

**ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА**

УДК 53.08

**ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ *IN-SITU*
НАМАГНИЧЕННОСТИ, МАГНИТОСТРИКЦИИ И ТЕМПЕРАТУРЫ
МАГНЕТИКОВ В ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ**

**©2026. Н. Ю. Нырков^{а,*}, А. В. Головчан^а, Б. М. Тодрис^а, О. Е. Ковалев^а,
А. В. Шевелева^а, Р. А. Сафонов^а, И. Ф. Грибанов^а, А. П. Каманцев^{а,б}**

^а *Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина*

Россия, 283048, Донецк, ул. Р. Люксембург, 72

^б *Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук*

Россия, 125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7

**E-mail: nyrkovng@yandex.ru*

Поступила в редакцию 31.03.2026

После доработки 17.04.2026

Принята к публикации 04.05.2026

Представлено описание лабораторной установки импульсного магнитометра для комплексного исследования магнитоструктурных фазовых переходов в функциональных магнитных материалах. Установка предназначен для одновременного измерения *in-situ* намагниченности, магнитострикции и температуры образца магнетика в импульсных магнитных полях до 15 Тл с частотой дискретизации до 1 МГц. Магнитное поле создается разрядом конденсаторной батареи на соленоид через тиристорный ключ. Намагниченность измеряется индукционным методом с использованием системы встречно включенных измерительной и компенсационной катушек. Температура контролируется закрепленной на образце дифференциальной микротермопарой. Приведены конструктивные особенности основных узлов – генератора импульсов, соленоида и измерительной системы. Даны технические характеристики установки и результаты тестовых измерений.

Ключевые слова: импульсное магнитное поле, магнитострикция, намагниченность, фазовые переходы, компенсационная катушка, тензодатчик.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование функциональных материалов с магнитными и магнитоструктурными фазовыми переходами (ФП) требует детального изучения их отклика на внешние воздействия, прежде всего на магнитное поле [1–5]. Ключевыми взаимосвязанными параметрами,

характеризующими такие ФП, являются намагниченность M , магнитострикция λ и температура T . Их одновременное и синхронное измерение в условиях быстроменяющегося сильного магнитного поля представляет собой актуальную экспериментальную задачу, позволяющую получить уникальную информацию о кинетике ФП, термомагнитных эффектах и магнитоупругом взаимодействии [2, 6–8, 9].

Для достижения полей, необходимых для индуцирования ФП (~ 10 Тл и выше), в лабораторной практике наиболее распространены импульсные методы [9–12]. Они основаны на разряде накопленной в конденсаторной батарее энергии через соленоид, что позволяет получать поля в десятки тесла с длительностью в десятки миллисекунд. Развитие технологий создания соленоидов (специальные композитные провода, бандаж, многосекционные системы) и мощных ключевых элементов привело к появлению надежных неразрушающих систем, генерирующих поля до 100 Тл [13–20]. Однако эффективное использование таких установок для комплексной диагностики материалов требует решения ряда сопутствующих экспериментальных задач.

Основные трудности связаны с организацией одновременного измерения нескольких физических характеристик материала в условиях сильного импульсного поля (СИМП). Во-первых, измерительные цепи подвержены сильным паразитным наводкам от быстроизменяющегося магнитного потока. Это особенно критично для измерений слабых сигналов, таких как напряжение с тензодатчиков или термопар. Во-вторых, необходимо обеспечить высокую степень синхронизации и идентичную полосу пропускания для всех измерительных каналов (магнитных, тензометрических, температурных), чтобы корректно сопоставлять их во временной области. В-третьих, сами измерительные датчики должны быть компактными, интегрироваться непосредственно в зону однородного поля соленоида и выдерживать механические нагрузки [7, 11]. Таким образом, создание измерительного комплекса для импульсного магнитометра является самостоятельной инженерной задачей, тесно связанной с конструкцией генератора поля.

В настоящей работе представлена лабораторная установка, созданная на основе хорошо зарекомендовавших себя схемотехнических и конструктивных решений. Установка позволяет проводить одновременные измерения *in-situ* намагниченности, магнитострикции и температуры образца в импульсных магнитных полях до 15 Тл с частотой дискретизации сигнала до 1 МГц. Генератор магнитного поля построен по классической схеме разряда конденсаторной батареи через тиристорный ключ на соленоид. Для измерения

намагниченности использована компенсационная схема на основе встречно включенных измерительной и компенсационной катушек. В дальнейшем планируется расширить возможности установки вставкой для измерения магнитострикции, что позволит одновременно измерять основные параметры образца: намагниченность, температуру и магнитострикцию. Магнитострикцию предполагается регистрировать с помощью мостовой схемы на тензодатчиках.

2. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТОМЕТРА

Общая принципиальная схема импульсного магнитометра приведена на рис.1.

Рис. 1. Принципиальная схема импульсного магнитометра...

Импульсное магнитное поле в установке формируется при разряде предварительно заряженной конденсаторной батареи C_6 (до напряжения U_3) через тиристорный ключ (ТР) на соленоид 1. Параметры импульса поля контролируются по току разряда: на силовых шинах размещен пояс Роговского (ПР), сигнал которого после интегрирования пропорционален магнитному полю, создаваемому соленоидом. Отклик образца регистрируется индукционным методом с использованием измерительной системы 2, выполненной в виде цилиндрических катушек, намотанных вплотную к исследуемому образцу 3. Индуцируемая в катушках ЭДС пропорциональна производной магнитного момента образца. Для одновременного контроля сопутствующих эффектов на образце размещены микротермопара 4, регистрирующая изменение температуры при воздействии магнитного поля, и тензодатчик 5, предназначенный для измерения изменения линейных размеров образца в момент импульса магнитного поля.

Параметры импульсного магнитометра приведены в таб. 1.

Таблица 1. Параметры импульсного магнитометра

Параметр	Значение
Создаваемое магнитное поле, Тл	0.1–15
Рабочий диапазон температур, К	77–375
Внутренний диаметр соленоида, мм	9
Внутренний диаметр под образец с учетом измерительной вставки, мм	6.5

Принципиальная схема генератора СИМП приведена на рис. 2.

Рис. 2. Принципиальная схема генератора СИМП ...

Генератор СИМП предназначен для создания магнитного поля с индукцией до 15 Тл и длительностью 2–100 мс. Предельная величина магнитного поля определяется емкостью конденсаторной батареи и конструкцией соленоида. Форма импульса магнитного поля соответствует периодическому затухающему разряду конденсаторной батареи $C_6=6.3$ мФ в цепи, состоящей из соленоида и активного сопротивления. Последнее включает в себя сопротивления соединительных проводников, открытого ключевого элемента и обкладок конденсаторной батареи.

Энергия, накопленная при зарядке конденсаторной батареи до максимального напряжения, равного 600 В, достигает 1.1 кДж. В процессе генерации СИМП необходимо обеспечить преобразование большей ее части в энергию магнитного поля. При этом величина импульса разрядного тока может достигать 10 кА, что требует малых эффективных значений активных сопротивлений в разрядной цепи. Удобным ключевым элементом в таком случае является полупроводниковый разрядник на основе тиристоров, который обеспечивает удовлетворительные параметры разрядной цепи при высокой надежности и долговечности.

СУЗ коммутирует ток в первичной обмотке высоковольтного трансформатора T_1 с помощью силовых цепей управления зарядом СЦУЗ (рис. 2). Величина тока в первичной обмотке T_1 , а с ним и скорость заряда батареи C_6 стабилизируется балластным резистором EL_1 .

После перехода генератора в режим ожидания становится возможным быстрый разряд конденсаторной батареи C_6 в соленоид L_c через полупроводниковый разрядник на тиристорах VS_1 – VS_2 . Этот процесс инициируется вручную с панели управления, либо импульсом запуска с внешних устройств. Контроль этих процессов осуществляется схемой управления разрядом СУР, входящей в состав БУ. Данная схема через силовые цепи управления блоком реле СЦУБР включает реле P_1 , которое отсоединяет цепи заряда батареи C_6 на время разряда (рис. 2). После этого формирователь импульса включения тиристорного разрядника ФИ подает мощный отпирающий импульс на тиристоры VS_1 – VS_2 и происходит разряд батареи C_6 в соленоид L_c .

Для рассеивания накопленной в батарее C_6 энергии при отказе от ее использования в генераторе предусмотрен балластный резистор R_6 , который коммутируется реле P_2 .

3. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ИМПУЛЬСНОГО СОЛЕНОИДА И ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Устройство соленоида с измерительной системой изображено на рис. 3.

Рис. 3. Конструкция соленоида с измерительной системой ...

В качестве источника импульсного магнитного поля используется соленоид 3, вместе с системой измерительных катушек 4 и образцом 5. Соленоид имеет следующие параметры: внутренний диаметр равен 9 мм, внешний – 25мм и длина – 40мм. Каркас с системой измерительных катушек 4 вставляется в оснастку 3. Для намотки соленоида используется медная полоса прямоугольного сечения ($1.24 \times 0.6 \text{ мм}^2$), полученная прокаткой медного провода диаметром 1мм. Обмотка 1 намотана “в натяг” на напечатанную на фотополимерном DLP-принтере оснастку (рис.4). Каждый слой обмотки пропитывался эпоксидной смолой марки ЭДП. Межслойная электроизоляция выполнена конденсаторной бумагой.

Рис. 4. Оснастки для намотки соленоида, измерительной системы и калибровочной катушки

Для повышения радиальной прочности соленоид после намотки дополнительно укреплялся несколькими слоями капроновой нити 2 (рис. 5).

Рис. 5. Внешний вид соленоида.

Применение при изготовлении оснасток 3D-печати на DLP-принтере позволило добиться повышенной точности изготавливаемых изделий и упростило их производство.

Соленоид состоит из 11 слоев провода, каждый из которых содержит 31 виток. Общее сопротивление соленоида составляет 0.264 Ом, общая индуктивность равна 191.85 мкГн. При разряде на данный соленоид конденсаторной батареи емкостью 6.3 мФ получаем апериодический разряд длительностью 7.5 мс. Пиковое поле при температуре 77К и напряжении разряда 556 В составляет 14.87 Тл (рис. 6).

Рис. 6. График импульса поля при напряжении батареи 556 В.

На рис.7. представлен общий вид импульсного соленоида в сборе с измерительной системой и термостатическим бандажом.

Рис. 7. Общий вид импульсного соленоида в сборе

Регулировка температуры в ходе эксперимента осуществляется с помощью комбинированной системы охлаждения и нагрева. Соленоид помещается в теплоизолированный контейнер, заполненный жидким азотом, что обеспечивает его охлаждение до температуры 77 К. Более точная термостабилизация и нагрев в диапазоне до

375 К проводятся с помощью нагревательного элемента, установленного на алюминиевом тепловом бандаже, закрепленном на корпусе соленоида. Тепловая инерция бандажа способствует сглаживанию локальных температурных колебаний и плавному изменению температуры системы.

Рис. 8. Принципиальный вид устройства измерительной системы...

На рис. 8 показано устройство измерительной системы, которая состоит из измерительной катушки 1, содержащей два слоя провода диаметром 0.04 мм с общим количеством витков, равным 139. Поверх измерительной катушки наматывался бандаж из конденсаторной бумаги, пропитанной эпоксидной смолой ЭДП. Далее на бандаж наматывался основной слой компенсационной катушки. Количество витков в ней рассчитывалось следующим образом:

$$W_1' S_1' + W_1'' S_1'' = W_2 S_2$$

где W_1' – количество витков в первом слое измерительной катушки, W_1'' – количество витков во втором слое измерительной катушки, W_2 – количество витков в компенсационном слое измерительной катушки, S_1' – площадь, занимаемая одним витком первого слоя измерительной катушки, S_1'' – площадь, занимаемая одним витком второго слоя измерительной катушки, S_2 – площадь, занимаемая одним витком компенсационного слоя измерительной катушки.

С небольшим отступом от основной компенсационной катушки, намотаны 10 витков дополнительной компенсации 3, которая необходима для устранения амплитудной раскомпенсации между основными измерительными катушками и основной компенсационной катушкой (рис. 9).

Рис. 9. Общий вид измерительной системы и калибровочной катушки

Принципиальная электрическая схема измерительной системы представлена на рис.10.

Рис. 10. Принципиальная электрическая схема измерительной системы...

Измерительная катушка L_1 встречно включается с основной компенсационной катушкой L_2 . В импульсе магнитного поля при отсутствии образца наводимая в катушках ЭДС компенсируется и на выходе мы видим скомпенсированный сигнал близкий к уровню шумов системы. Если это не выполняется, то через делитель напряжения включается дополнительная компенсирующая катушка L_3 , что позволяет внести дополнительный компенсирующий сигнал. При наличии образца в катушке L_1 импульс СИМП создает в измерительной системе нескомпенсированную ЭДС, которая пропорциональна скорости

изменения намагниченности образца dM/dt . Данный сигнал заводится на блок интегратора для вычисления намагниченности образца. Так же на данный блок заводится сигнал L_4 с пояса Роговского, который пропорционален скорости изменения магнитного поля внутри соленоида dH/dt . После интегрирования сигналы $M(t)$, $H(t)$ и dM/dt заводятся на высокоскоростной АЦП фирмы LCard – E20-10.

Пример измерения намагниченности никеля при температуре 300 К и напряжении разряда 300 В показан на рис. 11. Образцы фиксируются в стандартных контейнерах, внутренний диаметр которых выбирается из значений 1.7, 2.2, 3.2 или 4.5 мм при фиксированной длине 12 мм.

Рис. 11. График намагниченности никеля при разряде 300 В при $T=300\text{K}$

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описана лабораторная установка, позволяющая проводить одновременные измерения намагниченности, магнитострикции и температуры магнетиков в сильных импульсных магнитных полях до 15 Тл. Конструкция установки основана на проверенных технических решениях: генератор поля реализован по классической LC-схеме с тиристорным ключом, для измерения намагниченности использована дифференциальная схема на встречно включенных катушках, магнитострикция регистрируется мостовой схемой с тензодатчиками, а температура контролируется дифференциальной микротермопарой. Применение 3D-печати для изготовления оснасток соленоида и измерительной вставки позволило обеспечить высокую точность и воспроизводимость конструкции.

В соленоиде с внутренним диаметром 9 мм достигнуто максимальное поле 14.87 Тл при напряжении заряда 556 В. Измерительная система демонстрирует высокую степень компенсации “паразитного” сигнала, что обеспечивает чувствительность, достаточную для регистрации намагниченности малых образцов. Компактная конструкция измерительной вставки с тензодатчиками и термопарой позволяет интегрировать ее в рабочий объем соленоида без значительного искажения поля.

Таким образом, разработанная установка представляет собой надежный инструмент для комплексного исследования кинетики магнитных и магнитоупругих фазовых переходов в функциональных материалах. Ее модульная конструкция и использование стандартных компонентов делают ее доступной для воспроизведения в условиях научной лаборатории.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 25-19-00587. <https://rscf.ru/project/25-19-00587/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Завадский Э.А. Вальков В.И.* Магнитные фазовые переходы. Киев: Наукова думка, 1980.
2. *Mejía C.S., Niehoff T., Straßheim M., Bykov E., Skourski Y., Wosnitza J., Gottschall T.* // J. Phys. Energy. 2023. V. 5. P. 034006. <https://doi.org/10.1088/2515-7655/acd47d>
3. *Вальков В.И., Завадский Э.А., Стефановский Е.П.* // Физика и техника высоких давлений. 1992. Т. 2. № 3. С.19.
4. *Tanaka H., Kurita N., Okada M. et al.* // J. Phys. Soc. Jpn. 2014. V. 83. № 10. <https://doi.org/10.7566/JPSJ.83.103701>
5. *Zvezdin A.K.* // Handbook of Magnetic Materials. 1995. V. 9. P. 405. [https://doi.org/10.1016/S1567-2719\(05\)80008-3](https://doi.org/10.1016/S1567-2719(05)80008-3)
6. *Acel M., Manosa Ll., Planes A.* // Handbook of Magnetic Materials. 2011. V. 19. P. 231. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53780-5.00004-1>
7. *Ding X., Chai Y.-S., Balakirev F. et al.* // Rev. Sci. Instrum. 2018. V. 89. P. 085109. <https://doi.org/10.1063/1.5038741>
8. *Algarabel P.A., Moral A., Martin C., Serrate D., Tokarz W.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2006. V.51. P.607. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/51/1/139>
9. *Лагутин А.С., Ожогин В.И.* Сильные импульсные магнитные поля в физическом эксперименте. Москва: Энергоатомиздат, 1988.
10. *Монтгомери Д.* Получение сильных магнитных полей с помощью соленоидов. Магнитные и механические свойства конструкций из обычных и сверхпроводящих материалов. Москва: Мир, 1971.
11. *Кнопфель Г.* Сверхсильные импульсные магнитные поля. Методы генерации и физические эффекты. Москва: Мир, 1972.
12. *Херлах Ф.* Сильные и сверхсильные магнитные поля и их применения. Москва: Мир, 1988.
13. *Кудасов Ю.Б., Макаров И.В., Маслов Д.А. и др.* // ПТЭ. 2015. № 6. С. 78. <https://doi.org/10.7868/S0032816215050092>

14. Сафончик М.О., Шахов М.А. // ПТЭ. 2025. № 4. С. 74.
<https://doi.org/10.7868/S3034564225040102>
15. Ikeda A., Noda K., Shimbori K. et al. // J. Appl. Phys. 2024. V. 136. P. 175902.
<https://doi.org/10.1063/5.0231640>
16. Li L., Lv Y.L., Xiao H.X., Pan Y., Peng T. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2016. V. 26. № 4.
P. 4303204. <https://doi.org/10.1109/TASC.2016.2524522>
17. Zherlitsyn S., Wustmann B., Herrmannsdorfer T., Wosnitza J. // J. Low. Temp. Phys. 2013.
V. 170. P. 447. <https://doi.org/10.1007/s10909-012-0764-7>
18. Peng T., Jiang F., Sun Q.Q., Pan Y., Herlach F., Li L. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2016.
V. 26. № 4. P. 4300504. <https://doi.org/10.1109/TASC.2015.2513366>
19. Bacon J.L., Ammerman C.N., Coe H. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2002. V. 12.
№ 1. P. 695. <https://doi.org/10.1109/TASC.2002.1018496>
20. Li W., Peng T., Liu S. et al. // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2026. V. 36. № 3. P. 4900305.
<https://doi.org/10.1109/TASC.2025.3619459>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис 1.** Принципиальная схема импульсного магнитометра: генератор СИМП – генератор сильного импульсного магнитного поля, СЦУ – силовые цепи управления, БУ – блок управления, БФИ – блок формирования импульса, БП – блок питания, ПР – пояс Роговского, БК – блок компенсации, БИ – блок интегратора, АЦП – аналогово-цифровой преобразователь, 1 – импульсный соленоид, 2 – система измерительных катушек, 3 – образец, 4 – дифференциальная микро-термопара, 5 – тензодатчик
- Рис 2.** Принципиальная схема генератора СИМП: L_c – импульсный соленоид, СЦУЗ – силовые цепи управления зарядом, СЦУБР – силовые цепи управления разрядом, БР – блок реле, БУ – блок управления, СУР – схема управления разрядом, СУЗ – схема управления зарядом, ФИ – формирователь импульса
- Рис. 3.** Конструкция соленоида с измерительной системой: 1 – тело соленоида, 2 – бандаж из капроновой нити, 3 – оснастка для намотки соленоида, 4 – система измерительных катушек, 5 – исследуемый образец
- Рис. 4.** Оснастки для намотки соленоида, измерительной системы и калибровочной катушки
- Рис. 5.** Внешний вид соленоида
- Рис. 6.** График импульса поля при напряжении батареи 556 В
- Рис. 7.** Общий вид импульсного соленоида в сборе
- Рис. 8.** Принципиальный вид устройства измерительной системы: 1 – основная двухслойная измерительная катушка, 2 – основной слой компенсационной катушки, 3 – дополнительная компенсация, 4 – исследуемый образец
- Рис. 9.** Общий вид измерительной системы и калибровочной катушки
- Рис. 10.** Принципиальная электрическая схема измерительной системы: L_1 – основная измерительная катушка, L_2 – основная компенсационная катушка, L_3 – дополнительная компенсация, L_4 – пояс Роговского
- Рис. 11.** График намагниченности никеля при разряде 300 В при $T=300\text{K}$.

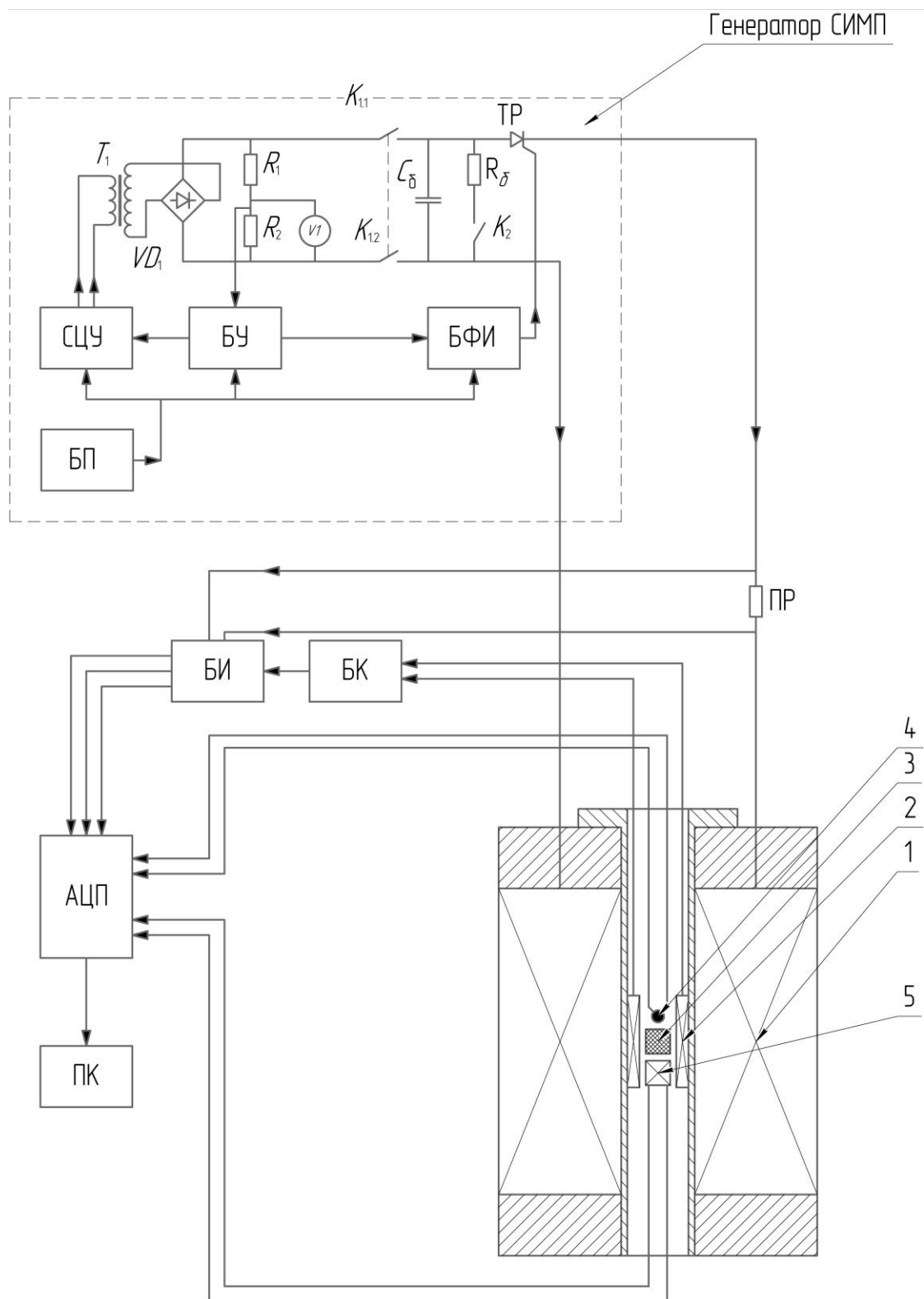


Рис 1.

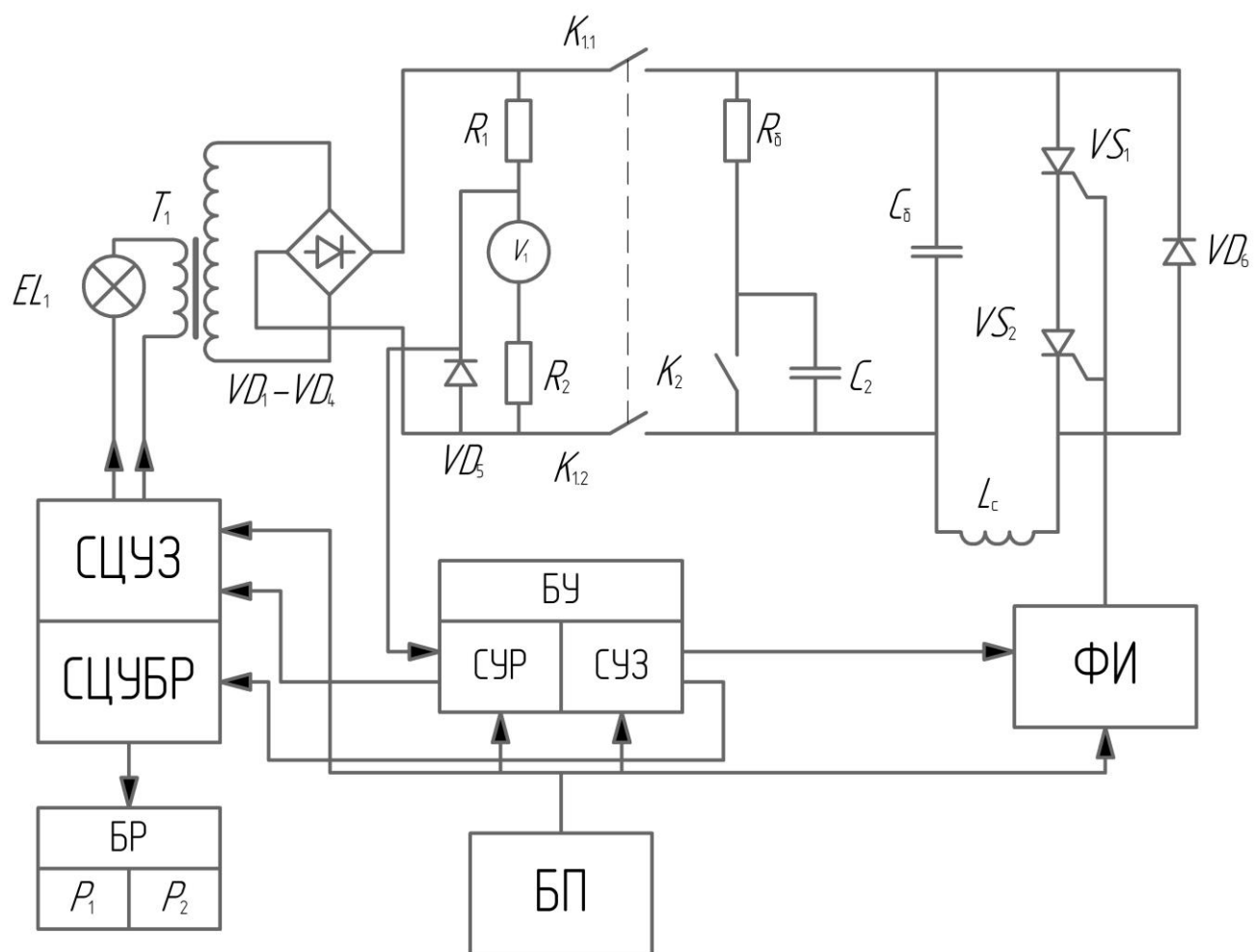


Рис 2.

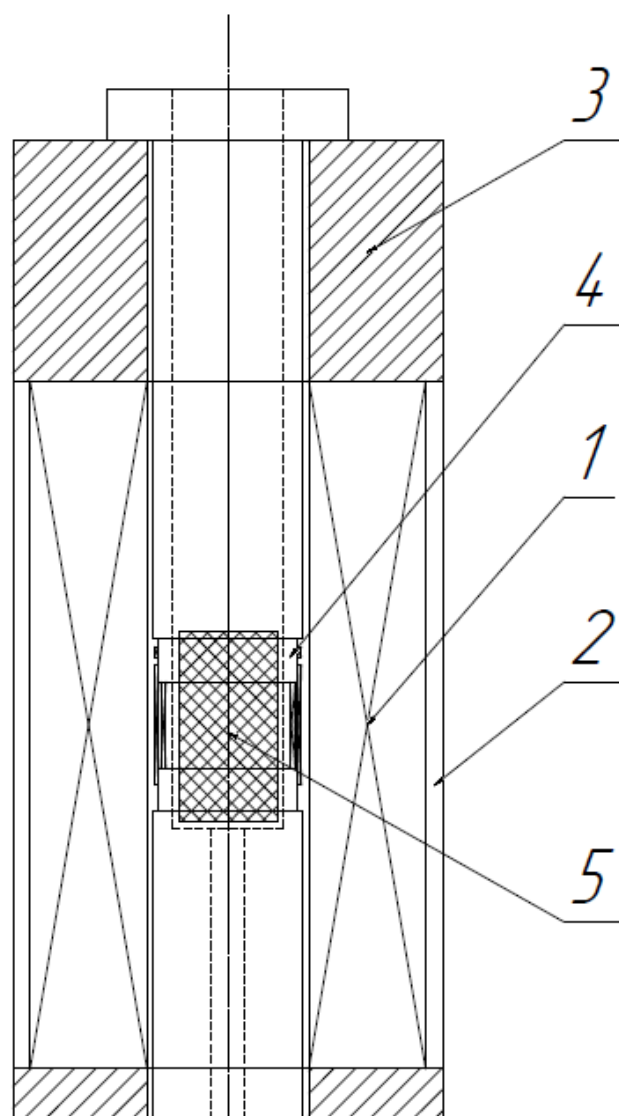


Рис 3.



Рис 4.



Рис 5

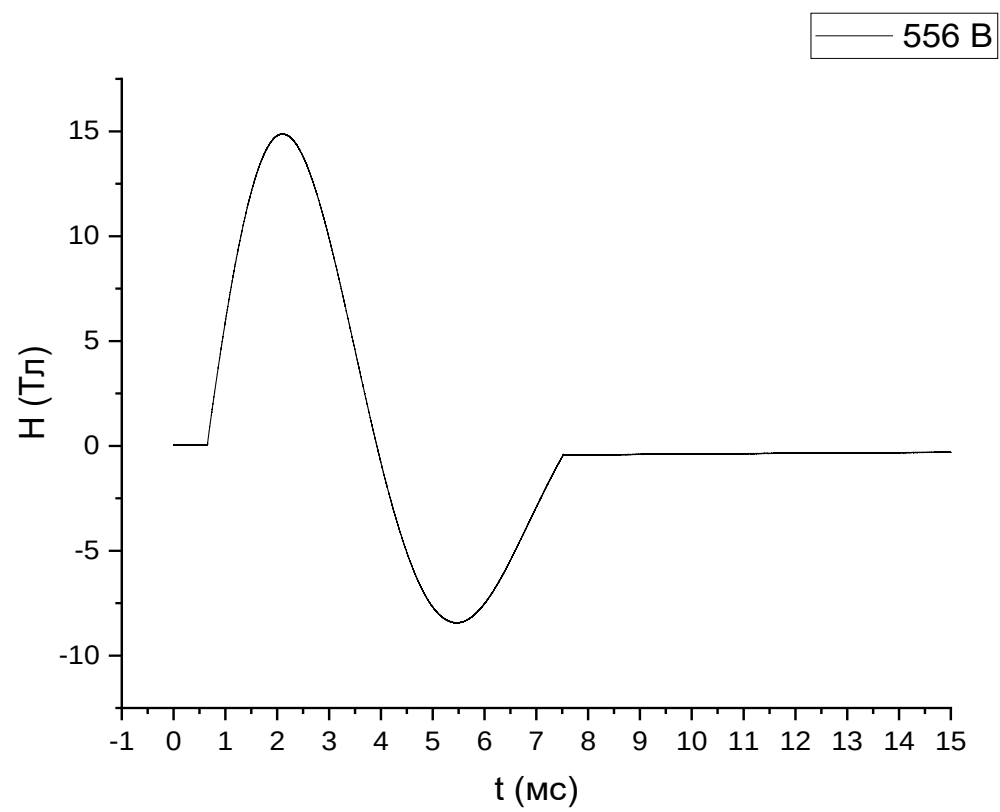


Рис. 6.

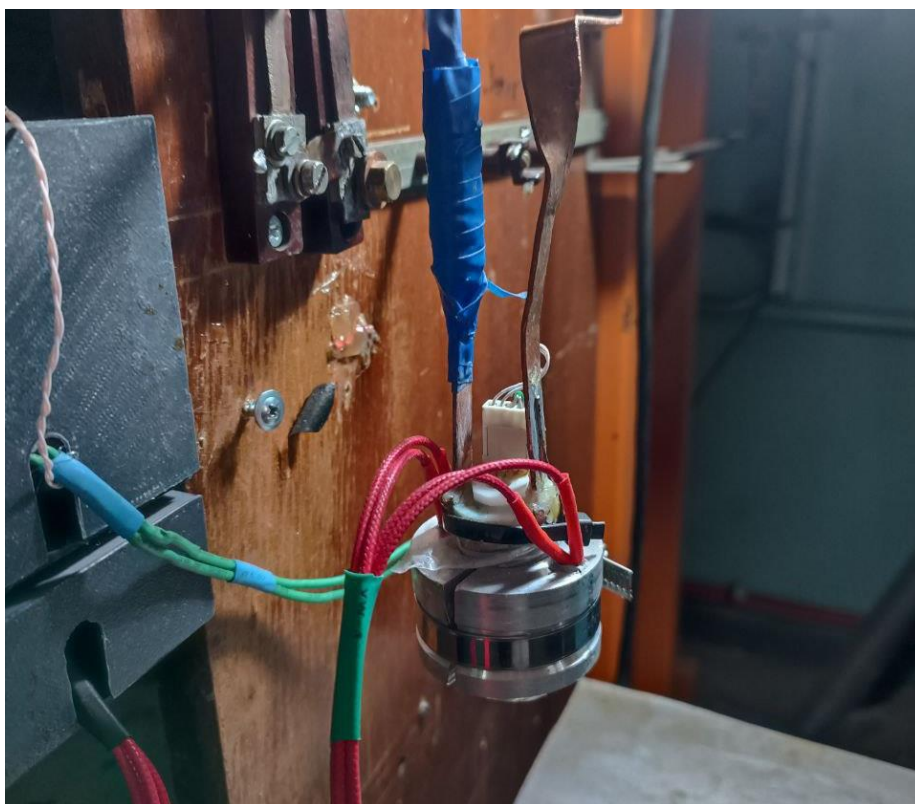


Рис. 7.

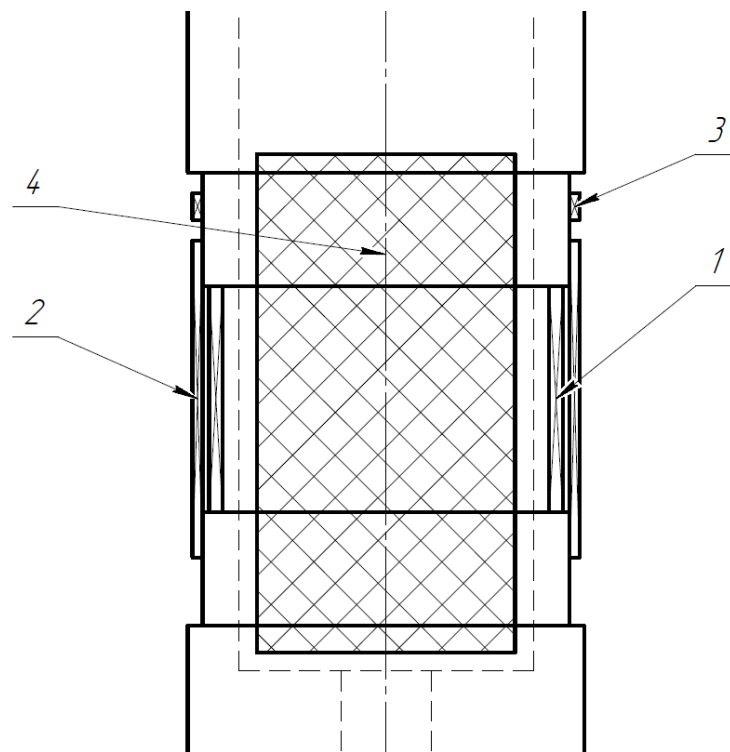


Рис. 8.



Рис. 9.

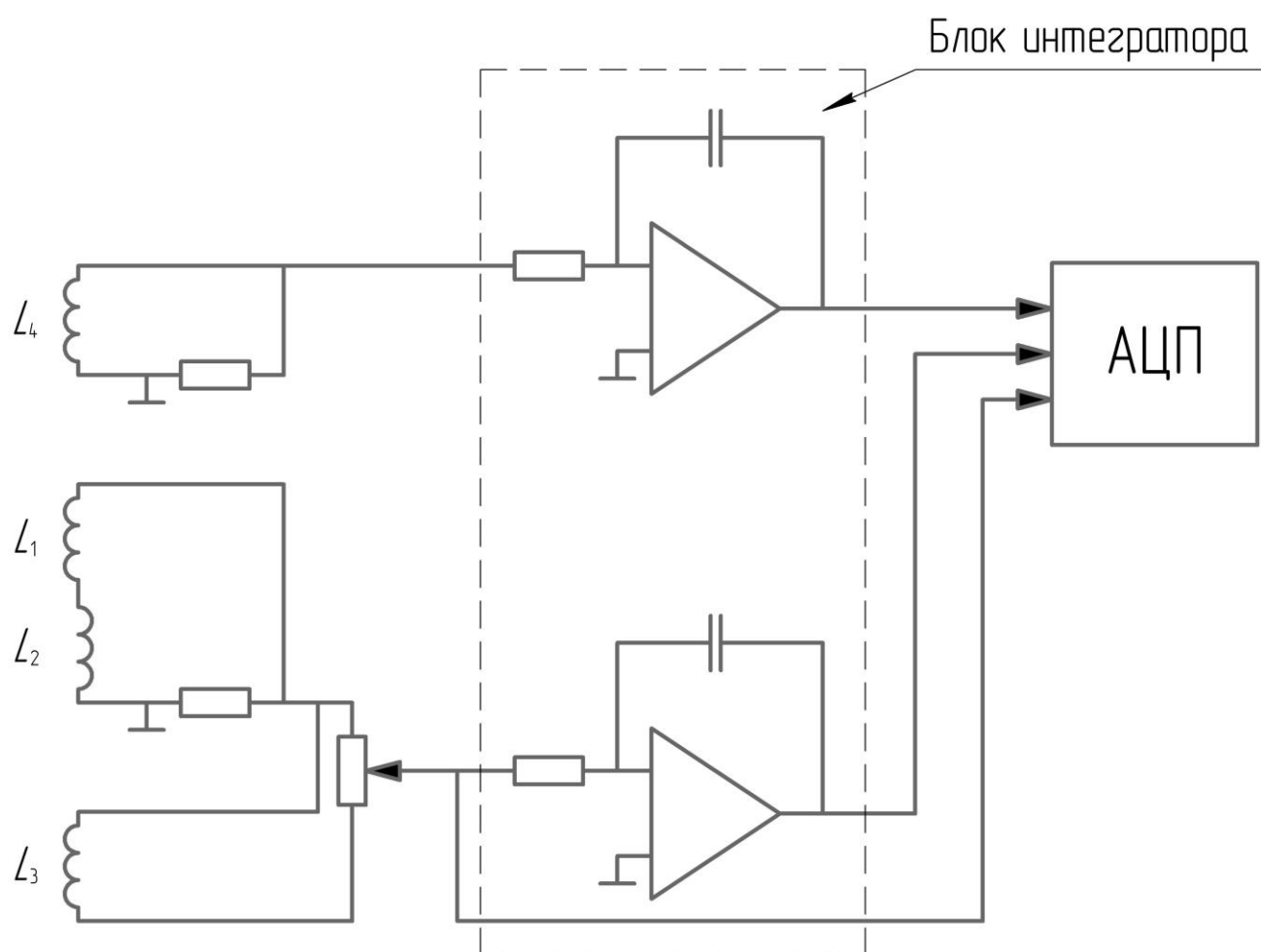


Рис. 10.

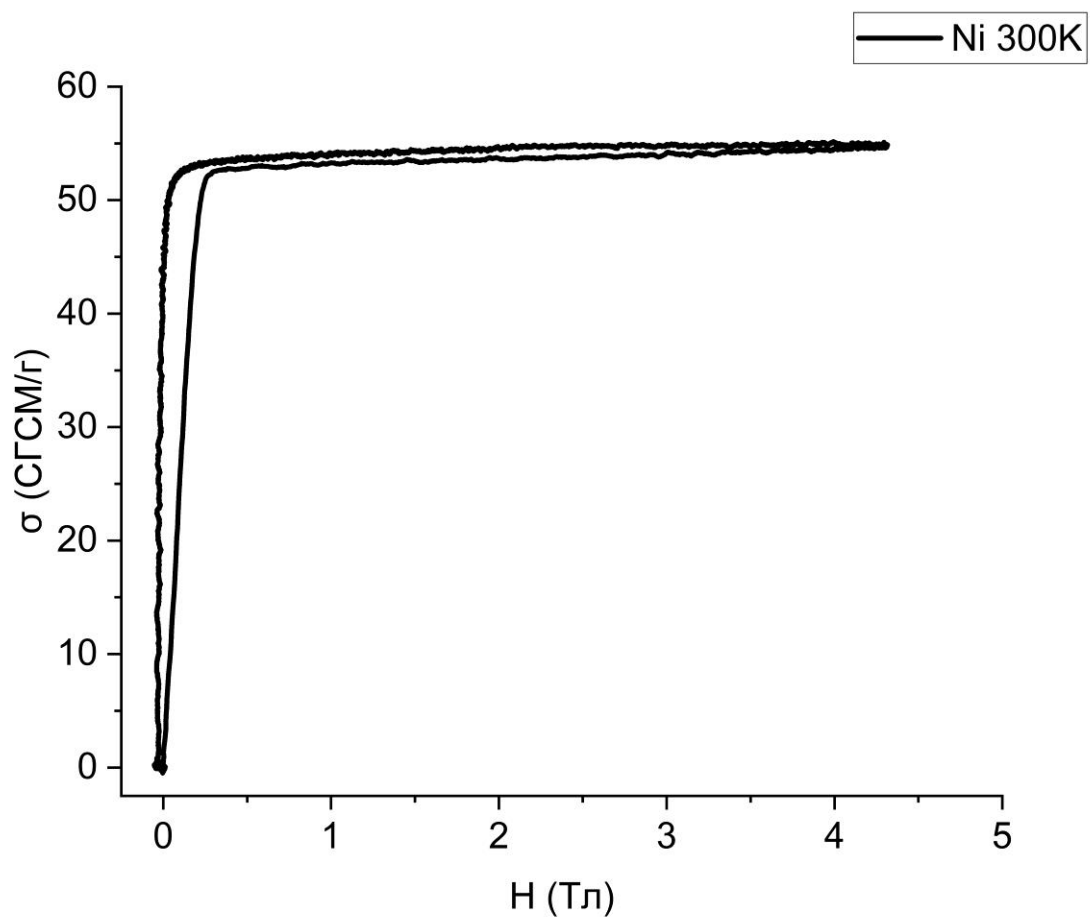


Рис. 11.