авторах/ Information about authors*

Артем Алексеевич ИВЗАНОВ – студент 4 курса по специальности 09.03.04 «Программная инженерия». Сфера научных интересов: магнитострикционные приборы, нейросети, искусственный интеллект.

Artem Alekseevich IVZANOV – 4th–year student with a degree in Software Engineering on 09.03.04. Research interests: magnetostrictive devices, neural networks, artificial intelligence.

Александр Анатольевич ВОРОНЦОВ – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры “Программирование” с 2012 года. Сфера научных интересов: магнитострикционные приборы, цифровая обработка сигналов, процессы и явления в магнитострикционных приборах.

Aleksander Anatolievich VORONTSOV – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Programming since 2012. Research interests: magnetostrictive devices, digital signal processing, processes and phenomena in magnetostrictive devices.

Юрий Николаевич СЛЕСАРЕВ – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автоматизация и управление» с 2012 года. Сфера научных интересов: магнитострикционные приборы, цифровая обработка сигналов, процессы и явления в магнитострикционных приборах, цифровая магнитная запись, энергетика, альтернативная энергетика.

Yuriy Nikolaevich SLESAREV – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Automation and Control since 2012. Research interests: magnetostrictive devices, digital signal processing, processes and phenomena in magnetostrictive devices, digital magnetic recording, energy, alternative energy.