Russian Technological Journal.
2025;13(4):37–46

ISSN 2782-3210 (Print)
ISSN 2500-316X (Online)

УДК 538.955
https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-37-46
EDN WYJGOZ

CC BY

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Измерение магнитострикции тензометрическим мостом с переменным возбуждением

Д.А. Бурдин @

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия
@ *Автор для переписки, e-mail: phantastic@mail.ru*

• **Поступила:** 21.11.2024 • **Доработана:** 15.01.2025 • **Принята к опубликованию:** 20.05.2025

Резюме

Цели. Знание зависимости магнитострикции различных ферромагнитных материалов от магнитного поля важно для исследования магнитоэлектрического эффекта в композитных структурах, в частности для расчета формы полевой зависимости пьезомагнитных модулей и расчета магнитоупругих характеристик. Наиболее распространенным методом измерения магнитострикционного удлинения является использование тензорезистивных датчиков. Однако типичный уровень разрешения известных тензорезистивных установок для измерения магнитострикции составляет около 10^{-6}, что недостаточно для получения детальной информации о пьезомагнитных коэффициентах исследуемых материалов. Цель работы – разработка автоматизированной установки для прецизионного измерения зависимости магнитострикции ферромагнитных пластин от магнитного поля в диапазоне ±5 кЭ с улучшенным на порядок разрешением по деформации.

Методы. В установке использованы пленочные тензорезистивные датчики, включенные в мост Уитстона, возбуждаемый переменным током. Благодаря примененному методу переноса частоты сигнала, а также применению малошумящего предусилителя и температурной стабилизации измерительной ячейки, удалось уменьшить уровень приведенных ко входу шумов и дрейфа нуля измерительной схемы.

Результаты. Созданная установка обеспечивает на порядок более высокую точность измерения магнитострикции ферромагнитных пластин, чем известные, до 10^{-7} в диапазоне магнитных полей ±5 кЭ. Установка позволяет измерять также электро- и пьезодеформацию материалов в зависимости от приложенного электрического напряжения в диапазоне ±500 В. Результаты измерений дают возможность более точно рассчитать полевые зависимости пьезомагнитных и пьезоэлектрических коэффициентов материалов, в т.ч. материалов с малой величиной магнитострикции, таких как различные ферриты, гематит, железо-иттриевый гранат и др.

Выводы. Применение метода переменного возбуждения измерительного моста в совокупности с другими мерами позволило повысить разрешение по деформации, которое составило около 10^{-7}.

Ключевые слова: магнитострикция, тензометр, деформация, магнитоэлектрический эффект, композитная структура

© Д.А. Бурдин, 2025

Для цитирования: Бурдин Д.А. Измерение магнитострикции тензометрическим мостом с переменным возбуждением. *Russian Technological Journal*. 2025;13(4):37–46. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-37-46, https://www.elibrary.ru/WYJGOZ

Прозрачность финансовой деятельности: Автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Measurement of magnetostriction using a strain gauge bridge with alternating excitation

Dmitry A. Burdin [@]

MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia
[@] *Corresponding author, e-mail: phantastic@mail.ru*

• **Submitted:** 21.11.2024 • **Revised:** 15.01.2025 • **Accepted:** 20.05.2025

Abstract

Objectives. Knowledge of the dependence of magnetostriction of various ferromagnetic materials on the magnetic field is important for studying the magnetoelectric effect in composite structures, in particular for calculating the shape of the field dependence of piezomagnetic moduli and for calculating magnetoelastic characteristics. However, the typical resolution level of known strain gauge setups for measuring magnetostriction is about 10^{-6}, which is insufficient to obtain detailed information on the piezomagnetic coefficients of the materials under study. The paper describes the development of an automated setup for the precision measurement of the dependence of magnetostriction of ferromagnetic plates on a magnetic field in the range of ±5 kOe providing an improved strain resolution order of magnitude.

Methods. The setup uses film strain gauges included in a Wheatstone bridge excited by alternating current. Thanks to the applied method of signal frequency shift, as well as the use of a low-noise preamplifier and temperature stabilization of the measuring cell, it was possible to reduce the level of noise referred to the input and zero drift of the measuring circuit.

Results. The developed setup provides an accuracy of the magnetostriction measurement of ferromagnetic plates up to 10^{-7} in the range of magnetic fields of ±5 kOe, which is an order of magnitude higher than known methods. The setup also allows measuring the electric and piezoelectric deformation of materials depending on the applied electrical voltage in the range of ±500 V. The measurement results can be used to more accurately calculate the field dependencies of the piezomagnetic and piezoelectric coefficients of materials, including materials with low magnetostriction, such as various ferrites, hematite, yttrium iron garnet, etc.

Conclusions. The method of alternating excitation of the measuring bridge in combination with other measures can be used to increase the deformation resolution to about 10^{-7}.

Keywords: magnetostriction, strain gauge, deformation, magnetoelectric effect, composite structure

For citation: Burdin D.A. Measurement of magnetostriction using a strain gauge bridge with alternating excitation. *Russian Technological Journal.* 2025;13(4):37–46. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2025-13-4-37-46, https://www.elibrary.ru/WYJGOZ

Financial disclosure: The author has no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The author declares no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитострикцией называют изменение линейных размеров ферромагнетика при изменении его намагниченности. Одной из основных характеристик магнитострикции является магнитострикция насыщения λ_{sat}, равная относительному удлинению образца в поле магнитного насыщения H_s. Однако более полно свойства магнитострикции описывает зависимость относительного удлинения от магнитного поля $\lambda(H)$. Измерение зависимости магнитострикции различных ферромагнитных материалов от магнитного поля важно для исследований магнитоэлектрических (МЭ) эффектов в композитных структурах, содержащих ферромагнитные (ФМ) и пьезоэлектрические (ПЭ) слои, и разработки новых смарт-устройств [1–3]. Магнитоэлектрические эффекты в таких структурах возникают из-за взаимодействия механически связанных ФМ- и ПЭ-слоев при воздействии внешних электрических и магнитных полей.

Типичные МЭ-структуры и составляющие их слои представляют собой пластины с размерами в плоскости ~5 × 20 мм и толщиной в десятки и сотни микрометров. В качестве материала ФМ-слоев применяют Ni ($\lambda_{sat} = -30 \cdot 10^{-6}$), Terfenol-D ($\lambda_{sat} = 2000 \cdot 10^{-6}$), аморфные сплавы состава FeBSiC ($\lambda_{sat} = 20–30 \cdot 10^{-6}$), FeCoV ($\lambda_{sat} = 70 \cdot 10^{-6}$), галфенол ($\lambda_{sat} = 30–90 \cdot 10^{-6}$). В последнее время интерес исследователей привлекает возможность создания МЭ-структур с монокристаллическими слоями из ферро- и антиферромагнетиков, обладающих меньшей магнитострикцией ($\lambda_{sat} < 10^{-5}$). Основными методами прямого измерения магнитострикции являются тензорезистивный [4–8] и дилатометрический [9]. Дилатометры по принципу работы делятся на емкостные [10, 11] и оптические [12–14]. Наиболее подходящим для исследования магнитострикции плоских ФМ-образцов и композитных структур является тензорезистивный метод: на образец наклеивают тензочувствительный резистор, который включают в измерительный мост. Этот метод широко применяется для измерения магнитострикции благодаря дешевизне и простоте подготовки образцов. К недостаткам данного метода можно отнести ограниченную применимость для измерения магнитострикции пленок.

Измерительный мост в таких схемах, как правило, питают от источника постоянного напряжения (тока), что накладывает ограничения на минимальную разрешаемую величину деформации. Подобные тензометры имеют типичный размах входного шума в $(2–5) \cdot 10^{-6}$ [15–17], что приемлемо для исследования материалов с большой магнитострикцией насыщения $\lambda_{sat} > 10^{-5}$, но не позволяет исследовать материалы с малой магнитострикцией. Поэтому актуальной задачей является создание установки с более высоким разрешением.

Цель данной работы состояла в разработке установки для измерения магнитострикции тензорезистивным методом с повышенным разрешением – лучше, чем 10^{-6}. В первой части статьи описана конструкция установки, затем следует описание принципа действия и приводится анализ шумов, определяющих ее разрешающую способность. Завершающая часть работы посвящена практической проверке достигнутого уровня входных шумов и демонстрации измерения магнитострикции и электрострикции реальных образцов.

КОНСТРУКЦИЯ УСТАНОВКИ

Внешний вид установки для измерения магнитострикции показан на рис. 1. Она состоит из 3 основных частей (рис. 2): магнитной системы, измерительной ячейки и контрольно-измерительного блока (КИБ). Магнитная система служит для создания постоянного магнитного поля величиной от 0 до 5 кЭ и представляет собой лабораторный электромагнит с установленными в магнитный зазор измерительной ячейкой на подвижном основании и зондом с датчиком Холла. Подвижное основание ячейки служит для позиционирования ячейки в зазоре электромагнита, а также для оперативного извлечения образца (платы образца). Перемещение ячейки осуществляется с помощью каретки, двигающейся по рельсовой направляющей, установленной между обмотками электромагнита.

Для питания электромагнита использован стандартный лабораторный источник питания в паре с устройством коммутации, обеспечивающим переключение полярности магнитного поля. Измерение магнитного поля проводили лабораторным гауссметром Lake Shore 421 (Lake Shore, США).

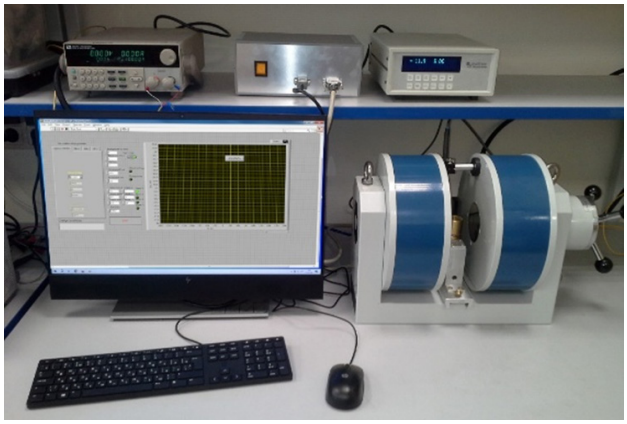


Рис. 1. Внешний вид установки для измерения магнитострикции

Исследуемый образец с приклеенным на его поверхность тензодатчиком помещается на съемную плату измерительной ячейки. Выводы тензодатчика припаиваются к контактным площадкам, формируя совместно с распложенными на этой плате резисторами мост Уитстона. На этой же плате реализованы цепи балансировки (на основе проволочного потенциометра), а также предварительный усилитель.

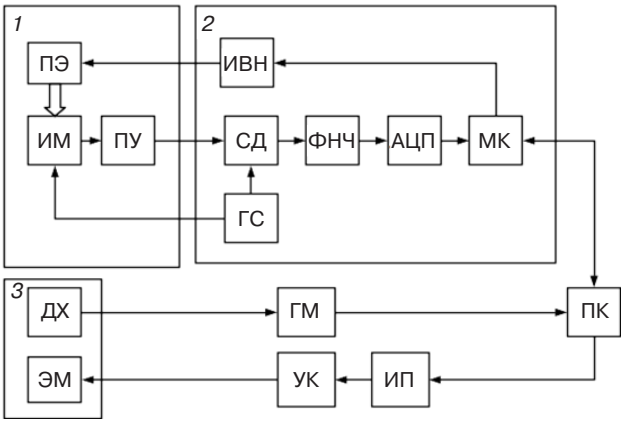


Рис. 2. Структурная схема установки для измерения магнитострикции: *1* – измерительная ячейка, *2* – КИБ, *3* – магнитная система; ПЭ – ПЭ-элемент, ИМ – измерительный мост, ПУ – предусилитель, СД – синхронный детектор, ИВН – источник высокого напряжения, ГС – генератор сигналов, ФНЧ – фильтр нижних частот, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, МК – микроконтроллер, ДХ – датчик Холла, ЭМ – электромагнит, ГМ – гауссметр, УК – устройство коммутации, ИП – источник питания электромагнита, ПК – персональный компьютер

На рис. 3 показана ячейка на основании (электромагнит дан в разрезе). Корпус ячейки имеет форму цилиндра и может поворачиваться вокруг вертикальной оси на 180° с помощью съемной рукояти, что позволяет измерять ориентационные зависимости. Угол установки ячейки измеряется по шкале на боковой (цилиндрической) поверхности ее корпуса.

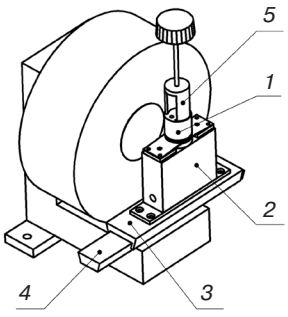
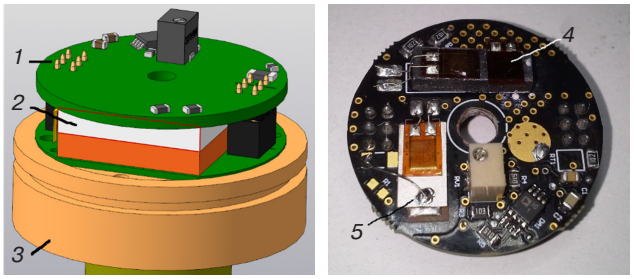


Рис. 3. Ячейка на основании (конструкция и внешний вид): *1* – ячейка, *2* – основание-радиатор, *3* – каретка ячейки, *4* – рельс основания, *5* – съемная рукоять

На рис. 4а показана съемная плата предусилителя. Плата с образцом устанавливается на верхнюю поверхность элемента Пельтье и подключается к базовой плате с помощью двух малогабаритных шестиконтактных штыревых разъемов. Термоэлектрический элемент используется для стабилизации температуры платы с образцом с точностью до 0.01 °C. Электрический кабель, связывающий ячейку с КИБ, подключается к базовой плате и термоэлементу с помощью выводов на нижней части корпуса ячейки. Предусилитель выполнен на основе малошумящего интегрального инструментального усилителя INA849 (Texas Instruments, США).

Контрольно-измерительный блок служит для детектирования и оцифровки измерительного сигнала, стабилизации температуры платы с образцом, питания измерительного моста переменным напряжением с частотой 410 Гц и амплитудой до 4 В, а также для формирования постоянного напряжения от −500 до 500 В для исследования электрострикционных и ПЭ-образцов. Конструктивно КИБ выполнен в настольном корпусе с размерами 300 × 150 × 100 мм. Соединение КИБ и ячейки осуществляется 15-контактным сигнальным кабелем.



(а) (б)

Рис. 4. Конструкция ячейки (а) и внешний вид съемной платы усилителя (б): *1* – плата усилителя, *2* – элемент Пельтье, *3* – основание ячейки, *4* – ФМ-образец с тензодатчиком, *5* – пьезоэлемент с тензодатчиком

ПРИНЦИП РАБОТЫ ТЕНЗОМЕТРА

Измерение удлинения образца осуществляется с помощью стандартных тензорезистивных датчиков. Фольговый тензорезистивный датчик представляет собой меандровую решетку из тонкой металлической пленки, выполненную на бумажной или полиимидной подложке. Датчик приклеивается на поверхность образца с учетом направления чувствительности. На рис. 5 показаны два основных способа включения тензодатчиков.

Здесь одно плечо моста выполнено с помощью двух резисторов с одинаковым сопротивлением R, а другое плечо – из двух тензодатчиков S1 и S2.

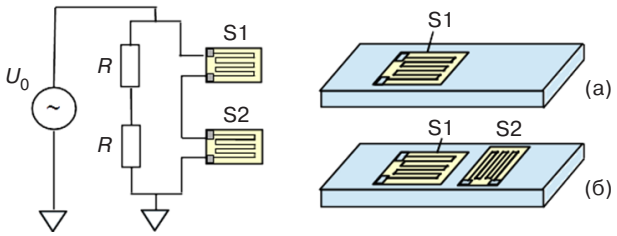


Рис. 5. Тензоизмерительный полумост:
(а) с одним активным датчиком,
(б) с двумя активными датчиками

В первом случае на образец наклеивается только один датчик (S1), а второй (S2) лишь дополняет плечо измерительного моста. Эта конфигурация используется при необходимости избирательно измерять удлинение в одном направлении. Если деформация направлена вдоль стороны образца, то можно применить вторую конфигурацию, когда опорный датчик S2 наклеивается на образец (на ту же поверхность либо на обратную) под углом 90° к первому.

На рис. 6 приведена функциональная схема аналоговой части сигнального тракта тензометра, которая состоит из предусилителя K_{amp}, демодулятора на микросхеме AD630 (Analog Devices, Inc., США) и фильтра нижних частот. Рассмотрим преобразование сигнала от измерительного моста до входа АЦП. Мост питается гармоническим напряжением u_b с амплитудой U_0 и частотой ω_0: $u_b = U_0\cos(\omega_0 t)$, где t – время. Можно показать, что напряжение разбаланса моста $u_{s.m.} \approx u_b\delta R/4$, где δR – изменение сопротивления тензодатчика.

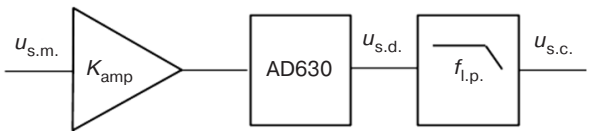


Рис. 6. Аналоговая часть входного измерительного тракта. $u_{s.m.}$ – напряжение рассогласования моста, $u_{s.d.}$ – сигнал на выходе демодулятора, $f_{l.p.}$ – частота среза фильтра нижних частот, $u_{s.c.}$ – сигнал на входе АЦП

Пусть деформация $\varepsilon = \varepsilon_0\cos(\omega t)$, происходит периодически с частотой $\omega < \omega_0$, при этом $\delta R = G\varepsilon_0\cos(\omega t)$, где ε_0 – амплитуда деформации, $G \approx 2$ – коэффициент тензочувствительности датчика. Напряжение рассогласования моста будет равно:

$$u_{s.m.} \approx \frac{u_b\delta R}{4} = \frac{U_0\cos(\omega_0 t)G\varepsilon_0\cos(\omega t)}{4} = \frac{\frac{1}{2}U_0G\varepsilon_0(\cos((\omega_0-\omega)t)+\cos((\omega_0+\omega)t))}{4}. \quad (1)$$

Таким образом, полезный сигнал, пропорциональный изменению сопротивления тензорезистора с образцом, модулирует амплитуду напряжения. В результате спектр сигнала переносится на частоты $(\omega_0 + \omega)$ и $(\omega_0 - \omega)$ в правую и левую боковые полосы. В случае постоянной деформации ($\omega \approx 0$) выражение (1) упрощается:

$$u_{s.m.} \approx \frac{u_b\delta R}{4} = \frac{U_0\cos(\omega_0 t)G\varepsilon_0}{4}. \quad (2)$$

Сигнал $u_{s.m.}$ усиливается предусилителем с коэффициентом усиления $K_{amp} \approx 1000$ и подается на вход синхронного демодулятора, выполненного на микросхеме AD630. Сигнал на выходе демодулятора:

$$u_{s.d.}(\omega) = K_{amp}u_{s.m.}(\omega)\cos(\omega_0 t) = \frac{K_{amp}U_0\cos(\omega t)G\varepsilon_0\cos^2(\omega_0 t)}{4} = \left[\frac{K_{amp}U_0G\varepsilon_0}{8}(1+2\cos(\omega_0 t))\right]_{\omega=0}, \quad (3)$$

т.е., восстанавливается изначальный сигнал и возникает дополнительная компонента с частотой $2\omega_0$. Расположенный после детектора фильтр нижних частот 3-го порядка (ФНЧ) с полосой пропускания $\omega_{l.p.} << \omega_0$ ($\omega_{l.p.} \approx 14$ Гц) отсекает высокочастотные компоненты сигнала перед аналого-цифровым преобразованием. Передаточная характеристика фильтра:

$$K_{l.p.} = \frac{1}{\left(\sqrt{1+\left(\frac{\omega}{\omega_{l.p.}}\right)}\right)^3}. \quad (4)$$

В итоге сигнал на входе АЦП равен:

$$u_{s.c.}(\omega) = \frac{K_{amp}K_{l.p.}U_0G\varepsilon_0\cos(\omega t)}{8} = \left[\frac{K_{amp}K_{l.p.}U_0G\varepsilon_0}{8}\right]_{\omega=0}. \quad (5)$$

После оцифровки сигнал сглаживается по алгоритму простого скользящего среднего, величина окна настраивается в пределах 1–250 выборок, частота оцифровки – 250 $с^{-1}$.

АНАЛИЗ ШУМОВ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО УСИЛИТЕЛЯ

При анализе электрических шумов в схеме тензометра будем учитывать только входные шумы, т.к. предусилитель имеет высокий коэффициент

усиления (около 1000), и влияние шумов последующих звеньев пренебрежимо мало. Рассмотрим возможные источники этих шумов.

Тепловой шум. Тепловой шум (шум Найквиста) вызван тепловыми колебаниями носителей зарядов в проводниках и генерируется всегда, независимо от протекающего тока. Спектр теплового шума широкополосный и равномерный, спектральная плотность мощности резистора сопротивлением R дается следующим выражением [18]:

$$S_{\text{n}} = 4\text{k}TR, \tag{6}$$

где S_{n} – спектральная плотность напряжения теплового шума $\left(\text{В}/\sqrt{\text{Гц}}\right)$, $\text{k} = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура. Тепловой шум характерен для всех сопротивлений и на схеме (рис. 7) обозначен как источник S_{n}.

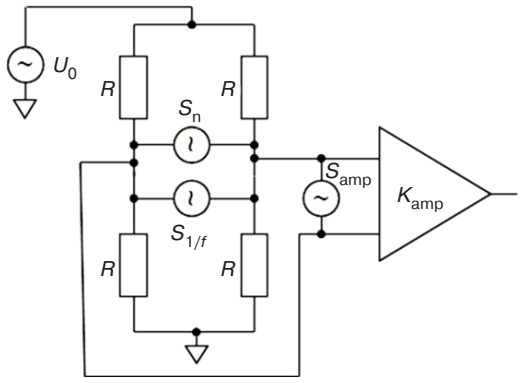


Рис. 7. Основные источники шума во входных цепях. S_{amp} – шум усилителя

Фликер-шум (1/*f*). Фликер-шум характерен специфической частотной зависимостью спектральной плотности, в общем случае она описывается формулой [19]:

$$S_{1/f} = \sqrt{\frac{CR^{\beta}I^{\beta}}{f^{\gamma}}}, \tag{7}$$

где $S_{1/f}$ – спектральная плотность напряжения фликер-шума $\left(\text{В}/\sqrt{\text{Гц}}\right)$; C, β и γ – коэффициенты; I – сила протекающего тока; f – частота. Для металлических пленок при относительно небольших значениях плотности тока можно принять $\beta = 2, \gamma = 1$. Считается, что фликер-шум проводника эквивалентен изменению его сопротивления в результате флуктуации подвижности носителей заряда при рассеянии на решетке либо флуктуации равновесной температуры [20]. Фликер-шум на рис. 7 обозначен источником $S_{1/f}$.

Шум усилителя. Под шумом усилителя понимается шум совокупности всех источников в составе инструментального усилителя, представленный в виде эквивалентного источника шумового напряжения, расположенного на входе усилителя (S_{amp} на рис. 7). Плотность токового шума для данной микросхемы составляет около $1.1\ \text{пА}/\sqrt{\text{Гц}}$, так что с учетом низкого импеданса входных цепей им можно пренебречь.

Таким образом, источники электрического шума в схеме на рис. 7 можно разделить на 2 типа: аддитивные и мультипликативные. Аддитивные шумы представляют собой шум напряжения и тока, они не модулируют сигнал накачки, и их спектр не изменяется. Мультипликативный шум – флуктуации сопротивлений резисторов моста – вызывает изменение баланса моста, в результате амплитудной модуляции (АМ) его функция спектральной плотности преобразуется подобно полезному сигналу. Пусть S_{in} – спектральная плотность напряжения шума на входе усилителя при постоянном напряжении питания моста, при питании моста переменным напряжением с частотой ω она преобразуется в $S_{\text{in.mod.}}$:

$$\begin{aligned} S_{\text{in}}^2 &= S_{\text{n}}^2(\omega) + S_{\text{amp}}^2(\omega) + S_{1/f}^2(\omega) \overset{\text{AM}}{\rightarrow} S_{\text{in.mod.}}^2(\omega) = \\ &= S_{\text{n}}^2(\omega) + S_{\text{amp}}^2(\omega) + \frac{1}{4}S_{1/f}^2(\omega_0 - \omega) + \\ &+ \frac{1}{4}S_{1/f}^2(\omega_0 + \omega). \end{aligned} \tag{8}$$

Здесь мы воспользовались тем фактом, что для сбалансированного моста выходной шум эквивалентен шуму одного из резисторов. Можно показать, что спектральная плотность шума на выходе демодулятора S_{d} описывается следующим выражением:

$$\begin{aligned} S_{\text{d}}^2(\omega) &= K_{\text{amp}}^2 \times \\ &\times \left(\frac{1}{2}S_n^2(\omega + \omega_0) + \frac{1}{2}S_{\text{amp}}^2(\omega + \omega_0) + \frac{1}{4}S_{1/f}^2(\omega)\right). \end{aligned} \tag{9}$$

Спектральная плотность шума на входе АЦП составляет:

$$\begin{aligned} S_{\text{in.conv.}}^2(\omega) &= K_{\text{amp}}^2 K_{\text{l.p.}}^2 \times \\ &\times \left(\frac{1}{2}S_{\text{n}}^2(\omega + \omega_0) + \frac{1}{2}S_{\text{amp}}^2(\omega + \omega_0) + \frac{1}{4}S_{1/f}^2(\omega)\right). \end{aligned} \tag{10}$$

Оценить разрешающую способность тензометра можно по уровню суммарного шума. Чтобы найти величину шумового напряжения u_{Σ}, приведенного ко входу (referred to input, RTI), необходимо проинтегрировать выражение (10) и разделить на коэффициент усиления:

$$u_\Sigma = \frac{\int_{\omega_l}^{\omega_h} S^2_{\text{in.conv.}}(\omega)d\omega}{K_{\text{amp}}} = \sqrt{\int_{\omega_l}^{\omega_h}\left(K^2_{\text{l.p.}}\frac{1}{4}S^2_{1/f}(\omega) + K^2_{\text{l.p.}}\frac{1}{2}S^2_{\text{n}}(\omega+\omega_0) + K^2_{\text{l.p.}}\frac{1}{2}S^2_{\text{amp}}(\omega+\omega_0)\right)d\omega}. \quad (11)$$

В расчетах была использована спектральная плотность напряжения фликер-шума $S_{1/f}$ стандартных константановых тензорезисторов 1-XY33-6, измеренная в работе [21]. Подставляя данные в выражение (11), с учетом (6) и (7) получим уровень среднеквадратичного шумового напряжения, приведенного ко входу: $u_\Sigma = 6.7 \cdot 10^{-9}$ В. Зная уровень входного шума, с учетом выражения (1) можно выразить среднеквадратичное значение кажущегося удлинения:

$$\sigma_\varepsilon = \frac{4u_\Sigma}{u_b G} = \frac{4\cdot 1.1\cdot 10^{-8}}{1.5\cdot 2} = 1.46\cdot 10^{-8} = 0.015\cdot 10^{-6}. \quad (12)$$

Амплитудное значение шума (ширину шумовой дорожки) $\Delta\varepsilon_{\text{pp}}$ (peak-to-peak) можно оценить по формуле:

$$\Delta\varepsilon_{\text{pp}} \approx 6\sigma_\varepsilon = 0.888 \cdot 10^{-6}. \quad (13)$$

Таким образом, определены ограничения, накладываемые электрическими шумами на разрешение тензометра. Согласно расчетам, основной вклад в уровень электрических шумов делает фликер-шум резистором измерительного моста. Однако, помимо чисто электрических шумов, есть ряд факторов, влияющих на результат измерения удлинения.

Выбор частоты модуляции. Из приведенного анализа видно, что частота модуляции тензомоста должна быть выбрана таким образом, чтобы обеспечить достаточную отстройку от низкочастотной части шумового спектра инструментального усилителя. С другой стороны, при повышении частоты модуляции возрастает влияние паразитных реактивных элементов. Также необходимо отстроиться от промышленной частоты (50 Гц) и ее гармоник. С учетом перечисленных факторов была выбрана частота 410 Гц.

Температурные флуктуации и дрейф. Температуру элементов измерительного моста можно считать равномерной и постоянной лишь приблизительно. В действительности имеют место флуктуации и дрейф температуры, связанные с процессами рассеивания мощности, выделяемой тензорезисторами и инструментальным усилителем, а также с нестабильностью лабораторной температуры.

Типичное значение температурного коэффициента сопротивления константанового тензорезистора составляет ТКС = $10 \cdot 10^{-6}$ 1/K. Оценим изменение температуры, вызывающее ложный отклик на ширину шумовой дорожки:

$$\Delta T = \frac{\Delta\varepsilon_{\text{pp}}}{\text{ТКС}} = 0.009 \text{ K}. \quad (14)$$

Видно, что схема тензометра чрезвычайно чувствительна к неравномерному изменению температуры. Выражение (14) не учитывает, однако, влияние разницы коэффициентов теплового расширения исследуемого образца (sample plate) и датчика (guage) [15] $\Delta\text{ТКР} = \text{ТКР}_{\text{sam.pl.}} - \text{ТКР}_{\text{guage}}$, из-за которого термочувствительность может увеличиться в несколько раз:

$$\Delta T = \frac{\Delta\varepsilon_{\text{pp}}}{\text{ТКС} \pm \Delta\text{ТКР}\cdot G}. \quad (15)$$

В стандартных тензометрических приложениях часто используют методику температурной компенсации, подбирая ТКС тензодатчиков под ТКР материала, так что сумма в знаменателе выражения (15) стремится к нулю. К сожалению, в случае универсального тензометра такой метод практически неприменим, т.к. материал образца может быть разным и его ТКР может быть неизвестен. Дополнительно усложняет ситуацию неопределенность в значении теплопроводности и тепловой массы образца, что влияет на процесс рассеяния тепла, выделяемого тензодатчиком. При конструировании измерительной ячейки были использованы следующие методы борьбы с паразитным влиянием тепловых процессов. Во-первых, ячейка выполнена закрытой, чтобы нивелировать влияние конвективных потоков воздуха. После установки образца и балансировки моста требуется выдержать определенное время, в течение которого происходит выравнивание температуры внутри ячейки. Во-вторых, предусмотрена активная прецизионная стабилизация температуры платы предусилителя с помощью элемента Пельтье. Также конструкция ячейки допускает балансное включение тензорезисторов активного плеча моста, когда оба резистора приклеиваются к образцу, компенсируя в некоторой степени температурную чувствительность.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Чтобы оценить разрешающую способность установки по деформации, была записана зависимость выходного сигнала тензометра от времени в отсутствие магнитного поля, $H = 0$. Выборка содержала 1000 точек, время записи составляло 10 мин. Полученная шумовая дорожка показана на рис. 8. Величина

среднеквадратического отклонения на графике составляет $\sigma_\varepsilon \approx 0.016 \cdot 10^{-6}$, что соответствует амплитудному значению шума $\Delta\varepsilon_{pp} = 0.096 \cdot 10^{-6}$. Полученный результат хорошо согласуется с расчетом по (13).

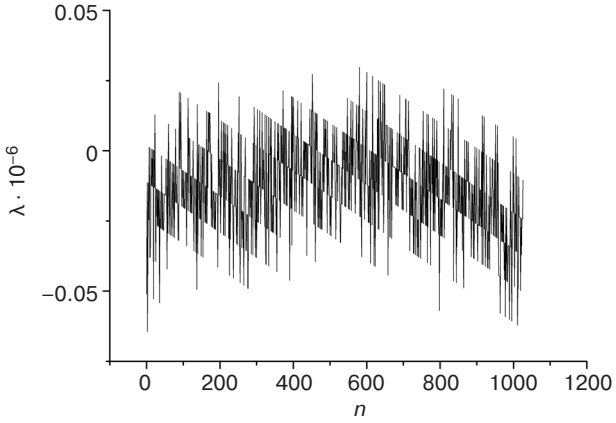


Рис. 8. Шумовая дорожка тензометрической установки (здесь *n* – номер выборки)

Для демонстрации преимуществ созданной установки были измерены кривые магнитострикции образца феррита магния $MgFe_2O_4$ на тензометре с переменным возбуждением и на тензометре постоянного тока [18]. Образец перемагничивали по предельному циклу с шагом по магнитному полю 0.3 Э. На рис. 9 хорошо видна разница в уровне шума двух установок. Кривая *1* существенно чище, демонстрирует гистерезис при перемагничивании, в то время как кривая *2* дает только качественное представление о полевой зависимости магнитострикции образца.

Для расчета полевых характеристик МЭ-эффектов важно знать зависимости пьезомагнитного коэффициента $q = d\lambda/dH$ от магнитного поля. На рис. 10 приведены зависимости $q(H)$, рассчитанные методом численного дифференцирования кривых $\lambda(H)$ (рис. 9). Кривая *1* получена с использованием данных

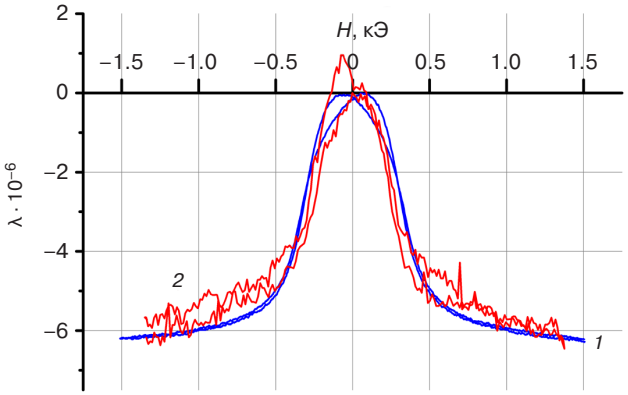


Рис. 9. Зависимости магнитострикции λ пластины $MgFe_2O_4$ от напряженности магнитного поля *H*, измеренные:
1 – тензометром с переменным возбуждением,
2 – тензометром на постоянном токе

с тензометра с переменным возбуждением, а кривая *2* – с использованием данных с обычного тензометра на постоянном токе. Видно, что использование для измерения магнитострикции тензометра с переменным возбуждением позволяет гораздо точнее предсказать форму полевой зависимости линейного МЭ-эффекта.

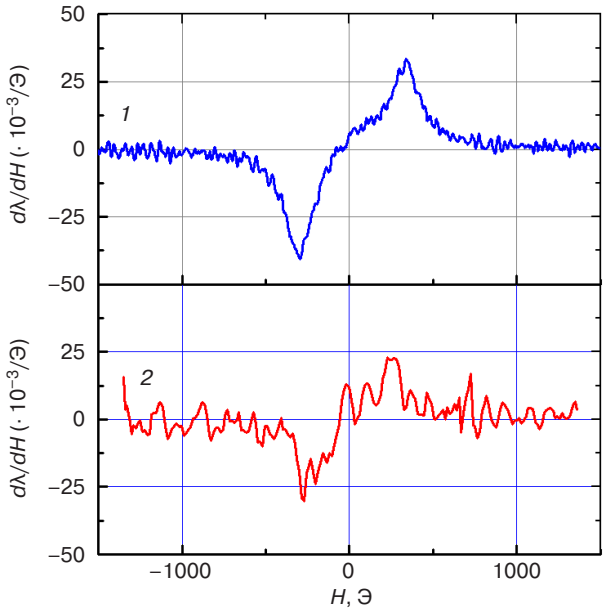


Рис. 10. Рассчитанная зависимость пьезомагнитного коэффициента *q* от напряженности магнитного поля *H* для образца $MgFe_2O_4$ по данным с тензометра:
1 – на переменном токе, *2* – на постоянном токе

Описанная установка, благодаря наличию управляемого двухполярного источника высокого напряжения (ИВН на рис. 2) позволяет измерять также величину ПЭ-эффекта и проводить исследования электро- и магнитоакустических взаимодействий в композитных структурах. Постоянное напряжение *U* величиной до 500 В подается на электроды ПЭ-образца, и измеряется деформация образца. На рис. 11 показана типичная измеренная зависимость удлинения пластины ЦТС-19 (ОАО «НИИ «Элпа», Россия) размерами 5 × 10 × 0.2 мм, поляризованной по толщине, от электрического напряжения, приложенного к электродам на ее поверхности. Величина пьезомодуля d_{31}, рассчитанная по данным на рис. 11 в точке нулевого смещения, составляет около 130 пКл/Н, что близко к данным производителя (d_{31} = 155 пКл/Н).

В таблице приведены основные характеристики созданной установки (alternating current, AC) в сравнении с тензометром на мосте постоянного тока (direct current, DC) [18]. Видно, что по величине шума, приведенного ко входу, установка на переменном токе значительно превосходит установку на постоянном токе, а также стандартный

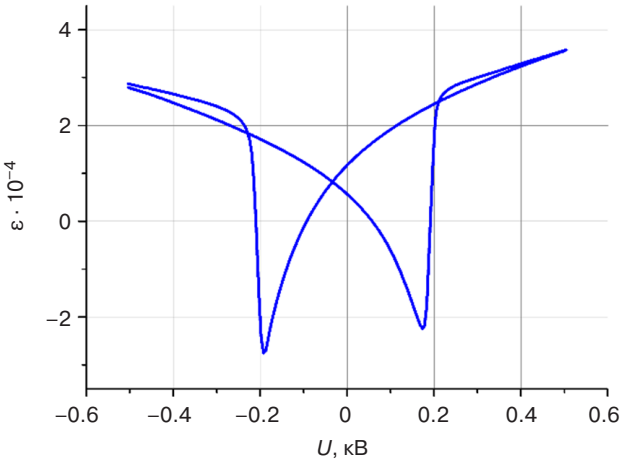


Рис. 11. Измеренная зависимость ПЭ-деформации ε пластины ЦТС-19 от электрического напряжения *U*

тензометрический усилитель DPM911B[1] (Kyowa Electronic Instruments Co., Япония), примененный в работе [6] (RTI = 2).

Таблица. Основные характеристики установки

Параметр	AC	DC [16]
Диапазон измеряемого удлинения, мкм/м	0–2000	0–2000
Приведенный ко входу шум, мкм/м	0.096	2
Максимальные размеры образца, мм × мм	20 × 10	20 × 10
Максимальное магнитное поле, Гс	5000	1500

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создана установка для измерения зависимости магнитострикционного удлинения образцов в виде пластин от магнитного поля и электрострикционного/пьезоэлектрического удлинения от электрического поля. Показано, что возбуждение измерительного тензомоста установки переменным током, использование синхронного детектирования и термостабилизация образца и компонентов измерительной схемы позволяют примерно на порядок понизить уровень шумов по сравнению со стандартными установками, использующими питание тензомоста постоянным током. Достигнуто разрешение установки по деформации ~10^{-7}. Установлено, что основным источником шума измерительной схемы является 1/*f* шум тензорезисторов, который, благодаря своей природе, с точки зрения методов обработки сигналов неотличим от полезного сигнала. Измеренный уровень шума совпал с расчетным, полученным на основе опубликованных шумовых характеристик пленочных тензорезисторов. Дальнейшее повышение разрешения измерительной установки может быть достигнуто путем улучшения соотношения между коэффициентом тензочувствительности и уровнем фликер-шума тензодатчиков.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (Государственное задание для университетов FSFZ-2023-0005).

Данные расчетов могут быть предоставлены по запросу.

ACKNOWLEDGMENTS

The study is supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within a State Assignment for Universities (project No. FSFZ-2023-0005).

The calculation data can be provided upon request.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Chu Z., Pourhosseini Asl M., Dong S. Review of multi-layered magnetoelectric composite materials and devices applications. *J. Phys. D: App. Phys.* 2018;51(24):243001. https://doi.org/10.1088/1361-6463/aac29b
2. Серов В.Н., Фетисов Л.Ю., Фетисов Ю.К., Шестаков Е.И., Высокочувствительный магнетометр на основе магнитоэлектрического датчика. *Российский технологический журнал.* 2016;4(5):24–37. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2016-4-5-24-37
[Serov V.N., Fetisov L.Y., Fetisov Y.K., Shestakov E.I. High-sensitivity magnetometer based on a magnetoelectric sensor. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal.* 2016;4(5):24–37 (in Russ.). https://doi.org/10.32362/2500-316X-2016-4-5-24-37]

[1] DPM-911B strain guage amplifer datasheet. https://product.kyowa-ei.com/en/products/amplifiers/type-s_dpm-900_series?tab=specification. Дата обращения 19.05.2025. / Accessed May 19, 2025.

3. Федулов Ф.А., Савельев Д.В., Чашин Д.В., Шишкин В.И., Фетисов Ю.К. Магнитоэлектрический эффект в двухслойных полосковых и периодических гетероструктурах никель – цирконат-титанат свинца. *Russian Technological Journal*. 2022;10(3):64–73. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-64-73
[Fedulov F.A., Saveliev D.V., Chashin D.V., Shishkin V.I., Fetisov Yu.K. Magnetoelectric effects in stripe- and periodic heterostructures based on nickel–lead zirconate titanate bilayers. *Russian Technological Journal*. 2022;10(3):64–73. https://doi.org/10.32362/2500-316X-2022-10-3-64-73]
4. Kuczynski K., Bienkowski A., Szewczyk R. New Measuring System for Testing of the Magnetostrictive Properties of the Soft Magnetic Materials. In: *10th IMIKO TC4 Int. Workshop on ADC Modeling and testing* – IWADC. 2005. P. 434–439. URL: https://www.imeko.info/publications/tc4-2005/IMEKO-TC4-2005-078.pdf
5. Linhares C.C., Santo J.E., Teixeira R.R., Coutinho C.P., Tavares S.M.O., Pinto M., Costa J.S., Mendes H., Monteiro C.S., Rodrigues A.V., Frazao O. Magnetostriction Assessment with strain gauges and fiber bragg gratings. *EAI Endorsed Trans. on Energy Web*. 2020;7(25):e4. https://doi.org/10.4108/eai.13-7-2018.161420
6. Wang Z., Fan Z., Li X., Xu K., Yu R. Measurement of magnetic and magnetostrictive characteristics of transformer core based on triaxial strain gauge and B-H vector sensor. *Sensors.* 2023;23(13):5926. http://doi.org/10.3390/s23135926
7. Pszcaola J., Cetnar T. Measurements of huge magnetostriction of the heavy rare earth – iron intermetallics. *Physics for Economy*. 2021;4:65–74.
8. Wang W., Liu H., Huang R., Zhao Y., Huang C., Guo S., Shan Y., Li L. Thermal expansion and magnetostriction measurements using the Strain Gauge Method. *Front. Chem.* 2018;6:72. https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00072
9. Iwakami O., Kawata N., Takeshita M., Yao Y., Abe S., Matsumoto K. Thermal expansion and magnetostriction measurements using a Quantum Design Physical Property Measurement System. *J. Phys.: Conf. Ser*. 2014;568(3):032002. https://doi.org/10.1088/1742-6596/568/3/032002
10. Kundys B., Bukhantsev Y., Vasiliev S., Kundys D., Berkowski M., Dyakonov V.P. Three terminal capacitance technique for magnetostriction and thermal expansion measurements. *Rev. Sci. Instrum.* 2004;75(6):2192–2196. https://doi.org/10.1063/1.1753088
11. Miyake A., Mitamura H., Kawachi S., Kimura K., Kimura T., Kihara T., Tachibana M., Tokunaga M. Capacitive detection of magnetostriction, dielectric constant, and magneto-caloric effects in pulsed magnetic fields. *Rev. Sci. Instrum*. 2020;91:105103. https://doi.org/10.1063/5.0010753
12. Tam A.C., Schroeder H. A new high-precision optical technique to measure magnetostriction of a thin magnetic film deposited on a substrate. *IEEE Trans. Magnetic*. 1989;25(3):2629–2638. https://doi.org/10.1109/20.24502
13. Samata H., Nagata Y., Uchida T., Abe S. New optical technique for bulk magnetostriction measurement. *J. Magn. Magn. Mater*. 2000;212(3):355–360. https://doi.org/10.1016/S0304-8853(99)00832-X
14. Hrabovska K., Zivotsky O., Rojicek J., Fusek M., Mares V., Jirakova Y. Surface magnetostriction of FeCoB amorphous ribbons analyzed using magneto-optical Kerr microscopy. *Materials*. 2020;13(2):257. https://doi.org/10.3390/ma13020257
15. Poore M., Kesterson K. Measuring the thermal expansion of solids with strain gauges. *J. Test. Eval*. 1978;6(2):98–102. https://doi.org/10.1520/JTE10926J
16. Khan M.A., Dumstorff G., Winkilmann C., Lang W. Investigation on noise level in AC- and DC-bridge circuits for sensor measurement systems. In: *18th GMA / ITG Conf. Sensors and Meas. Systems*. 2016. P. 601–605. http://doi.org/10.5162/sensoren2016/P4.4
17. Chashin D.V., Burdin D.A., Fetisov L.Y., Economov N.A., Fetisov Y.K. Precise measurement of magnetostriction of ferromagnetic plates. *J. Sib. Fed. Univ. Math. Phys*. 2018;11(1):30–34. https://doi.org/10.17516/1997-1397-2018-11-1-30-34
18. Nyquist H. Thermal Agitation of Electric Charge in Conductors. *Phys. Rev.* 1928;32:110–113. https://doi.org/10.1103/PhysRev.32.110
19. Hooge F.N. 1/f noise is no surface effect. *Phys. Lett. A.* 1969;29(3):139–140. https://doi.org/10.1016/0375-9601(69)90076-0
20. Voss R.F., Clarke J. Flicker (1/f) noise: equilibrium temperature and resistance fluctuations. *Phys. Rev. B*. 1976;13(2):556–573. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.13.556
21. Walter D., Bulau A., Zimmermann A. Review on excess noise measurements of resistors. *Sensors*. 2023;23(3):1107. https://doi.org/10.3390/s23031107

Об авторе

Бурдин Дмитрий Алексеевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, НОЦ «Магнитоэлектрические материалы и устройства», ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: phantastic@mail.ru. ResearcherID N-9597-2016, SPIN-код РИНЦ 8152-3011, https://orcid.org/0000-0002-2648-0511

About the Author

Dmitry A. Burdin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Scientific and Educational Center "Magnetoelectric Materials and Devices," MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: phantastic@mail.ru. ResearcherID N-9597-2016, RSCI SPIN-code 8152-3011, https://orcid.org/0000-0002-2648-0511