

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ПРИМЕРЕ ИНВАРА 44НХТЮ

Е.С. Долгих

dolgikh.e@sch2009.net

Е.Т. Капитанский

kapitanskij.e@sch2009.net

О.М. Лаврушин

lavrushin.o@sch2009.net

П.В. Шпильковский

shpilkovskiy.p@sch2009.net

Инженерно-физическая метрологическая лаборатория ГБОУ «Школа № 2009»,  
Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Приведены экспериментальные материалы, полученные при изучении поведения ферромагнетиков при динамической деформации. Это позволило использовать преобразователи, конструктивно сходные с магнитоупругими, для измерения динамических нагрузок. Экспериментально подтверждено обнаружение нового физического эффекта, заключающегося в генерации дополнительной ЭДС в обмотке магнитоупругого преобразователя при динамической деформации его магнитопровода. Исследование поведения ферромагнетика при динамической деформации, а также изучение режимов динамической стабилизации ферромагнетиков позволило выяснить причину, не позволявшую ранее использовать преобразователи магнитоупругого типа для измерения динамических и в том числе ударных нагрузок, а также предложить способ решения этой проблемы.

### Ключевые слова

Метрология, лабораторные исследования, динамическая деформация, ферромагнетизм, ферромагнетик, магнитоупругий преобразователь, магнитодинамическая стабилизация, вихретоковая поляризация

Поступила в редакцию 02.06.2023

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

---

**Введение.** Изучение поведения ферромагнетиков при динамических деформациях активно началось в 1990-х годах. Этой теме было посвящено множество работ, например, [1–4]. Однако эти исследования не получили дальнейшего развития. Было решено силами Инженерно-физической метрологической лаборатории ГБОУ «Школа № 2009» экспериментально исследовать поведение ферромагнетиков для изучения самого эффекта ферромагнетизма и его прикладного применения, оценки возможности создания датчика динамических нагрузок, конструктивно сходных с магнитоупругими преобразователями (МУП). Актуальность этих работ становится очевидной по мере восстановления интереса к экспериментальной физике быстропротекающих процессов.

Как известно, МУП используются для регистрации квазистатических нагрузок [5–7]. В магнитопроводе МУП, который одновременно является его чув-

ствительным элементом (ЧЭ), с помощью первичной обмотки, подключенной к источнику переменного тока, создается переменный магнитный поток. Нагрузка, прикладываемая к ЧЭ, за счет магнитоупругого эффекта изменяет его магнитную проницаемость и, соответственно, амплитуду наведенного магнитного потока. Во вторичной обмотке, в соответствии с законом Фарадея, генерируется ЭДС с амплитудой, пропорциональной изменению магнитной проницаемости и, соответственно, приложенной нагрузке. Но такие преобразователи не годились для измерения динамических нагрузок, скорость изменения которых была хотя бы сравнима с частотой тока подмагничивания. При использовании постоянного тока подмагничивания, в свою очередь, не удавалось получить стабильную и приемлемую чувствительность преобразователя.

Автор работ [1, 2] утверждал, что эта проблема, тем не менее, решаема, и описывал необходимые для этого технические процедуры и их теоретическое обоснование.

**Базовые эксперименты.** Было решено восстановить и продолжить процесс изучения поведения ферромагнетиков при динамических деформациях, включая прикладное применение полученных знаний, в Инженерно-физической метрологической лаборатории ГБОУ «Школа № 2009».

Для выполнения экспериментальных работ были подготовлены:

а) генератор ударной нагрузки: вертикальный копер — установка, позволяющая создать ударную нагрузку малой энергии с большой степенью повторяемости;

б) прецизионный источник тока;

в) комплекс аппаратуры, позволяющий регистрировать аналоговый сигнал.

Для экспериментальных работ был изготовлен преобразователь (датчик) трехосного типа (рис. 1).



Рис. 1. Корпус датчика

Основной элемент датчика — монолитный корпус (магнитопровод), выполненный из инвара 44НХТЮ. Верхний и нижний торец датчика имеют вид фланцев. С помощью нижнего фланца датчик крепится к массивному основанию копра, с помощью верхнего соединяется с силоформирующим элементом монтажной обвязки. Как показано на рис. 1, в корпусе было просверлено три пары отверстий таким образом, что размещенные в них обмотки располагаются во взаимно перпендикулярных плоскостях, при этом площади контура всех обмоток равны. В одной из выбранных пар отверстий корпусе датчика размещались две обмотки. Первая обмотка  $L_1$  предназначена для создания в магнитопроводе управляемого с помощью прецизионного источника постоянного тока магнитного потока, вторая обмотка  $L_2$  служит для регистрации полезного сигнала. Схема коммутации обмоток датчика, источника питания и регистратора приведена на рис. 2.

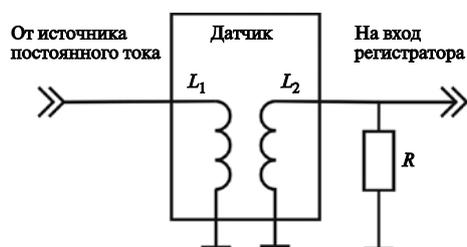


Рис. 2. Схема подключения обмоток преобразователя

Эксперимент проводили в следующем порядке. После очередной смены номинала подмагничивающего тока  $I_n$  в обмотке  $L_1$  и соответствующего изменения магнитного состояния магнитопровода, осуществляли ударную стабилизацию магнитопровода. Далее выполняли удар падающей сборки по МУП (сброс одинаковой массы с одинаковой высоты) с осуществлением регистрации электрического сигнала  $U(t)$ , генерируемого в обмотке  $L_2$ . Осциллограмма удара в виде скриншота с экрана осциллографа приведена на рис. 3.

По осциллограмме определяли пиковое значение  $U_m$  электрического сигнала  $U(t)$ . Затем на графике рис. 4 откладывали точку, имеющую координатами: по горизонтали — значение подмагничивающего тока  $I_n$ , при котором выполнялась эта регистрация, а по вертикали — пиковое значение сигнала  $U_m$ . Далее точки соединяли в соответствии с последовательностью их получения. Получалась графическая фигура, сходная с петлей гистерезиса (ПГ).

С одной стороны, полученная зависимость  $U_m(I_n)$  — назовем ее магнитодинамической зависимостью (МДЗ) — имеет сходство с петлей гистерезиса (ПГ), поскольку ток подмагничивания  $I_n$  функционально связан с напряженностью магнитного поля  $H$  в ферромагнетике, а электрическое напряжение  $U$  связано с магнитной индукцией  $B$ . Но все же МДЗ полным аналогом ПГ не является.

С другой стороны, поскольку ударная нагрузка, применяемая в ходе эксперимента, постоянна, то зависимость  $U_m(I_n)$ , полученную при одинаковой нагрузке, можно считать зависимостью чувствительности рассматриваемого физического преобразователя от тока подмагничивания.

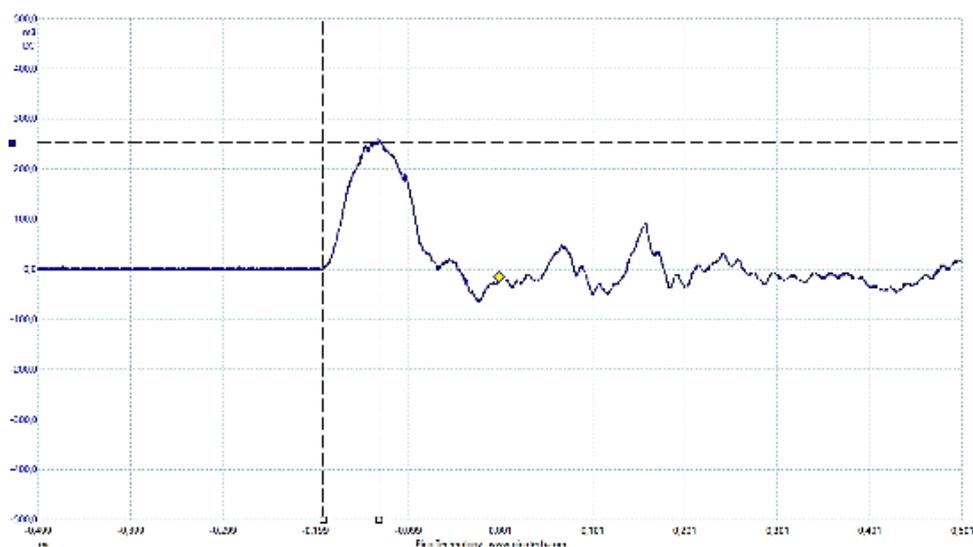


Рис. 3. Осциллограмма ударного процесса (скриншот с экрана осциллографа)

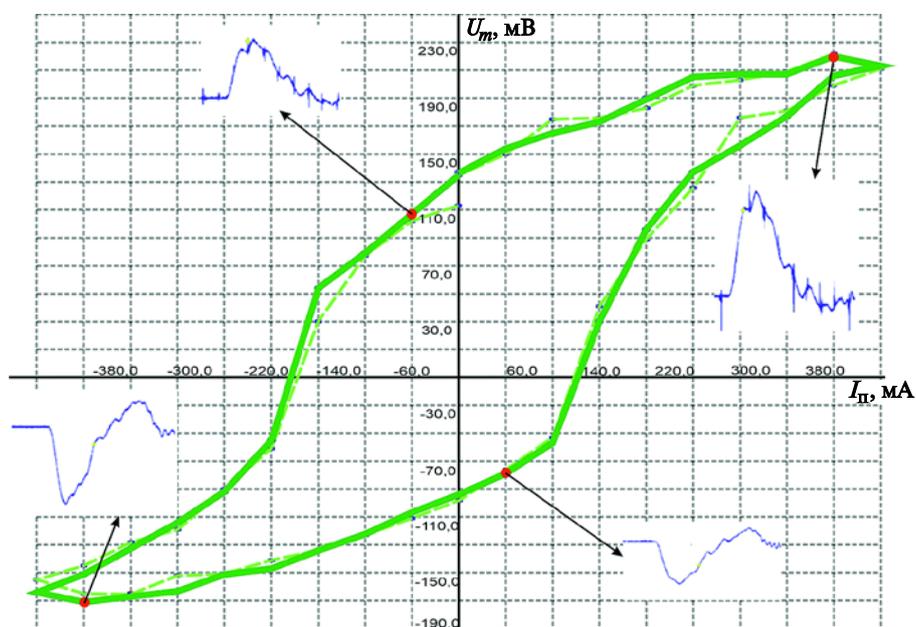
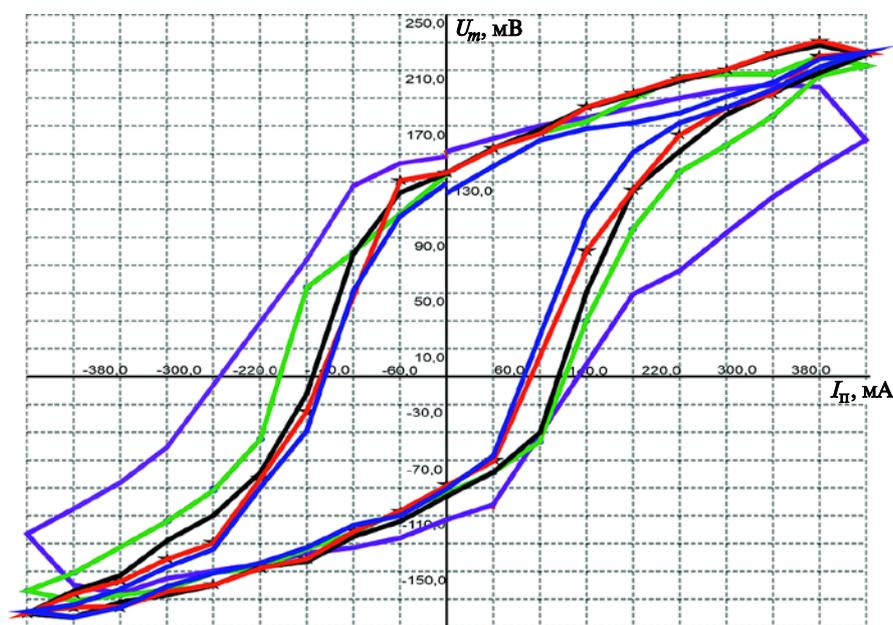


Рис. 4. График  $U_m(I_n)$  зависимости пикового значения электрического сигнала  $U(t)$  от тока подмагничивания  $I_n$  (в поле графика размещены скриншоты осциллограмм сигналов, соответствующие выделенным пиковым значениям  $U_m$  этих сигналов)

Известно, что при росте напряженности внешнего магнитного поля магнитные домены с благоприятной магнитной ориентацией увеличиваются, с неблагоприятной — уменьшаются. Это происходит в результате смещения междоменной стенки. Подвижность междоменной стенки ограничивается наличием различных дефектов в кристаллической решетке ферромагнетиков, в том числе дислокаций, примесных атомов и т. д. На этих дефектах междоменная стенка «застревает», и соотношение благоприятных и неблагоприятных доменов уже не соответствует термодинамическому равновесию. Для смещения междоменной стенки требуется большая энергия, поэтому количество и структура дефектов решетки и формирует тип ПГ (магнитотвердый — с широкой ПГ или магнитомягкий — с узкой ПГ). Но ударная или вибрационная нагрузка, приложенная к ферромагнетика, дает дополнительную энергию междоменной стенке, повышая ее подвижность и смещая в сторону энергетически более выгодного соотношения доменных фаз.

На рис. 4 видна особенность МДЗ — смещение по вертикали ее центра симметрии. Эта МДЗ была получена при 5 ударах стабилизации после смены  $I_{п}$ . Следует проверить, сохранится ли это смещение, если число ударов стабилизации будет другим. На рис. 5 приведены МДЗ, полученные при других вариантах ударной стабилизации: 0, 5, 10, 20, 50 ударов. При этом то же значение смещения с точностью эксперимента сохраняется и на других МДЗ.



**Рис. 5.** МДЗ, полученные при разных вариантах динамической стабилизации магнитопровода (фиолетовым цветом обозначена МДЗ, полученная без стабилизации, зеленым — со стабилизацией в 5 ударов, черным — со стабилизацией в 10 ударов, красным — со стабилизацией в 20 ударов, синим — со стабилизацией в 50 ударов)

На рис. 5 видно, что длительность ударной стабилизации, способствуя смещению междоменных стенок в сторону более выгодного соотношения доменных фаз, влияет на динамическую зависимость  $U_m(I_{\Pi})$ , а значит, на магнитное состояние ферромагнетика. Очевидно, что интенсивность, продолжительность и частотная характеристика ударно-вибрационной нагрузки — это факторы, влияющие на смещение междоменной стенки.

На всех МДЗ  $U_m(I_{\Pi})$  сохраняется смещение по вертикали, и ее центр симметрии находится не в точке с координатами (0; 0), как обычная петля гистерезиса, а в точке (0;  $U_{см}$ ). По процедуре, описанной в статье [1], было определено значение  $U_{см}$ . Для выбранных условий соударения (нагрузки)  $U_{см}$  имела значение 28...32 мВ. Пояснить причину этого смещения можно с помощью рис. 6.

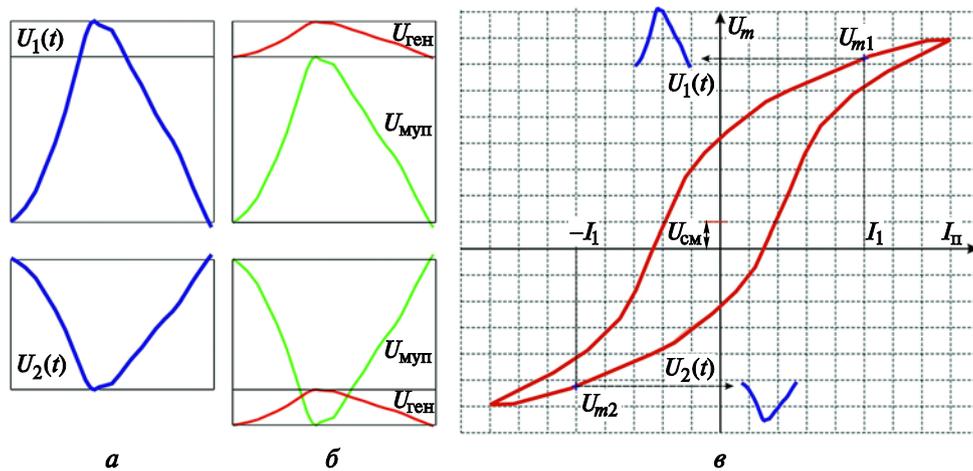


Рис. 6. Пояснение к эффекту смещения МДЗ  $U_m(I_{\Pi})$  по вертикали:

*a* — полные сигналы  $U_1(t)$  и  $U_2(t)$ , полученные при одинаковой по модулю, но разной по знаку величине  $I_{\Pi}$ ; *б* — магнитоупругая  $U_{муп}$  и генераторная  $U_{ген}$  составляющие сигнала складываются или вычитаются в зависимости от знака магнитоупругой составляющей сигнала; *в* — МДЗ в результате смещается по вертикали на значение генераторной составляющей сигнала; в поле графика МДЗ синим цветом показаны соответствующие образы полного сигнала

Согласно рис. 6 можно предположить, что при динамической деформации ферромагнетика одновременно срабатывают два независимых механизма, приводящих к возникновению двух составляющих ЭДС. Первая составляющая ЭДС наводится в обмотке в соответствии с магнитоупругим эффектом и законом Фарадея, назовем ее магнитоупругой составляющей ЭДС  $U_{муп}(t)$ . Модуль и знак этой составляющей, помимо ударной нагрузки, зависит от модуля и знака  $I_{\Pi}$ , а сама зависимость  $U_{муп}(I_{\Pi})$  симметрична относительно начала координат. Вторая составляющая ЭДС  $U_{ген}(t)$ , по-видимому, не зависит от магнитного состояния магнитопровода, а определяется только ударной нагрузкой и при неизменной нагрузке всегда дает одну и ту же прибавку к общему сигналу при любом значении  $I_{\Pi}$ .

Как видно на рис. 6, в точке  $U_{m1}$  обе ЭДС, имея одинаковый знак, складываются, а в точке  $U_{m2}$ , будучи уже разнонаправленными, вычитаются. Магнитоупругая составляющая ЭДС определяет форму зависимости  $U_m(I_n)$  в виде ПГ, генераторная составляющая ЭДС определяет смещение этой зависимости по вертикали.

На основе этих экспериментов и предложенной гипотезы, становится понятна причина, не позволявшая ранее использовать МУП для регистрации динамических нагрузок. Во-первых, для одного значения тока подмагничивания чувствительность преобразователя может находиться в широком диапазоне, поскольку конкретная чувствительность определялась еще и магнитной предысторией. А, во-вторых, из-за наличия генераторной составляющей ЭДС модуль диапазона чувствительности, соответствующего току  $I_1$ , будет не совпадать с модулем диапазона чувствительности, соответствующего току  $-I_1$ , поскольку генераторная ЭДС может совпадать или не совпадать по знаку с магнитоупругой ЭДС. И, соответственно, наличие генераторной составляющей делает преобразователь полярным (рис. 7).

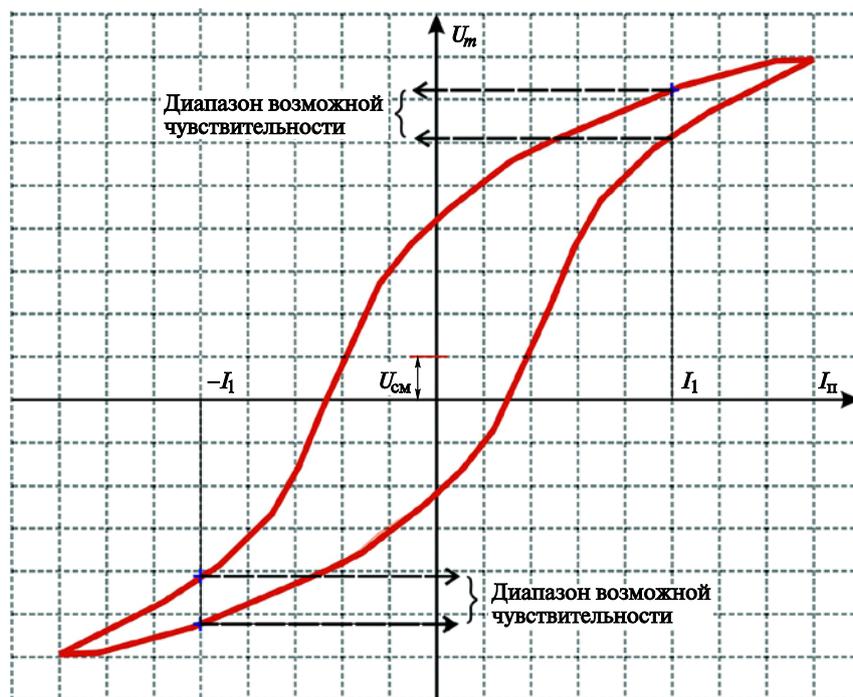


Рис. 7. Пояснение к эффекту нестабильной чувствительности МУП

Проведенные эксперименты не только выявили причины, но и подсказали пути решения. Для того чтобы магнитоупругий преобразователь можно было использовать для измерения динамических нагрузок, следует, во-первых, определить направление смещения МДЗ по вертикали, а во-вторых, разработать ме-

тодику выбора рабочей точки магнитодинамического состояния ферромагнетика и, соответственно, методику его динамической стабилизации.

**Выводы.** Был подготовлен экспериментальный стенд, созданы комплекс технического и измерительного оборудования и экспериментальный образец для проведения исследования поведения ферромагнетиков при динамической деформации и получено подтверждение работоспособности всего стенда и его элементов.

Выполненные работы подтвердили, что имеет место асимметрия в магнитодинамической зависимости  $U_m(I_n)$ , полученной методом динамической деформации ферромагнетика. Это отличие заключается в смещении зависимости  $U_m(I_n)$  по вертикали. В соответствии с предположением о существовании неизвестного ранее свойства ферромагнетиков при их динамической деформации было получено экспериментальное подтверждение этого эффекта для инвара 44НХТЮ.

Выявлена причина, не позволявшая ранее использовать МУП для регистрации динамических нагрузок, и предложены пути ее решения.

## Литература

- [1] Лаврушин М.Ю. Датчики измерений на основе генераторного эффекта в ферромагнетиках. *Приборы*, 2020, № 5 (239), с. 21–27.
- [2] Лаврушин М.Ю. Исследование процессов высокоскоростной деформации контактным датчиком силы. *Инженерно-физические проблемы новой техники. XIV Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием: сб. матер.* Москва, Диона, 2020, с. 56–58.
- [3] Лаврушин М.Ю. Исследование поведения ферромагнетика при динамической деформации на примере инвара 44НХТЮ. *Приборы*, 2022, № 10 (268), с. 54–62.
- [4] Лаврушин М.Ю. Новый прибор для измерения ударной активной силы, конструктивно сходный с магнитоупругими преобразователями. *Приборы*, 2022, № 10 (268), с. 45–53.
- [5] Бауманн Э. *Измерение сил электрическими методами.* Москва, Мир, 1978, 430 с.
- [6] Шишкинский В.И. *Магнитоанизотропные монолитные силоизмерители.* Москва, Машиностроение, 1981, 80 с.
- [7] Харкевич А.А. *Теория преобразователей: избранные труды. В 3 т. Т. 1.* Москва, Наука, 1973, vol. 1, с. 52–217.

**Долгих Евгений Сергеевич** — ученик 10-го А класса ГБОУ «Школа № 2009», Москва, Российская Федерация.

**Капитанский Егор Тимофеевич** — ученик 10А ГБОУ школа 2009, Москва, Российская Федерация.

**Лаврушин Олег Михайлович** — ученик 9-го В класса ГБОУ «Школа № 2009», Москва, Российская Федерация.

**Шпильковский Павел Васильевич** — ученик 11-го А класса, ГБОУ «Школа № 2009», Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Лаврушин Михаил Юрьевич, научный руководитель Инженерно-физической метрологической лаборатории ГБОУ «Школа № 2009», Москва, Российская Федерация.

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Долгих Е.С., Капитанский Е.Т., Лаврушин О.М., Шпильковский П.В. Исследование поведения ферромагнетика при динамической деформации на примере инвара 44НХТЮ. *Политехнический молодежный журнал*, 2023, № 08 (85). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-8-936>

## INVESTIGATION OF THE FERROMAGNET BEHAVIOR EXPOSED TO DYNAMIC DEFORMATION ON THE 44NXTU INVAR EXAMPLE

E.S. Dolgikh

dolgikh.e@sch2009.net

E.T. Kapitanskiy

kapitanskij.e@sch2009.net

O.M. Lavrushin

lavrushin.o@sch2009.net

P.V. Shpilkovskiy

shpilkovskiy.p@sch2009.net

Engineering Physics Metrology Laboratory, SBEI School No. 2009, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

The paper presents experimental materials obtained in studying the ferromagnets behavior exposed to dynamic deformation. The study made it possible to use transducers structurally similar to the magnetoelastic ones to measure the dynamic loads. Discovery of a new physical effect consisting in generation of the additional EMF in the magnetoelastic converter winding at dynamic deformation of its magnetic circuit was experimentally confirmed. Studying the ferromagnet behavior exposed to dynamic deformation, as well as the ferromagnet dynamic stabilization modes, made it possible to clarify the reason that previously did not allow using the magnetoelastic type transducers in measuring dynamic and also the shock loads, as well as to propose an approach to solve this problem.

### Keywords

Metrology, laboratory research, dynamic deformation, ferromagnetism, ferromagnet, magnetoelastic converter, magnetodynamic stabilization, eddy current polarization

Received 02.06.2023

© Bauman Moscow State Technical University, 2023

---

### References

- [1] Lavrushin M.Yu. Measurement sensors based on the generator effect in ferromagnets. *Instruments*, 2020, no. 5 (239), pp. 21–27. (In Russ.).
- [2] Lavrushin M.Yu. Research of processes of high-speed deformation by the contact gauge of force. *Inzhenerno-fizicheskie problemy novoy tekhniki. XIV Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem: sb. mater.* [Engineering-physical problems of new technology. XIV All-Russian scientific and technical conference with international participation: collection of materials]. Moscow, Diona Publ., 2020, pp. 56–58. (In Russ.).
- [3] Lavrushin M.Yu. Investigation of the behavior of a ferromagnet under dynamic deformation on the example of an invar 44NKhTYu. *Instruments*, 2022, no. 10 (268), pp. 54–62. (In Russ.).
- [4] Lavrushin M.Yu. A new device for measuring impact active force, structurally similar to magnetoelastic transducers. *Instruments*, 2022, no. 10 (268), pp. 45–53. (In Russ.).
- [5] Baumann E. *Izmerenie sil elektricheskimi metodami* [Measurement of forces by electrical methods]. Moscow, Mir Publ., 1978, 430 p. (In Russ.).

- [6] Shishkinskiy V.I. *Magnitoanizotropnye monolitnye siloizmeriteli* [Magnetoanisotropic monolithic force meters]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 80 p. (In Russ.).
- [7] Kharkevich A.A. *Teoriya preobrazovateley: izbrannye trudy* [Theory of transducers: selected works]. Moscow, Nauka Publ., 1973, vol. 1, pp. 52–217. (In Russ.).

**Dolgikh E.S.** — Student of the 10<sup>th</sup> A Grade, SBEI School No. 2009, Moscow, Russian Federation.

**Kapitanskiy E.T.** — Student of the 10<sup>th</sup> A Grade, SBEI School No. 2009, Moscow, Russian Federation.

**Lavrushin O.M.** — Student of the 9<sup>th</sup> B Grade, SBEI School No. 2009, Moscow, Russian Federation.

**Shpilkovskiy P.V.** — Student of the 11<sup>th</sup> A Grade, SBEI School No. 2009, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Lavrushin M.Yu., Scientific Director, Engineering Physics Metrology Laboratory, SBEI School No. 2009, Moscow, Russian Federation.

**Please cite this article in English as:**

Dolgikh E.S., Kapitanskiy E.T., Lavrushin O.M., Shpilkovskiy P.V. Investigation of the ferromagnet behavior exposed to dynamic deformation on the 44NXTU invar example. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2023, no. 08 (85). (In Russ.).  
<http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-8-936>