

УДК 621.317.444

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВИБРАЦИОННЫЙ МАГНИТОМЕТР С ЭЛЕКТРОМАГНИТОМ КОНСТРУКЦИИ ПУЗЕЯ

Д. А. Великанов

Институт физики им. Л. В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/38
Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: dponal@gmail.com

Описан вибрационный магнитометр, предназначенный для исследования статических магнитных свойств разнообразных твёрдых образцов в магнитных полях до ± 25 кЭ. Источником магнитного поля служит электромагнит конструкции И. М. Пузея. Температура исследуемого образца изменяется в диапазоне 77–370 К с помощью проточного криостата. Магнитные измерения проводятся прямым методом. Механические колебания образца создаются вибратором оригинальной конструкции, относительная нестабильность амплитуды колебаний составляет 10^{-4} , а частоты – 10^{-5} . Регистрация полезного сигнала осуществляется системой из четырёх приёмных катушек. Вибрационный магнитометр позволяет снимать магнитопольевые, температурные и угловые зависимости магнитного момента. Динамический диапазон прибора составляет $5 \cdot 10^{-6}$ –100 Гс·см³.

Ключевые слова: вибрационный магнитометр, электромагнит, вибратор, криостат, магнитный момент, динамический диапазон.

AUTOMATED VIBRATING SAMPLE MAGNETOMETER WITH PUZEY ELECTROMAGNET

D. A. Velikanov

Institute of Physics named after L. V. Kirensky, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch
50/38, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
Siberian Federal University
79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
E-mail: dponal@gmail.com

Vibrating sample magnetometer to study the static magnetic properties of various solid samples in magnetic fields up to ± 25 kOe is described. The source of the magnetic field is an electromagnet designed by I. M. Puzey. The temperature of the investigated sample varies from 77–370 K by flow cryostat. Magnetic measurements were performed by the direct method. Mechanical vibrations of the sample are created by a vibrator of the original design. The relative instability of the oscillation amplitude is 10^{-4} , and frequency – 10^{-5} . Registration of useful signal is carried out by the system consisting of four pickup coils. The vibrating sample magnetometer allows to receive the magnetic-field, temperature and angular dependencies of the magnetic moment. The dynamic range of the device is $5 \cdot 10^{-6}$ –100 emu.

Keywords: vibrating sample magnetometer, electromagnet, vibrator, cryostat, magnetic moment, dynamic range.

Среди различных методов магнитных измерений (рис. 1) метод вибрационного магнитометра, относящийся к индукционному типу, занимает достойное место, уступая по чувствительности лишь СКВИД-магнитометрам (эффект Джозефсона) [1; 2] и магнитометрам, основанным на «оптической накачке» атомов в магнитном поле (эффект Зеемана) [3; 4].

Действительно, СКВИД-магнитометры на сегодняшний день наиболее чувствительные приборы: энергетическое разрешение достигает $5 \cdot 10^{-33}$ Дж/Гц, чувствительность по магнитному полю составляет $\sim 10^{-14}$ Тл, а по магнитному моменту $\sim 10^{-8}$ Гс·см³ (emu). Благодаря этому они находят всё более широкое при-

менение в физическом эксперименте. Тем не менее, эксплуатация СКВИДов сопряжена с существенными неудобствами: прежде всего, их работоспособность всецело зависит от наличия криообеспечения; предъявляются повышенные требования к стабилизации магнитного поля и качеству экранирования как измерительной ячейки, так и самого СКВИДа; необходимо периодически откачивать газы из сосудов Дьюара; высока стоимость получения жидкого гелия.

Что касается магниточувствительных датчиков с оптической накачкой, они весьма удобны с точки зрения эксплуатации, имеют высокую чувствительность, сравнительно небольшие размеры, хорошо ра-

ботаю при комнатных температурах. Правда, существуют некоторые особенности их применения. Так, в частности, для их работы требуется постоянное магнитное поле, величину которого обычно выбирают сравнимой с величиной геомагнитного поля Земли. Магнитометры на эффекте Зеемана оптимальны при изучении топологии магнитных полей и решении сопряжённых с этим задач.

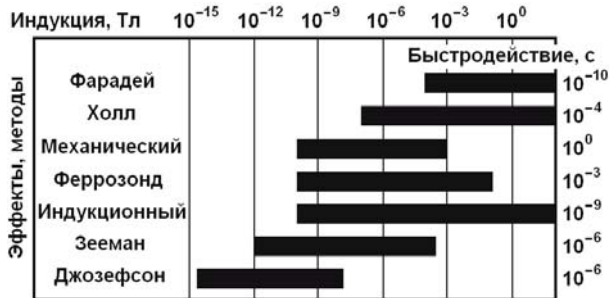


Рис. 1. Методы магнитометрии

В настоящее время постоянно растущий объём исследований магнитных свойств новых материалов делает актуальным наличие относительно недорогих в эксплуатации и в то же время неприхотливых, надёжных и эффективных средств измерений магнитного момента.

Индукционные датчики содержат в качестве чувствительного элемента катушку. При этом выходным сигналом является ЭДС, пропорциональная производной dB/dt . Если же измеряемое магнитное поле B постоянно, то ЭДС возникает за счёт изменения во времени эффективной площади контура S и пропорциональна dS/dt . Такие датчики обладают высокой чувствительностью до 0,1 нТл и очень широким динамическим диапазоном. Для измерения магнитных полей их используют редко из-за недостаточной помехоустойчивости, зато при исследовании магнитного момента они используются очень широко. Как правило, осуществляется механическое перемещение исследуемого образца относительно одной или нескольких приёмных катушек, при этом поле диполя, создаваемого образцом, наводит в витках катушек ЭДС, пропорциональную величине магнитного момента образца.

Первое краткое сообщение о разработке аппаратуры для измерения статической намагниченности путём передвижения образца относительно неподвижной приёмной цепи датируется 1951 годом [5]. Установка предназначалась для исследования редкоземельных элементов, а также образцов железа в слабых полях до 10 Э при комнатной температуре.

Своё развитие метод получил при создании магнитометра с вибрирующей катушкой. Подобный подход оправдан в тех случаях, когда по какой-либо причине затруднительно привести в колебательное движение сам образец, например, при изучении влияния гидростатического давления на магнитные свойства образцов [6] либо при проведении магнитных измерений при

сверхнизких температурах [7]. Основная проблема в данном случае заключается в появлении в катушке паразитного сигнала, обусловленного неоднородностью намагничивающего поля. В результате чувствительность магнитометров с вибрирующей катушкой ограничена значением порядка 10^{-4} Гс·см³. Кроме того, уровень полезного сигнала очень сильно зависит от взаиморасположения катушки и образца, что негативно сказывается на точности и повторяемости измерений.

От указанных недостатков в значительной степени свободен магнитометр с вибрирующим образцом и неподвижными приёмными катушками, такой магнитометр был разработан и описан Фонером [8]. Магнитометр содержал две пары приёмных катушек: одну пару для исследуемого образца, а другую – для опорного магнитного момента. Измерения проводились дифференциальным методом. Источником магнитного поля служил электромагнит.

При низкотемпературных измерениях целесообразно в качестве источника магнитного поля использовать сверхпроводящий соленоид. Это позволяет достичь сильных магнитных полей ($B \sim 10$ Тл) и в то же время разместить приёмные катушки в непосредственной близости от образца, что обеспечивает высокий уровень потокоцепления и, следовательно, высокую чувствительность магнитометра. Пример подобного вибрационного магнитометра с чувствительностью по магнитному моменту $2 \cdot 10^{-5}$ Гс·см³ можно найти в статье [9], где для измерений выбран нулевой метод (метод токовой оболочки). Здесь следует отметить, что необходимость в наличии жидкого гелия является фактором, существенно ограничивающим функционирование приборов, содержащих сверхпроводящие узлы.

Вибрационный магнитометр, созданный автором настоящей статьи, предназначен для исследования статических магнитных свойств широкого спектра веществ и позволяет снимать магнитопольевые, температурные и угловые зависимости магнитного момента. Магнитометр не требует криообеспечения жидким гелием, после включения в электросеть практически сразу готов к работе, что позволяет проводить измерения весьма оперативно. Блок-схема вибрационного магнитометра представлена на рис. 2.

Измерения на магнитометре проводятся прямым методом. Что, с одной стороны, по сравнению с нулевым методом позволяет на несколько порядков увеличить верхнюю границу динамического диапазона прибора и, с другой стороны, позволяет избежать чрезмерного усложнения схемы, присущего дифференциальному методу. Но в то же время к параметрам механических колебаний образца предъявляются повышенные требования.

Величину ЭДС в приёмных катушках при достаточно малой амплитуде колебаний образца можно представить как

$$E = k \cdot m \cdot a \cdot f \cdot n,$$

где k – коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрии измерительной схемы; m, a, f – магнит-

ный момент, амплитуда и частота колебаний образца соответственно; n – число витков в катушке. Ясно, что нестабильность амплитуды a и частоты f колебаний негативно влияет на результаты измерений. Как правило, в конструкциях вибрационных магнитометров для питания вибратора используют генераторы звуковых частот. Нестабильность частоты, равно как и амплитуды подобных генераторов, составляет $\sim 10^{-2}$. Общая же погрешность измерений может достигать $\sim 10^{-1}$. В целях улучшения точности и повторяемости результатов измерений магнитометр оснащён устройством высокоточной стабилизации параметров колебаний образца, дающим относительную нестабильность амплитуды колебаний 10^{-4} , а частоты 10^{-5} [10].

Намагничивающее поле создаётся электромагнитом Э конструкции И. М. Пузея [11], имеющим сопротивление обмотки 1 Ом. Источником питания электромагнита служит мотор-генератор, содержащий асинхронный электродвигатель типа А2-82-4 и генератор постоянного тока типа П91. Обмотка возбуждения генератора запитана от двуполярного блока БРП развёртки и стабилизации поля, что позволяет записывать полные петли гистерезиса. Имеется пять различных скоростей развёртки поля. Датчик Холла ДХ1 вырабатывает сигнал, управляющий блоком БРП. Для запуска мотор-генератора применено устройство плавного пуска Danfoss MCD 201, дистанционное управление которым осуществляется с операционной панели по интерфейсу RS-485. Измерение поля электромагнита производится датчиком Холла ДХ2 вместе с измерителем магнитной индукции РШ1-10, к ли-

нейному выходу которого подключён вольтметр В1 типа В7-40.

Исследуемый образец О крепится к нижней части кварцевого штока, который приводится в колебательное движение с помощью электродинамического вибратора В оригинальной конструкции [12]. Отличительной особенностью вибратора является то, что он выполнен с аксиальным отверстием, через которое пропущен якорь, жёстко соединённый с питающей катушкой и, в свою очередь, также имеющий аксиальное отверстие, через которое в источник намагничивающего поля установлен шток с держателем образца. По сравнению с известными конструкциями улучшена воспроизводимость результатов измерений, упрощены операции смены и регулировки положения образца. Катушка вибратора запитана от генератора Г переменного тока.

Для регулировки температуры образца используется проточный криостат, оснащённый нагревателем Н1, который подключён к источнику питания ИП1. Воздух из вакуумной рубашки криостата откачивается форвакуумным насосом 2НВР-5Д. Для контроля уровня вакуума применена вакуумная лампа ПМТ-2, подсоединённая к вакуумметру ВИТ-2. Пары жидкого азота подводятся к образцу О из транспортного сосуда Дьюара СК-25 по стандартному переливному устройству. Избыточное давление в сосуде Дьюара создаётся с помощью погружённого в жидкий азот нагревателя Н2, питаемого от источника ИП2. Контроль температуры осуществляется полупроводниковым датчиком ДТ, который подключён к вольтметру В2 типа В2-36.

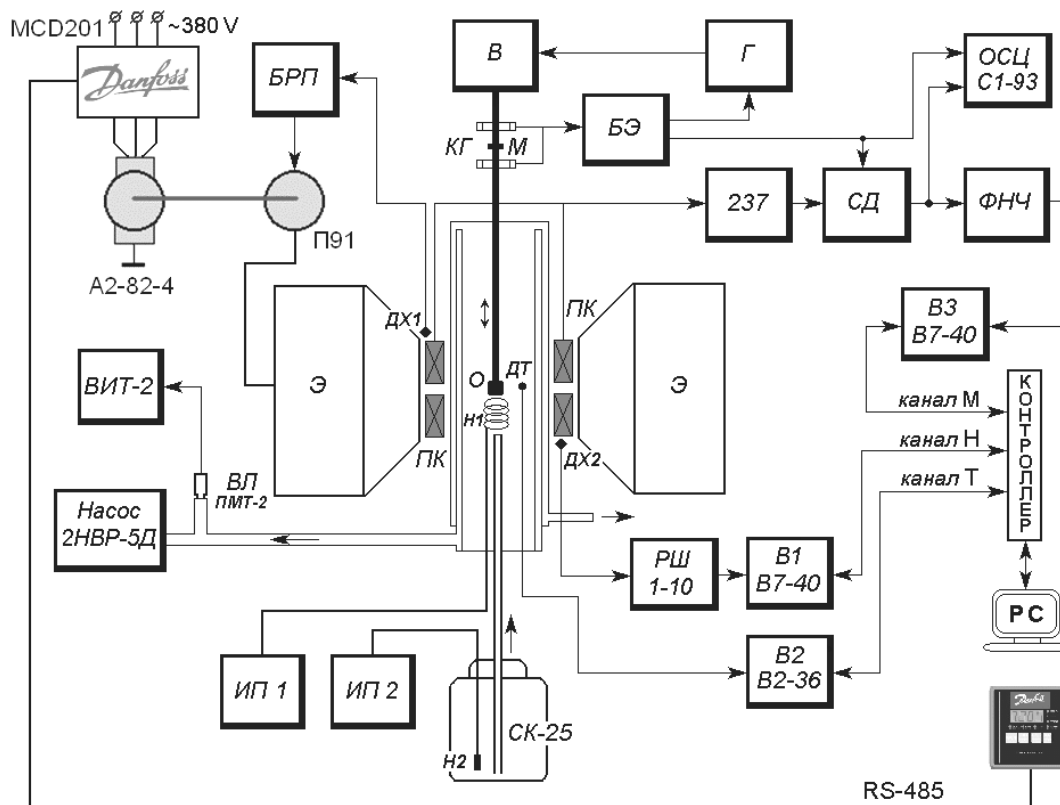


Рис. 2. Блок-схема автоматизированного вибрационного магнитометра

Постоянный магнит M , закреплённый на штоке и колеблющийся синхронно с образцом, индуцирует переменное электромагнитное поле, которое наводит ЭДС в неподвижных катушках Гельмгольца $KГ$. Сигнал обратной связи с катушек Гельмгольца поступает на электронный блок $БЭ$, где вырабатывается напряжение, которое подводится к генератору G и управляет величиной его выходного напряжения таким образом, чтобы поддерживать постоянным значение ЭДС в катушках Гельмгольца, а значит, и амплитуду вибраций. Генератор G , вибратор B , блок $БЭ$, катушки Гельмгольца $KГ$ и магнит M , охваченные между собой соответствующими связями, составляют устройство стабилизации параметров механических колебаний.

Для регистрации полезного сигнала применена система из четырёх приёмных катушек $ПК$, плоскости витков которых перпендикулярны намагничивающему полю и параллельны направлению колебаний [13]. Приёмные катушки размещены в центральной части полюсных наконечников электромагнита $Э$ и жёстко зафиксированы относительно них, благодаря чему ослабляются паразитные наводки со стороны поля электромагнита, возникающие вследствие флуктуаций поля и вибраций; ЭДС, наведённая в приёмных катушках, усиливается селективным нановольтметром типа 237 производства UNIPAN, затем сигнал обрабатывается синхронным детектором $СД$, фильтруется фильтром нижних частот $ФНЧ$ и после поступает на вход цифрового вольтметра $ВЗ$. Опорный сигнал для синхронного детектора формируется блоком $БЭ$. Для удобства настройки магнитометра и для визуального контроля за его работой используется двухлучевой осциллограф $С1-93$. На первый канал осциллографа подаётся опорный сигнал с блока $БЭ$, второй канал осциллографа подключён к выходу синхронного детектора.

Наиболее важные параметры вибрационного магнитометра представлены в таблице.

Функциональная схема устройства стабилизации параметров механических колебаний изображена на рис. 3. Кварцевый генератор вырабатывает импульсы прямоугольной формы стабильной высокой частоты. Этот сигнал поступает на делитель частоты, с выхода которого снимается циклически изменяющийся многоразрядный параллельный код. Постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) преобразует входной код в код для формирования дискретного синусоидального напряжения, который поступает на входы цифроаналогового преобразователя (ЦАП). В результате на выходе ЦАП формируется дискретное синусоидальное напряжение стабильной частоты, которое усиливается усилителем мощности и подводится к вибратору. Амплитуда напряжения на выходе ЦАП линейно зависит от величины опорного напряжения $U_{оп}$, которое подводится к ЦАП из блока $БЭ$.

Схема охвачена электромеханической отрицательной обратной связью. Сигнал обратной связи – ЭДС, наведённая в катушках Гельмгольца колеблющимся магнитом M , поступает на усилитель, затем выпрямляется амплитудным детектором, сглаживается

фильтром низкой частоты и подаётся на вход интегратора. На этот же вход по суммирующей схеме подаётся постоянное напряжение U_0 , которое задаёт значение амплитуды вибраций. На выходе интегратора формируется опорное напряжение для ЦАП. Если амплитуда колебаний магнита M становится отличной от заданной напряжением U_0 , то, как результат, меняется величина напряжения обратной связи. Это приводит к разбалансу входных напряжений интегратора, вследствие чего напряжение на его выходе начинает изменяться. Напряжение, подводимое к вибратору, тоже начинает изменяться, вызывая, в свою очередь, изменение амплитуды механических колебаний. Этот процесс происходит до тех пор, пока не будет устранён разбаланс напряжений на входах интегратора, что соответствует равенству амплитуды механических колебаний заданному значению. Таким образом, амплитуда колебаний штока вместе с магнитом поддерживается постоянной.

Основные параметры магнитометра

Динамический диапазон	$5 \cdot 10^{-6} - 100 \text{ Гс} \cdot \text{см}^3$
Магнитное поле	$0 - \pm 25 \text{ 000 Э}$
Температура образца	$77 - 370 \text{ К}$

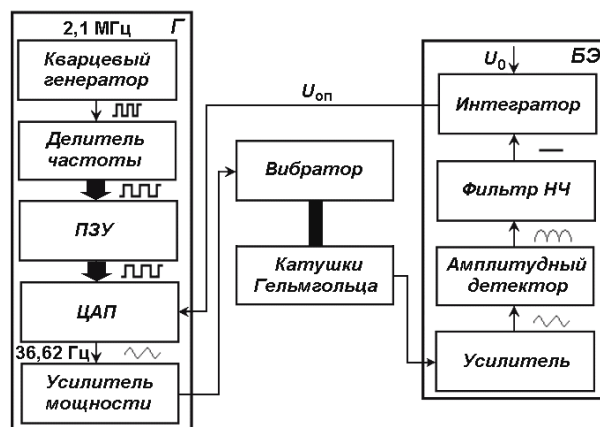


Рис. 3. Функциональная схема устройства стабилизации параметров вибраций

Принципиальная электрическая схема устройства стабилизации приведена на рис. 4. Узлы устройства выполнены на базе аналоговых и цифровых интегральных схем.

Задающий генератор собран на логических элементах HE D1.1 и D1.2 по схеме с одним инвертором в цепи отрицательной обратной связи по постоянному току [14]. Частота генератора 2,1 МГц стабилизирована кварцевым резонатором типа РК 170ББ–7ДУ–2100К. Нестабильность частоты не превышает 10^{-5} в интервале температур 20–40 °С.

Делитель частоты имеет два каскада, он собран на микросхемах D2 и D3. Первый каскад выполнен на микросхеме D2 K555IE2, представляющей собой четырёхразрядный десятичный асинхронный счётчик. Выходной сигнал генератора поступает на вход С0 микросхемы D2. Соединяя выходы счётчика Q0–Q3 различными способами с его входами, можно полу-

чить делители частоты с коэффициентами деления от 2 до 10 [15]. В данной схеме на счётчике D2 реализован делитель частоты на 7, таким образом, на выходе Q3 частота сигнала составляет 300 кГц. Второй каскад деления частоты выполнен на микросхеме D3 K561IE16, которая содержит 14-разрядный асинхронный счётчик, дающий на своих выходах Q0–Q13 16.384 двоичных отсчётов [16]. При каждом отрицательном перепаде тактового импульса на входе C содержимое счётчика увеличивается на единицу. После переполнения счётчика счёт начинается от нуля, т. е. счётчик работает циклически. Выходными сигналами делителя частоты являются меандры, сформированные на выходах Q5–Q12 микросхемы D2. Частота сигнала на выходе Q5 составляет 4,6875 кГц, на каждом последующем выходе частота меандра вдвое ниже, нежели на предыдущем, частота сигнала на выходе Q12 составляет 36,62 Гц. Сформированный таким образом восьмиразрядный двоичный код поступает на адресные входы ПЗУ.

ПЗУ на микросхеме D4 преобразует параллельный двоичный код в 8-разрядный код для формирования дискретного синусоидального напряжения. Это достигается с помощью соответствующей прошивки интегральной схемы ПЗУ KP573PФ5. В ячейки памяти с адресами \$00–\$FF записаны значения цифрового кода, соответствующие одному периоду функции SIN. Диапазон значений цифрового кода составляет также \$00–\$FF, что даёт возможность с помощью ЦАП получить дискретное синусоидальное напряжение, имеющее 256 градаций уровня.

ЦАП собран на микросхемах D5 и D6. Интегральная схема ЦАП D5 KP572ПА1 включена в режиме четырёхквadrантного перемножения [17]. Десятиразрядный прямой параллельный двоичный код на её цифровых входах D0–D9 преобразуется в напряжение на выходе операционного усилителя (ОУ) D6.2. Это напряжение пропорционально как значению цифрового кода, так и величине напряжения $U_{оп}$, которое подаётся на вход опорного напряжения U_R микросхемы D5. Синусоидальное напряжение на выходе ЦАП двуполярное, его частота равна 36,62 Гц, а его амплитуда изменяется в зависимости от величины опорного напряжения $U_{оп}$.

ЭДС, наведённая в катушках Гельмгольца КГ, сначала усиливается усилителем напряжения на ОУ D7.1, затем поступает на амплитудный детектор и фильтр низкой частоты. С помощью ОУ D7.2 формируется опорный сигнал для синхронного детектора СД.

Амплитудный детектор на ОУ D8.1 и D8.2 собран по схеме двухполупериодного выпрямителя с суммированием токов [18]. Фильтрация сигнала двухступенчатая. Вначале происходит обработка фильтром низкой частоты первого порядка с частотой среза 25 Гц на ОУ D8.2, который схемотехнически совмещён с амплитудным детектором. Далее сигнал поступает на фильтр низкой частоты с нулевым смещением [18] на ОУ D9.1. Частота полюса фильтра – 6 Гц, его достоинством является то, что ОУ полностью развязан по постоянному току с трактом обрабатываемого сигнала и не вносит в него дополнительное смещение.

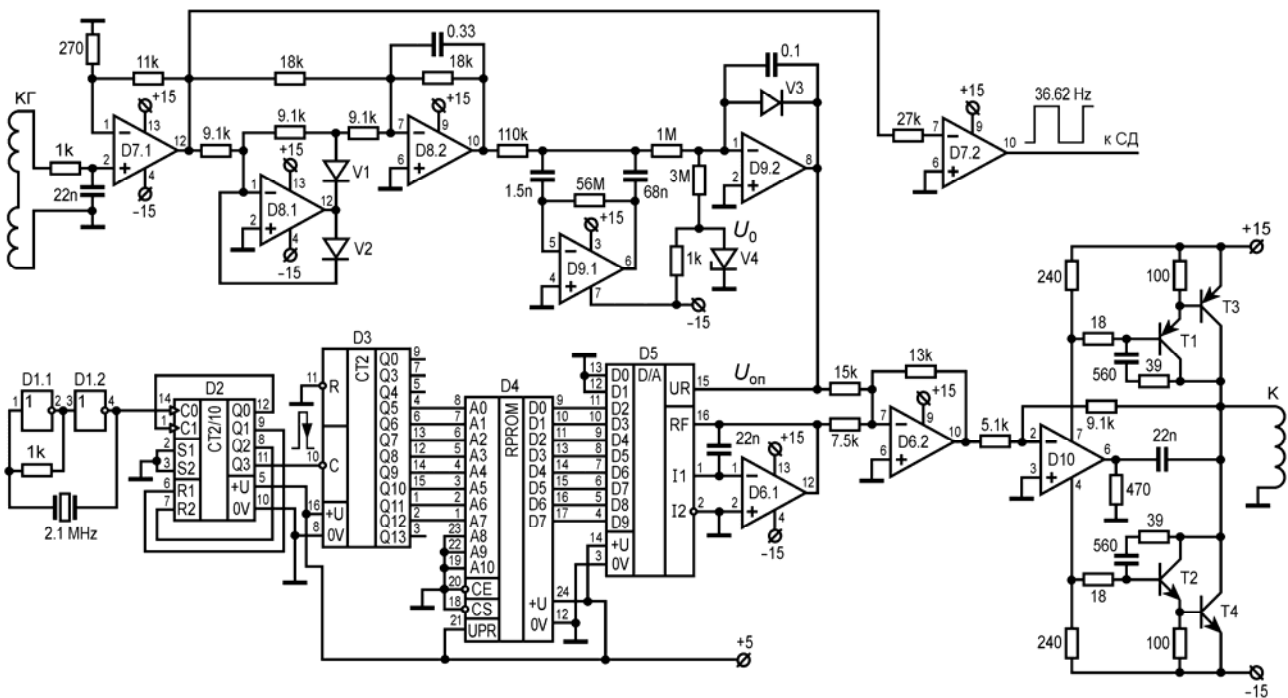


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема устройства стабилизации частоты и амплитуды колебаний образца:

D1 – KP1533ЛH1, D2 – K555IE2, D3 – K561IE16, D4 – KP573PФ5, D5 – KP572ПА1, D6–D8 – KP140УД20А,

D9 – KP574УД2, D10 – KP140УД608; T1 – KT814B, T2 – KT815B, T3 – KT818B, T4 – KT819B;

V1–V3 – КД522Б, V4 – Д818Е

Интегратор собран на ОУ D9.2 по суммирующей схеме: на инвертирующий вход ОУ подаются два разнополярных напряжения – прошедший обработку сигнал с катушек Гельмгольца и напряжение U_0 с прецизионного стабилизатора V4. Уровнем напряжения U_0 как раз и задаётся значение амплитуды механических колебаний штока. Выход интегратора подключён к входу опорного напряжения UR интегральной схемы ЦАП D5. Диод V3, включённый в цепь обратной связи ОУ, предотвращает появление отрицательного напряжения на его выходе, что могло бы привести к неправильной работе схемы.

Усилитель мощности изготовлен на основе микросхемы ОУ D10 и транзисторов T1–T4. Управление транзисторами T1, T2 осуществляется по цепям питания ОУ, RC-цепочки предотвращают самовозбуждение усилителя. Выход усилителя мощности нагружен катушкой K вибратора, имеющей сопротивление 4 Ом.

Для питания электрической схемы устройства стабилизации частоты и амплитуды колебаний используются три стабилизированных напряжения: ± 15 В и $+5$ В.

Параметры элементов схемы подобраны таким образом, чтобы амплитуда механических колебаний штока составляла 0,5 мм, общий ход штока был равен, соответственно, 1 мм. При этом нестабильность амплитуды колебаний не превышает 10^{-4} . Это было установлено замерами, полученными с помощью модуля 24-разрядного сигма-дельта-АЦП типа E-24 производства ЗАО «Л-КАРД» (<http://www.lcard.ru>). На рис. 5 представлены временные зависимости напряжения на выходе фильтра НЧ (см. рис. 3), снятые при работе вибратора как без штока (рис. 5, а), так и со штоком массой 45 г (рис. 5, б). Более высокий уровень шума во втором случае обусловлен нестабильностью силы трения штока о внутреннюю поверхность канала криостата. Частота выборки сигнала АЦП составляла 5 Гц.

Автоматизация измерений производится с помощью программы VSMagnetometer, написанной на языке Delphi (рис. 6) [19]. Данные с измерителя магнитной индукции, с датчика температуры и с выхода регистрирующей схемы магнитометра поступают на цифровые вольтметры $B1$, $B2$, $B3$ (см. рис. 2) и далее посредством специализированного контроллера передаются на LPT-порт персонального компьютера. Значения измеряемых параметров в ходе эксперимента записываются на жёсткий диск компьютера и графически отображаются на экране монитора.

Для оперативного просмотра отснятых графиков имеется ещё одна компьютерная программа ReadFile [20]. В ней предусмотрена функция экранной лупы и функция мгновенного вывода на экран координат, соответствующих текущему положению указателя компьютерной мыши.

Широкий динамический диапазон прибора даёт возможность исследовать самые разнородные материалы. В качестве примера на рис. 7 представлены магнитопольные зависимости магнитного момента для объёмного образца сплава NdFeB и для тонкоплё-

ночной структуры Ni/Ge, снятые при комнатной температуре.

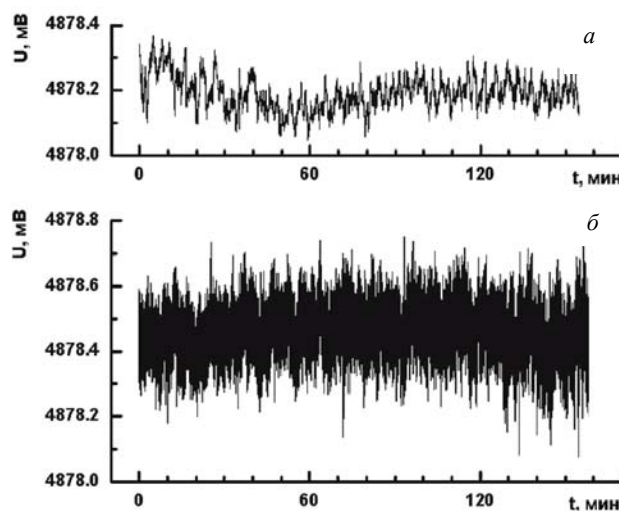


Рис. 5. Напряжение на выходе фильтра НЧ при работе вибратора: без штока (а), со штоком (б)

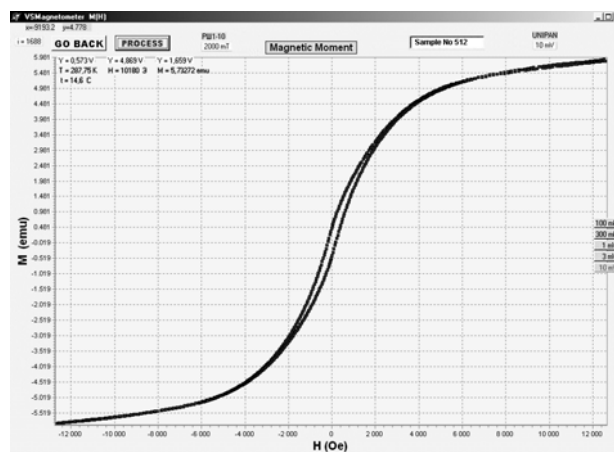


Рис. 6. Главное окно программы VSMagnetometer

Подводя итог, констатируем следующее. Разработан и изготовлен автоматизированный вибрационный магнитометр, предназначенный для исследования магнитопольных, температурных и угловых зависимостей магнитного момента твёрдотельных образцов. Магнитометр имеет параметры, которые приведены в таблице. Использование в магнитометре вибратора оригинальной конструкции улучшило ряд технических и эксплуатационных характеристик прибора. Оснащение вибрационного магнитометра системой высокоточной стабилизации параметров механических колебаний образца обеспечивает высокую достоверность результатов, получааемых прямым методом измерений магнитного момента. Широкий динамический диапазон прибора позволяет исследовать статические магнитные свойства крайне широкого круга веществ. Автоматизация сбора данных позволяет регистрировать измеряемые параметры с высокой точностью и сохранять большой объём полезной информации.

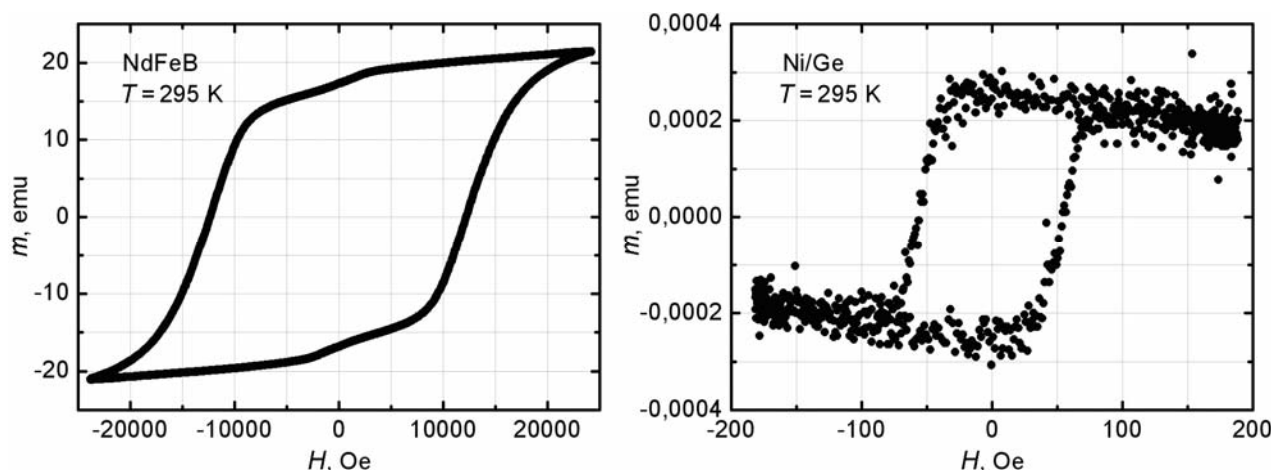


Рис. 7. Полевые зависимости магнитного момента NdFeB и плёнки Ni/Ge

Библиографические ссылки

1. Clark J. Principles and Applications of SQUIDS // Proc. IEEE. 1989. Vol. 77, № 8. P. 1208–1223.
2. Fagaly R. L. Superconducting Quantum Interference Device Instruments and Applications // Rev. Sci. Instrum. 2006. Vol. 77, № 10. P. 101101-1–101101-45.
3. Happer W. Optical Pumping // Rev. Mod. Phys. 1972. Vol. 44, № 2. P. 169–249.
4. Александров Е. Б., Вершовский А. К. Современные радиооптические методы квантовой магнитометрии // УФН. 2009. Т. 179, № 6. С. 605–637.
5. Plotkin H. H. Magnetic Properties of Solids. The Rare Earths // Quart. Progr. Rept. Massachusetts Institute of Technology Research Lab. Electronics, publ. 15.10.1951. P. 28.
6. Smith D. O. Development of a Vibrating-Coil Magnetometer // Rev. Sci. Instrum. 1956. Vol. 27, № 5. P. 261–268.
7. Legl S., Pfeleiderer C., Krämer K. Vibrating coil magnetometer for milli-Kelvin temperatures // Rev. Sci. Instrum. 2010. Vol. 81, № 4. P. 043911-1–043911-3.
8. Foner S. Versatile and Sensitive Vibrating-Sample Magnetometer // Rev. Sci. Instr. 1959. Vol. 30, № 7. P. 548–557.
9. Балаев А. Д., Бояршинов Ю. В., Карпенко М. М., Хрусталёв Б. П. Автоматизированный магнитометр со сверхпроводящим соленоидом // ПТЭ. 1985. № 3. С. 167–168.
10. Пат. РФ № 2341810. Вибрационный магнитометр / Великанов Д. А. Оpubл. 20.12.08, Бюл. № 35.
11. Пузей И. М., Сабинин П. Г. Электромагнит для физико-химических исследований // ПТЭ. 1960. № 1. С. 104–109.
12. Пат. РФ № 2339965. Вибрационный магнитометр / Великанов Д. А. Оpubл. 27.11.08, Бюл. № 33.
13. Noakes J. E., Arrott A., Haakana C. Vibrating Sample Magnetometers // Rev. Sci. Instrum. 1968. Vol. 39, № 10. P. 1436–1438.
14. Альтшуллер Г. Б., Елфимов Н. Н., Шакулин В. Г. Кварцевые генераторы : справочное пособие. М. : Радио и связь, 1984. 232 с.

15. Бирюков С. А. Цифровые устройства на интегральных микросхемах. М. : Радио и связь, 1987. 152 с.
16. Шило В. Л. Популярныe цифровые микросхемы : справочник. Челябинск : Металлургия, 1989. 352 с.
17. Федорков Б. Г., Телец В. А. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение. М. : Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
18. Пейтон А. Дж., Волш В. Аналоговая электроника на операционных усилителях. М. : БИНОМ, 1994. 352 с.
19. Свид. РФ о гос. регистрации № 2013618553. VSMagnetometer. Программа для ЭВМ / Д. А. Великанов. Заяв. 11.09.2013.
20. Свид. РФ о гос. регистрации № 2013618132. ReadFile. Программа для ЭВМ / Д. А. Великанов. Оpubл. 20.09.2013.

References

1. Clark J. Principles and Applications of SQUIDS. Proc. IEEE, 1989, vol. 77, no. 8, p. 1208–1223.
2. Fagaly R. L. Superconducting Quantum Interference Device Instruments and Applications. Rev. Sci. Instrum., 2006, vol. 77, no. 10, pp. 101101-1–101101-45.
3. Happer W. Optical Pumping. Rev. Mod. Phys., 1972, vol. 44, no. 2, p. 169–249.
4. Aleksandrov E. B., Vershovskij A. K. *Sovremennye radioopticheskie metody kvantovoj magnitometrii* (Modern radio-optical methods in quantum magnetometry). UFN, 2009, vol. 179, no. 6, p. 605–637.
5. Plotkin H. H. Magnetic Properties of Solids. The Rare Earths. Quart. Progr. Rept. Massachusetts Institute of Technology Research Lab. Electronics, publ. 15.10.1951, p. 28.
6. Smith D. O. Development of a Vibrating-Coil Magnetometer. Rev. Sci. Instrum., 1956, vol. 27, no. 5, p. 261–268.
7. Legl S., Pfeleiderer C., Krämer K. Vibrating coil magnetometer for milli-Kelvin temperatures. Rev. Sci. Instrum., 2010, vol. 81, no. 4, p. 043911-1–043911-3.
8. Foner S. Versatile and Sensitive Vibrating-Sample Magnetometer. Rev. Sci. Instr., 1959, vol. 30, no. 7, p. 548–557.

9. Balaev A. D., Bojarshinov Ju. V., Karpenko M. M., Hrustal'jov B. P. *Avtomatizirovannyj magnitometr so sverhprovodjashhim solenoidom* (Automated magnetometer with a superconducting solenoid). *PTE*, 1985, no. 3, p. 167–168.
10. Velikanov D. A. *Vibratsionnyy magnitometr* (Vibrating Sample Magnetometer). Patent RF no. 2341810, publ. 20.12.2008, bull. no. 35.
11. Puzey I. M., Sabinin P. G. *Electromagnit dlja fiziko-himicheskikh issledovaniy* (Electromagnet for physico-chemical studies). *PTE*, 1960, no. 1, p. 104–109.
12. Velikanov D. A. *Vibratsionnyy magnitometr* (Vibrating Sample Magnetometer). Patent RF no. 2339965, publ. 27.11.2008, bull. no. 33.
13. Noakes J. E., Arrott A., Haakana C. Vibrating Sample Magnetometers. *Rev. Sci. Instrum.*, 1968, vol. 39, no 10, p. 1436–1438.
14. Al'tshuller G. B., Elfimov N. N., Shakulin V. G. *Kvarcevyje generatory: Spravochnoe posobie* (Crystal oscillators: Reference guide). Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1984, 232 p.
15. Birjukov S. A. *Cifrovye ustrojstva na integral'nyh mikroshemah*. (Digital devices at integrated microcircuits). Moscow, Radio i svjaz' Publ., 1987, 152 p.
16. Shilo V. L. *Populjarnye cifrovye mikroshemy: Spravochnik* (Popular digital microcircuits: Handbook). Chelyabinsk, Metallurgija Publ., 1989, 352 p.
17. Fedorkov B. G., Telec V. A. *Mikroshemy CAP i ACP: funkcionirovanie, parametry, primenenie* (DAC and ADC microcircuits: functioning, parameters, application). Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1990, 320 p.
18. Pejton A. Dzh., Volsh V. *Analogovaja jelektronika na operacionnykh usiliteljah* (Analogue electronics on operational amplifiers). Moscow, BINOM Publ., 1994, 352 p.
19. Velikanov D. A. VSMagnetometer. Computer software. Cert. RF on state registration no. 2013618553, regist. 11.09.2013.
20. Velikanov D. A. ReadFile. Computer software. Cert. RF on state registration no. 2013618132, publ. 20.09.2013.

© Великанов Д. А., 2014

УДК 539.374

ТЕХНОЛОГИИ И МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕНОМЕТАЛЛОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТАХ II

Г. Г. Крушенко

Институт вычислительного моделирования СО РАН
Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 44
Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660014, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
E-mail: genry@icm.krasn.ru

Описаны технологии получения пенопродуктов из различных металлов и сплавов, включая современные технологии с применением методов литья и порошковой металлургии, а также путем прямого вдувания в расплав газообразных веществ. Приведены характеристики пенометаллов, их преимущества перед плотными материалами, а также их применение в аэрокосмической и других отраслях промышленности. Пенометаллы получают двумя основными способами – литьем и методом порошковой металлургии. Благодаря их легковесности пенометаллические изделия применяются в автомобильной и аэрокосмической отрасли. Технология получения пенометаллов заключается в газифицировании расплава разными методами. В последние годы определенные успехи были достигнуты в технологии формирования профильных изделий из пенометаллов с применением различных методов обработки давлением.

Ключевые слова: технологии и механизм формирования пенометаллов, применение пенометаллов в летательных аппаратах.

THE TECHNOLOGIES AND MECHANISM OF FORMING THE FOAM METALS AND ITS USE ON AIRCRAFTS II

G. G. Krushenko

Institute computational modeling SB RAS
50/44, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation
E-mail: genry@icm.krasn.ru