

КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

*ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ имени Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА*

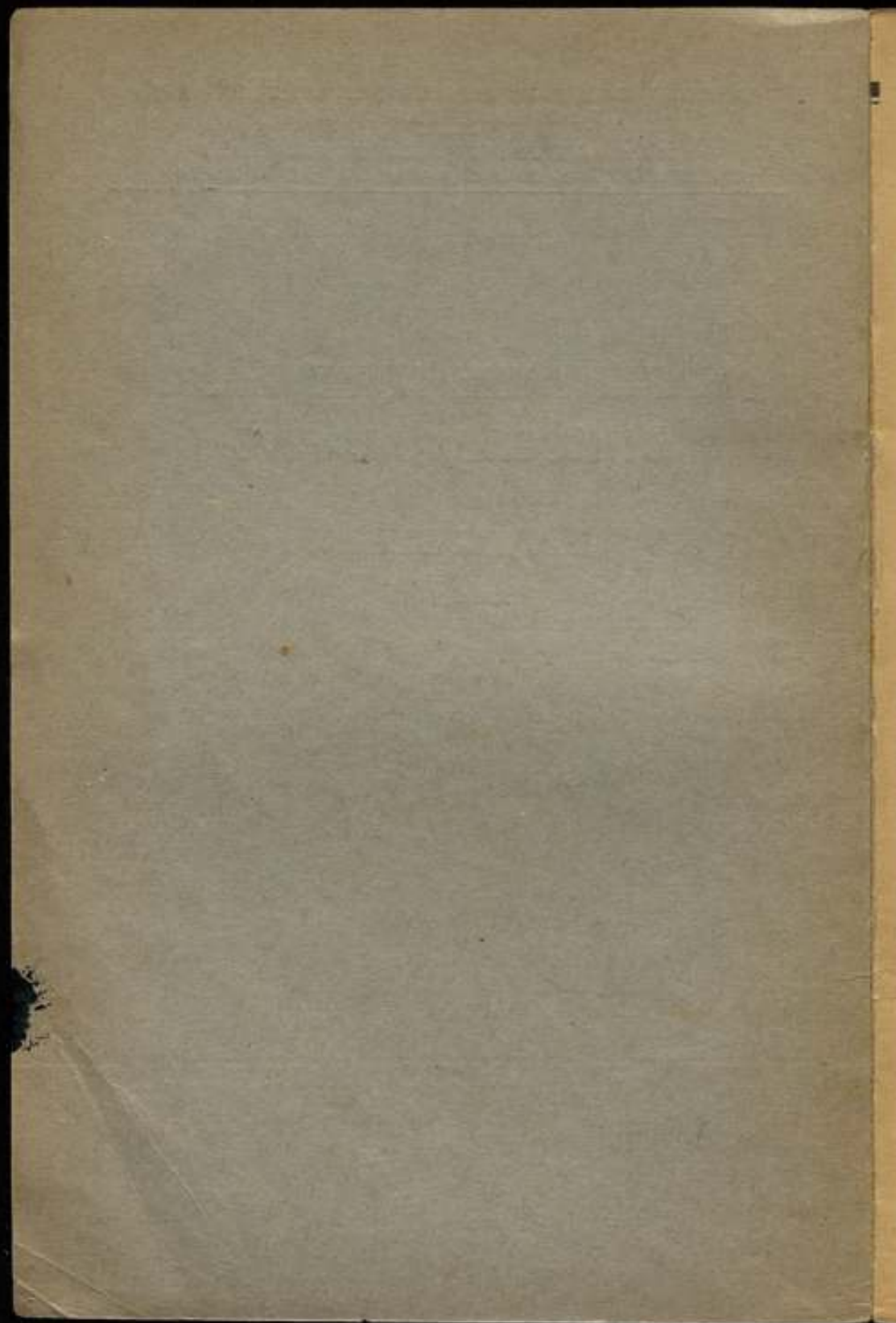
МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ

ТРУДЫ ВНИИМ

ВЫП. 10 (70)



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ



КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР

*ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ имени Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА*

МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ

ТРУДЫ ВНИИМ

ВЫП. 10 (70)

*Под редакцией
директора ВНИИМ
М. П. ПАВЛОВА*

БИБЛИОТЕКА
ВСЕСОЮЗНОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВА-
ТЕЛЬНОГО ИНСТИТУТА МЕТРОЛОГИИ
ИМЕНИ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ЛЕНИНГРАД 1952 МОСКВА

98901 ж

Научный редактор
профессор *Е. Г. ШРАМКОВ*

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Предисловие	3
Е. Г. Шрамков — Создание магнитного эталона в абсолютных единицах	5
Г. К. Ягола — Методика измерения периода колебаний магнита	43
Е. Т. Чернышев — Определение магнитной неоднородности образцов магнитных сталей	49
А. М. Ермакова — Влияние формы бланжистического импульса тока на точность измерения магнитных характеристик ферромагнитных материалов	71
Н. Г. Чернышева — Влияние магнитных полей на магнитоэлектрические приборы	89
Е. А. Соколова — Определение магнитной восприимчивости золота, серебра и меди	110

Технический редактор *А. А. Забродина*

Сдано в проза. 11/VI 1952 г. Подп. к печати 27/X 1952 г.
М-43857. Печ. л. 7,5. Бум. л. 3,75. Уч.-изд. л. 8,6.
Формат 60×92¹/₁₀. Тираж 600. Заказ 2062.

Типография № 2 Ленгорполиграфиздата. Ленинград, Социалистическая, 14.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Измерения, связанные с магнитными явлениями, приобретают все большее и большее практическое значение в самых разнообразных областях народного хозяйства. Помимо новых проблем, возникающих в этой области измерений, повышаются требования в отношении точности измерений и чувствительности измерительной аппаратуры.

Основной задачей магнитной лаборатории ВНИИМ, как метрологического учреждения, являются работы по созданию и усовершенствованию магнитных эталонов, образцовых мер и приборов и по передаче верных размеров магнитных единиц рабочим мерам и приборам в соответствии с современным научным уровнем и требованиями практики.

Печатаемые в настоящем сборнике статьи Е. Г. Шрамкова «Создание магнитного эталона в абсолютных единицах» и Г. К. Ягола «Методика измерения периода колебаний магнита» содержат результаты работ магнитной лаборатории по созданию эталона, воспроизводящего единицы напряженности магнитного поля и магнитного потока в абсолютной мере, удовлетворяющего современным требованиям в области магнитных измерений. В связи с переходом в СССР на абсолютные электрические и магнитные единицы решение данной проблемы приобретает особое значение.

Вторая статья представляет также и самостоятельный интерес. Описываемый в ней оригинальный метод измерения периода колебаний магнита при помощи фотоэлектрической установки с хроцоскопом обеспечивает более высокую точность измерения по сравнению с существующими методами, отличается простотой и не требует большой затраты времени.

Для обеспечения единства магнитных измерений при оценке качеств ферромагнитных материалов магнитная лаборатория ВНИИМ уже в течение многих лет проводит работы по исследованию нормальных образцов. Такими образцами, с тщательно изученными магнитными характеристиками, снабжаются заинтересованные лаборатории и учреждения. В статье Е. Т. Чернышева «Определение магнитной неоднородности образцов магнитной стали», посвященной этому вопросу, на основе широко поставленных экспериментов делаются выводы о возможном критерии степени

неоднородности образцов магнитнотвердых материалов, используемых в качестве нормальных образцов.

В широкой практике магнитных измерений и в настоящее время очень большое применение находит индукционный метод с баллистическим гальванометром для измерения магнитного потока постоянного во времени. Несмотря на более чем столетнюю давность этого метода, ряд вопросов, к нему относящихся, не нашел еще должного разрешения. Одним из таких вопросов является вопрос о погрешностях, обусловленных тем, что баллистический гальванометр, при конечной продолжительности импульса тока, не учитывает всего количества электричества, прошедшего через гальванометр. Этому вопросу и посвящена статья А. М. Ермаковой «Влияние формы баллистического импульса тока на точность измерения магнитных характеристик ферромагнитных материалов», помещенная в настоящем сборнике.

В статье приводятся результаты экспериментального исследования погрешностей, возникающих по вышеуказанной причине при баллистических измерениях, подтверждающие теоретические расчеты. Наряду с этим описывается методика определения размагничивающей части гистерезисной кривой для высококоэрцитивных сплавов в намагничивающих устройствах типа электромагнита, обеспечивающая получение практически надежных результатов.

В статье Н. Г. Чернышевой «Влияние магнитных полей на магнитоэлектрические приборы» рассматриваются вопросы, касающиеся явлений, возникающих при действии внешних магнитных полей на магнитоэлектрические приборы, и приводятся соображения об оценке погрешностей, обусловленных этими полями.

В статье Е. А. Соколовой «Определение магнитной восприимчивости золота, серебра и меди» приводятся результаты определений магнитной восприимчивости химически чистых металлов.

Ценность этих результатов заключается в том, что они относятся к наиболее чистым металлам и, следовательно, дают достоверные и определенные значения восприимчивости этих металлов.

СОЗДАНИЕ МАГНИТНОГО ЭТАЛОНА В АБСОЛЮТНЫХ ЕДИНИЦАХ

Е. Г. ШРАМКОВ

В 1948 г. в СССР введена абсолютная система электрических и магнитных единиц. Для обеспечения единства, требуемой практикой точности и надежности измерений в области электрических и магнитных измерений, необходимо было, в связи с указанным переходом на новую систему единиц, подвести метрологическую основу в виде соответствующих эталонов, воспроизводящих единицы в данных областях измерений. Работы Магнитной лаборатории ВНИИМ, проведенные в период 1932—1938 гг., завершились созданием эталонов единиц напряженности магнитного поля, магнитного потока и магнитного момента в абсолютной системе [Л. 1, 2, 3]. Точность воспроизведения этих единиц удовлетворяла в то время большинству требований практики за исключением областей, связанных с измерениями земного магнитного поля, и специальными измерениями, имеющими большое народнохозяйственное значение. В связи с этим на следующем этапе эталонных работ в области магнитных измерений, завершившихся в 1948 г., были поставлены задачи: а) повышения точности воспроизведения магнитных единиц, б) создания аппаратуры, позволяющей производить измерения горизонтальной составляющей земного магнитного поля с метрологической точностью. Решение этих проблем должно было одновременно привести к решению задачи включения в орбиту метрологического обслуживания вышеуказанных областей измерений, находящихся вне этого обслуживания по линии магнитных измерений.

При воспроизведении единицы силы тока в абсолютной мере национальными метрологическими лабораториями разных стран используется метод токовых весов. На этой основе и в ВНИИМ в 1948 г. успешно завершены работы по воспроизведению абсолютного ампера. Однако этот метод не является единственно возможным. Абсолютный ампер может быть воспроизведен также через напряженность магнитного поля. А это требует измерения в абсолютных единицах с высокой точностью напряженности магнитного поля. С метрологической точки зрения, проведение работ по воспроизведению абсолютного ампера вышеуказанным методом, резко

отличающимся от метода токовых весов, представляется особенно ценным. Это позволит получить дополнительное подтверждение достоверности результатов воспроизведения единицы силы тока токовыми весами, независимо от данных измерения в иностранных метрологических учреждениях.

Таким образом, к вышеуказанным задачам по магнитным эталонам присоединяется еще одна задача — подготовка экспериментальной базы для последующих работ по воспроизведению единицы силы тока через напряженность магнитного поля.

Для воспроизведения единицы напряженности магнитного поля и магнитного потока требовалось прежде всего решить два основных вопроса: а) создание искусственно-воспроизводимого магнитного поля, достаточно однородного в необходимом объеме и легко доступного для экспериментирования; б) измерение напряженности этого поля в абсолютных единицах с требуемой точностью. Естественно, что при этом должна быть предусмотрена возможность передачи наиболее простым способом значения единиц, воспроизводимых эталоном, рабочим эталонам и далее образцовым и рабочим магнитным мерам и приборам.

В качестве прибора для воспроизведения магнитного поля решено было применить катушку типа Гельмгольца с обмоткой, питаемой постоянным током. Такая катушка обеспечивает, как показывают расчеты, однородное магнитное поле в достаточном объеме, а главное, легко доступном и удобном для экспериментирования [Л. 2]. В основу измерения напряженности поля такой катушки был положен метод наблюдения отклонения магнита, подвешенного в поле катушки, от магнитного меридиана при некотором неизменном, в процессе эксперимента, токе в обмотке катушки. Этот метод требует измерения напряженности горизонтальной составляющей земного магнитного поля.

Электромагнитный эталон

Для осуществления поставленных задач был разработан, сконструирован и построен новый оригинальный прибор, названный нами электромагнитным эталоном. Прибор изготовлен на заводе «Эталон» в Ленинграде.

Схематическое устройство электромагнитного эталона показано на рис. 1. Прибор состоит из следующих основных частей.

1. Неподвижное основание O с конусом A , агатовым подпятником и выжимной пружиной, являющимися опорой подвижной части прибора, и лимбом L .

2. Подвижная часть, состоящая из: а) двух катушек типа Гельмгольца. Одна из них K_1 , однослойная на пирексовом цилиндре, выполнена из голой проволоки по 10 витков, навитых на одинаковых расстояниях, равных половине радиуса катушки, от центрального сечения цилиндра. Радиус катушки равен 150 мм. Вторая катушка K_2 — многослойная из изолированной проволоки, нави-

той в канавках, выточенных в двух пирексовых фланцах, жестко скрепленных с цилиндром. Расстояние между средними плоскостями обмоток также равно среднему радиусу каждой из обмоток (240 мм). Эта катушка предназначена для передачи значения напряженности поля катушки K_1 рабочим эталонам; б) двух кронштейнов (шин) C и D , на каждом из которых расположен поворотный столик E на каретке, имеющий возможность перемещаться вдоль шины. Столики предназначены для помещения магнита во время измерений. При помощи установочных винтов положение магнита на столике можно изменять как в горизонтальной, так и в вертикальной плоскости. Столики снабжены лимбами с делениями и микроскопами.

Вся подвижная часть может свободно поворачиваться вокруг вертикальной оси.

3. В центральной части цилиндра при измерении напряженности поля катушки K_1 устанавливается подвесное устройство с магнитом M . Деревянный пустотелый цилиндр B в латунной оправе с основаниями из плоско-параллельных стекол скреплен с латунной трубкой T , в верхней части которой имеется крутильная головка G , позволяющая перемещать точку подвеса магнита в двух взаимно перпендикулярных направлениях в горизонтальной плоскости, а также по вертикали.

Для наблюдения за поведением подвешенного магнита при установке прибора и во время самых измерений служит зрительная труба, укрепленная на особом кронштейне, жестко связанном с подвижной частью прибора. Углы поворота подвижной части прибора отсчитываются по лимбу L при помощи двух микроскопов, расположенных по диаметру лимба.

Для воспроизведения единицы магнитного потока в центре катушки K_1 , коаксиально с ней, вместо подвешенного устройства помещается вторичная катушка с однослойной обмоткой из изолированной проволоки, навитой на тщательно обработанный цилиндрический мраморный каркас. Размеры вторичной катушки рассчитаны так, чтобы в объеме, ею занимаемом, поле, создаваемое катушкой K_1 , было в достаточной степени однородным.

Все детали электромагнитного эталона изготовлены из материалов, магнитная восприимчивость которых меньше 10^{-6} CGS μ_0 .

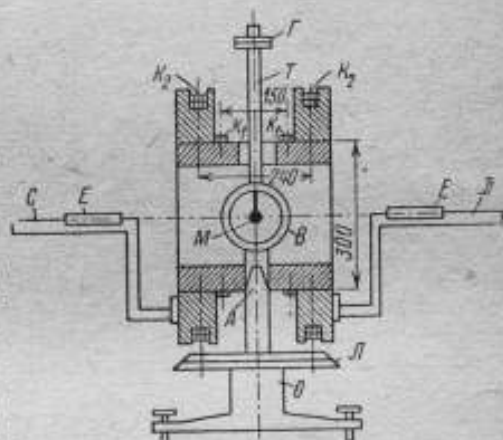


Рис. 1. Эскиз электромагнитного эталона

Внешний вид электромагнитного эталона, установленного на фундаменте в загородной лаборатории, показан на рис. 2.

Технология изготовления электромагнитного эталона требовала высокой инженерной и производственной квалификации. Наиболее трудным в процессе производства явилось изготовление катушек на пирексовых каркасах (рис. 3).

Материалом каркаса этих обмоток было выбрано стекло пирекс, как имеющее малый температурный коэффициент расширения. За-

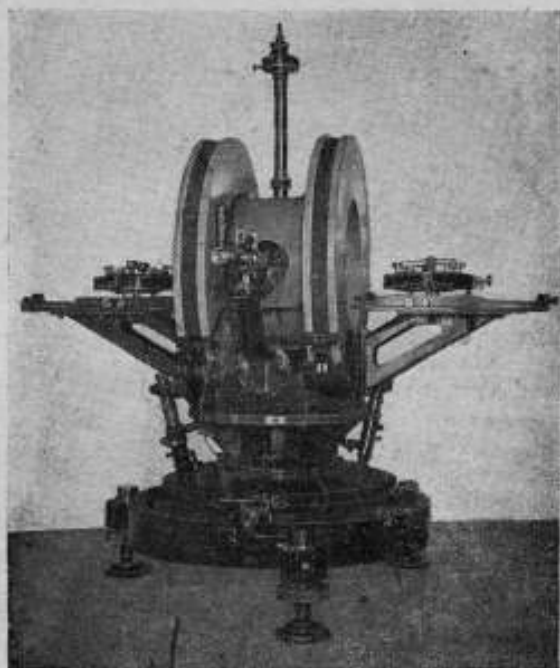


Рис. 2. Общий вид электромагнитного эталона

готовки для изготовления катушки были отлиты заводом ЛЕНЗОС. Чтобы получить высокую степень однородности магнитного поля (до 0,001%) и точности при подсчете коэффициента пропорциональности между напряженностью магнитного поля и силой тока, проходящего по катушке K_1 , к допускам на линейные размеры каркаса были предъявлены весьма высокие требования. Так, например, отступление от заданного размера в диаметре, при его величине в 300 мм, не должно было превосходить ± 50 мк, эллиптичность и конусность имели допуск в ± 10 мк. Не менее серьезные требования были поставлены также и по отношению к фланцам катушки, где допуск на диаметр не должен был превосходить ± 200 мк, а непараллельность внутренних торцевых поверхностей ± 20 мк.

Такие же высокие требования были предъявлены и к диаметру обмотки, укладываемой в канавки цилиндра, так как в конечном итоге расчетной величиной является именно средний диаметр витков обмотки. Шаг обмотки на цилиндре не должен был отличаться от заданного больше, чем на 6 мк. Постоянство диаметра витков определяется точностью изготовления цилиндра, точностью выполнения

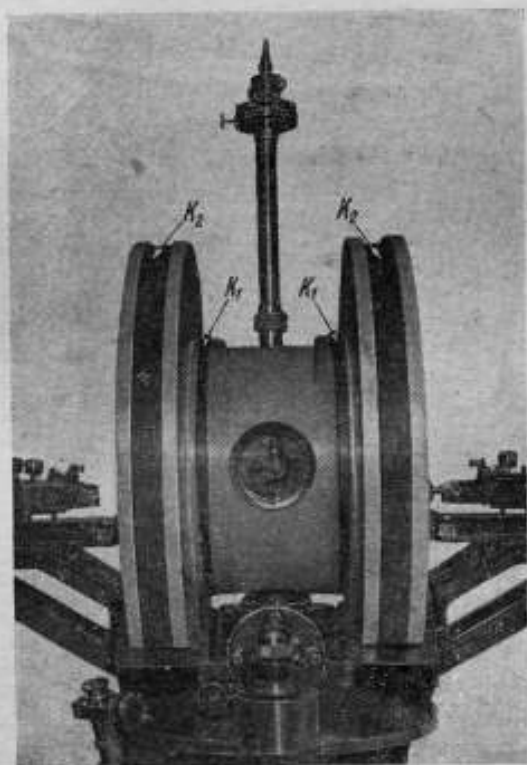


Рис. 3. Общий вид электромагнитного эталона

профиля винтовой нарезки, постоянством диаметра проволоки и однородностью натяжения витков при намотке, которое не должно быть слишком большим, так как при этом может заметно измениться круговое сечение проволоки.

Измерение геометрических размеров эталона

Достижение всех поставленных требований возможно было осуществить лишь при органическом сочетании механической обработки с точными линейными измерениями. Измерения эти произво-

дилься в лаборатории мер длины ВНИИМ. Основными элементами в приборе, требовавшими определения линейных и угловых размеров, являлись лимб и катушка.

а) Поверка лимба

Поверка лимба производилась непосредственно на самом электромагнитном эталоне на месте его установки способом, основанным на измерении некоторого постоянного угла на разных участках исследуемого лимба. Способ этот менее надежен, чем другие более точные способы, так как позволяет определить только усредненные погрешности диаметров лимба; однако погрешности эти определяются в условиях рабочего состояния лимба. Во всех же остальных способах на время поверки лимб отделяется от прибора и поверка его производится в иных, чем в самом приборе, условиях натяжений и давлений.

Применяя метод автоколлимации, производилось измерение угла между двумя посеребренными гранями призмы, которая во время измерения оставалась неподвижной. Для установки призмы был сконструирован и изготовлен специальный столик. Столик имеет регулировочные приспособления, которые позволяют установить призму так, чтобы грани ее были вертикальны и сама призма находилась бы над центром лимба. Кроме того, в конструкции столика предусмотрена возможность поворота призмы вокруг оси, примерно совпадающей с вертикальной осью вращения прибора.

Постоянным углом, который измерялся, являлся угол между двумя гранями призмы.

Так как лимб закреплен неподвижно, то между отдельными измерениями производился поворот столика вместе с закрепленной на нем призмой на угол 9° . Измерение каждого угла производилось дважды, в прямом и обратном направлении. Отсчеты по лимбу делались по микроскопам электромагнитного эталона. Всего было выполнено две серии измерений. Измерения в каждой серии производились отдельными рядами по пяти установок призмы в каждом ряду измерений.

В качестве дополнительного контроля правильности полученных при поверке лимба результатов, угол между гранями призмы был измерен в оптической лаборатории ВНИИМ. Расхождение между результатами этих измерений со средним значением угла, полученным по нашим данным, не превышает $10''$.

Следует считать, что определенные погрешности лимба электромагнитного эталона, не превосходящие $10''$, достоверны именно в этих пределах.

б) Измерение геометрических размеров катушки

До намотки катушки K_1 измерялись диаметр в разных местах по канавкам нарезки на каркасе, а также равномерность шага нарезки. После наложения обмотки измерялся диаметр катушки

по виткам на метровой линейной машине. Измерение диаметров обмотки производилось на каждой паре витков, в четырех сечениях цилиндра. Вся установка находилась в термостатной комнате, измерения производились при $t = 18^{\circ}\text{C}$.

Среднее значение диаметра, полученное из измерений в 40 местах, получилось равным 300, 619 мм.

Предельная погрешность результата измерения диаметра в микронах

$$V = \pm(0,2 + 3,5 \cdot 10^{-3}L),$$

где L — номинальный размер диаметра катушки в миллиметрах.

Измерения диаметра проволоки, намотанной на цилиндр, производившиеся в процессе намотки, показали, что диаметр изменяется в пределах от 0,974 мм до 0,976 мм.

Таблица 1

Номера приема	Величина шага, мк	Отклонение от среднего, мк
1	1205,7	+0,5
2	1205,0	-0,2
3	1204,2	-1,0
4	1205,1	-0,1
5	1206,0	+0,8
Среднее .	1205,2	—

Таблица 2

Номер шага	Величина шага, мк	
	левая сторона обмотки	правая сторона обмотки
1	1205,2	1199,2
2	1203,2	1204,5
3	1202,9	1202,9
4	1200,2	1198,5
5	1200,0	1199,0
6	1204,2	1200,5
7	1203,4	1203,2
8	1203,2	1202,5
Среднее .	1202,8	1201,3

Таблица 3

Номера приемов	Результат измерения, мм	Отклонение от среднего, мк
1	149,981	+17
2	149,970	+6
3	149,935	-28
4	149,928	-36
5	149,963	-1
6	149,963	-1
7	149,970	+6
8	149,974	+10
9	149,985	+21
10	149,982	+18
11	149,949	-15
Среднее .	149,964	—

Таблица 4

Номера витков	Расстояние между витками левой и правой сторон, мм
1/2—1/2	149,964
2/3—2/3	149,977
3/4—3/4	149,982
9/10—9/10	149,946
Среднее . . .	149,967

Шаг обмотки катушки и расстояние между соответствующими левыми и правыми витками измерялись путем сличения с длиной соответствующих интервалов рабочих эталонов длины — дециметра Д76 и метра М318 методом продольного компарирования. Это сличение производили на столе линейной делительной машины, используя микроскопы с ценой деления окулярного микрометра около 1 мк.

Для осуществления этих измерений был изготовлен ряд приспособлений.

В качестве примера в табл. 1 приводятся результаты измерения первого шага левой обмотки.

В табл. 2 даны результаты измерения шага между витками левой и правой групп витков обмотки.

Во время измерений в лаборатории поддерживалась температура, близкая к 20° С, с отклонением $\pm 0,5^\circ$ С.

Расстояние между серединами обеих групп витков обмотки определяли путем измерения расстояния между соответственными витками левой и правой сторон, сличая эти расстояния с длиной соответствующего интервала на метре М318.

Чтобы определить среднее расстояние между серединами левой и правой групп витков, измерялись расстояния между первым и вторым витками правой и левой групп витков, вторым и третьим, третьим и четвертым, девятым и десятым витками и среднее из этих измерений было принято за окончательный результат. В табл. 3 приводятся результаты одного из измерений расстояния между соответствующими первым и вторым витками, а в табл. 4 — окончательные результаты всех измерений.

Средняя квадратичная погрешность полученного результата оценивается величиной ± 6 мк.

Методика воспроизведения единицы напряженности магнитного поля

Для воспроизведения единицы напряженности магнитного поля, как указано выше, нами применена катушка с однослойной обмоткой, навитой на цилиндр электромагнитного эталона. Экспериментальное определение значения напряженности магнитного поля катушки, при некоторой силе тока в ее обмотке, производилось следующим методом. В центральной части катушки, в зоне однородного поля, на нити подвешивался магнит. Когда тока в обмотке нет, катушку устанавливали таким образом, чтобы магнитная ось магнита, находящаяся в плоскости магнитного меридиана, была строго перпендикулярна оси катушки. Далее включали ток в обмотку катушки и, поддерживая его неизменным, поворачивали катушку вокруг вертикальной оси до тех пор, пока магнитная ось магнита снова оказывалась перпендикулярной оси магнита (рис. 4).

Уравнение равновесия магнита при этом выражается формулой:

$$H_x = H_z \sin \theta, \quad (1)$$

где

H_K — напряженность магнитного поля катушки,

H_z — горизонтальная составляющая напряженности земного магнитного поля,

θ — угол отклонения магнита от магнитного меридиана.

Формула (1) требует введения поправок, обусловленных вариациями земного магнитного поля (см. ниже).

Если при этих измерениях по обмотке катушки протекал некоторый ток I , то постоянная катушки K , т. е. напряженность маг-

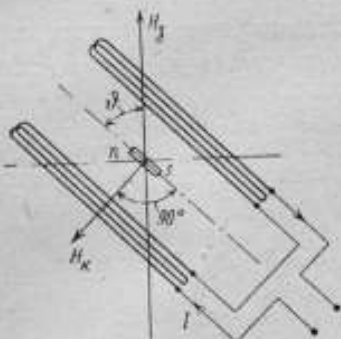


Рис. 4. Взаимное расположение катушки и магнита при измерении напряженности поля катушки

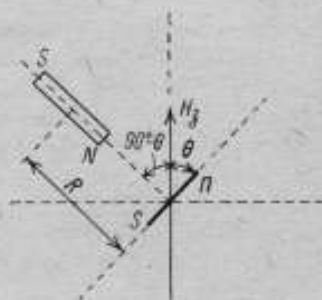


Рис. 5. Взаимное расположение подвешенного и отклоняющего магнитов

нитного поля, соответствующая единице силы тока, определяется из формулы

$$K = \frac{H_K}{I} \quad (2)$$

Существенно отметить, что при воспроизведении напряженности магнитного поля описанным методом не имеет значения, в каких единицах измеряется сила тока I . Необходима лишь пропорциональность между силой тока в обмотке катушки и отсчетами того измерительного устройства, которое применяется для измерения тока.

Как следует из уравнений (1) и (2), для определения H_K и K необходимо знать в момент измерения значение горизонтальной составляющей земного магнитного поля H_z .

Измерение горизонтальной составляющей земного магнитного поля осуществляется также на электромагнитном эталоне методом Гаусса. Метод этот заключается в измерениях: а) периода колебаний магнита в горизонтальной плоскости в земном магнитном поле; б) угла отклонения некоторого другого магнита под действием магнита, период колебания которого измерялся при таком их взаимном расположении, когда продолжение оси отклоняющего магнита

перпендикулярно оси подвешенного магнита и проходит через его центр.

Связь между периодом колебаний T магнита, его магнитным моментом M и горизонтальной составляющей земного поля H_2 выражается формулой:

$$MH_2 = \frac{\pi^2 J}{T^2}, \quad (3)$$

где J — момент инерции магнита и подвесной системы.

Для определения H_2 необходимо иметь еще второе уравнение, связывающее M и H_2 в виде отношения, суммы или разности.

Для этой цели магнит, период которого определяется, используется в качестве отклоняющего магнита и измеряется угол отклонения другого магнита (подвешенного). При расположении магнитов, как это изображено на рис. 5, связь между углом отклонения θ , магнитным моментом магнита и H_2 выражается уравнением:

$$\frac{H_2}{M} = \frac{2}{R^2 \sin \theta} \left(1 + \frac{p}{R^2} + \frac{q}{R^4} \right), \quad (4)$$

где R — расстояние между центрами магнитов,
 p и q — коэффициенты распределения, зависящие от формы и размеров магнитов, а также от характера намагничивания.

Решая совместно уравнения (3) и (4) относительно H_2 , получаем значение горизонтальной составляющей земного поля в функции величин, поддающихся непосредственному измерению в абсолютных единицах, а именно:

$$H_2 = \pi \sqrt{\frac{2J \left(1 + \frac{p}{R^2} + \frac{q}{R^4} \right)}{R^2}} \cdot \frac{1}{T \sqrt{\sin \theta}}. \quad (5)$$

Формула (5) справедлива, если измерения производятся при постоянной температуре, в отсутствии вариаций земного поля, при бесконечно малой амплитуде колебаний магнита и если нить подвеса не обладает кручением.

В действительности эти условия строго не соблюдаются и приходится вводить соответствующие поправки.

Таким образом, для воспроизведения единицы напряженности магнитного поля необходимо измерение следующих величин: периода колебаний магнита, температурного и индукционного коэффициентов магнитного момента магнита, момента инерции магнита с подвесной системой, расстояния между магнитами, коэффициентов распределения системы двух магнитов, вариаций земного маг-

нитного поля (горизонтальной составляющей и склонения) и силы тока в катушке электромагнитного эталона. Измерение этих величин потребовало разработки и осуществления ряда установок и специальных приспособлений.

Все измерения с электромагнитным эталоном производились в загородном помещении, предоставленном во временное пользование Всесоюзным научно-исследовательским институтом разведочной геофизики, вдали от возможных электромагнитных возмущений.

Методика определения периода колебаний магнита, применявшаяся в данной работе, описана в статье Г. К. Ягола «Методика измерения периода колебаний магнита», помещенной в настоящем сборнике.

Определение момента инерции подвесной системы с магнитом

Момент инерции подвеса с магнитом определялся путем сравнительных наблюдений периода колебаний подвеса с магнитом и с дополнительной нагрузкой телом инерции.

Момент инерции тела инерции вычисляется по геометрическим размерам и массе тела. Поэтому тело инерции должно быть изготовлено из однородного материала и иметь правильную геометрическую форму.

Для наших исследований были изготовлены два тела инерции цилиндрической формы и одно тело инерции в виде кольца. Все тела инерции изготовлены из бронзы, изученной в отношении однородности и длительной выдержки во времени. Тела инерции позолочены с целью предохранения их поверхностей от коррозии.

Измерение размеров тел инерции производилось в лаборатории мер длины, а массы — в лаборатории мер массы ВНИИМ.

Измерение момента инерции подвеса с магнитом сводится к измерению периода колебаний подвеса только с магнитом и периода колебаний этой системы с дополнительной нагрузкой телом инерции.

Подвесная система, применявшаяся в данной работе, имела форму и размеры в миллиметрах, указанные на рис. 6.

При наблюдениях периода колебаний магнит помещался в верхней части подвесной системы так, чтобы конец его доходил до левого упора *a*, а штрих в середине магнита находился под острием *O* в центре подвесной системы. Тело инерции в форме цилиндра вдвигалось в нижнюю часть подвесной системы до правого упора *b*.

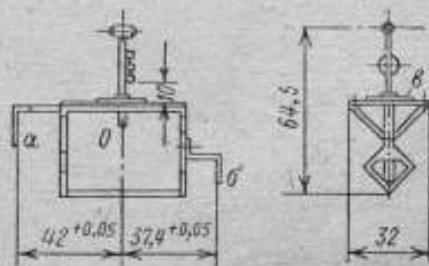


Рис. 6. Подвесное устройство для магнита и тел инерции

Для помещения кольцевого тела инерции в верхней части подвесной системы имеется цилиндрический выступ в диаметре, соответствующим внутреннему диаметру кольца.

Система с магнитом и с телом инерции или без него подвешивалась на коконовых нитях в специальном стеклянном домике (рис. 7).

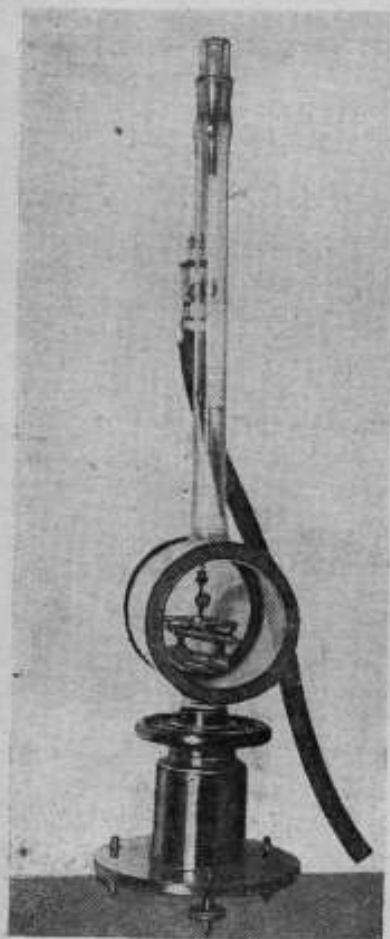


Рис. 7. Стекланный домик с подвешенным в нем магнитом

При наблюдении периода колебаний амплитуда не превышала $1,5^\circ$. Температура измерялась внутри домика вблизи магнита ртутным термометром с делениями в $0,05^\circ$.

Период колебаний подвесной системы с магнитом T_1 связан с моментом инерции формулой:

$$T_1^2 = \frac{\pi^2 J}{M H_z}, \quad (6)$$

где

J — момент инерции подвеса с магнитом,

M — магнитный момент магнита,

H_z — горизонтальная составляющая напряженности земного магнитного поля.

Период колебаний T_2 подвеса с магнитом, дополнительно нагруженного телом инерции, определяется уравнением:

$$T_2^2 = \frac{\pi^2 (J + J_0)}{M H_z}, \quad (7)$$

где J_0 — момент инерции тела инерции.

Решение уравнений (6) и (7) дает искомый момент инерции подвеса с магнитом

$$J = J_0 \frac{T_1^2}{T_2^2 - T_1^2}. \quad (8)$$

Формула — приближенная, так как в ней не учитываются факторы, вызывающие изменение периода в процессе его измерений. Такими факторами являются: колебания температуры, вариации земного магнитного поля, изменение хода хронометра, изменение момента кручения нити подвеса от изменения нагрузки и др.

Анализ этих влияний, пользуясь формулами (6), (7) и (8), позволяет получить следующую зависимость:

$$J_{20} = J_0 \frac{T_1^2}{T_2^2 \left[1 - \gamma_1 (t_2 - 20) + \gamma (t_1 - 20) + a (\Delta_2 - \Delta_1) - \frac{\alpha_2^2 - \alpha_1^2}{8} \right] - T_1^2},$$

где

J_{20} — момент инерции подвеса с магнитом при $t = +20^\circ \text{C}$ в гсм^2 ,

T_1 — период колебания магнита без тела инерции в секундах,

T_2 — период колебания магнита с телом инерции в секундах,

γ — температурный коэффициент момента инерции подвесной системы с магнитом в $1/\text{град}$,

t_1 — температура при измерении T_1 в градусах,

γ_1 — температурный коэффициент момента инерции подвеса с магнитом и телом инерции в $1/\text{град}$,

t_2 — температура при измерении T_2 в градусах,

Δ_1 — угол кручения нити подвеса с магнитом в угловых минутах,

Δ_2 — угол кручения нити подвеса с магнитом и телом инерции в угловых минутах,

a — коэффициент, равный $463 \cdot 10^{-7}$,

α_1 — амплитуда колебаний магнита без тела инерции в радианах,

α_2 — амплитуда колебаний магнита с телом инерции в радианах.

Численные значения T_1 и T_2 определяются из измеренных значений $T_{\text{изл}}$ и $T_{2\text{изл}}$, согласно формуле:

$$T = T_{\text{изл}} \left(1 + \frac{\Delta\beta}{100 \Delta\tau} \right) \left[1 - \frac{\mu}{2} (t - 20) + \frac{\delta H}{2H} \right], \quad (9)$$

где

$\Delta\beta$ — изменение показания хроноскопа за промежуток времени $\Delta\tau$, при сличении хроноскопа с контактным хронометром, в делениях шкалы хроноскопа (сотые доли секунды),

μ — температурный коэффициент магнита в $1/\text{град}$,

t — температура магнита при измерениях в градусах,

δH — вариация горизонтальной составляющей земного поля в эрстедах,

H — горизонтальная составляющая напряженности земного поля в эрстедах.

Температурные коэффициенты моментов инерции были получены расчетным путем по температурным коэффициентам линейного расширения материалов, из которых изготовлены подвес, магнит и тело инерции.

Значения угла кручения нити подвеса Δ_1 и Δ_2 определялись



непосредственными измерениями при разных условиях нагрузки подвеса.

Для определения углов кручения крутильная головка подвеса поворачивалась на 360° в одну сторону и затем в противоположную сторону и при этом измерялись углы поворота подвесной системы. Такие измерения производились многократно и в качестве результата принимались средние значения отдельно для подвесной системы только с магнитом и с дополнительной нагрузкой телом инерции.

В результате этих измерений были получены следующие численные значения угла кручения:

для подвеса с магнитом $\Delta_1 = 52'10''$;

для подвеса с магнитом и телом инерции «цилиндр 1» $\Delta_2 = 76'30''$;

для подвеса с магнитом и телом инерции «цилиндр» 2 $\Delta_2 = 76'30''$;

для подвеса с магнитом и телом инерции «кольцо» $\Delta_2 = 90'20''$.

Относительная погрешность определения момента инерции может быть оценена, исходя из формулы (8), выражением:

$$\frac{\Delta J}{J} = \frac{\Delta J_0}{J_0} + \frac{2T_2}{T_2 - T_1} \cdot \frac{\Delta T_1}{T_1},$$

где

$\frac{\Delta J_0}{J_0}$ — погрешность определения момента инерции тела инерции;

$\frac{\Delta T_1}{T_1}$ — погрешность измерения периода колебания магнита.

Учитывая точность измерения линейных размеров и массы тела инерции, погрешность $\frac{\Delta J_0}{J_0}$ можно оценить величиной 0,002%.

Погрешность измерения периода $\frac{\Delta T_1}{T_1}$ принята равной 0,0006%.¹

Численные значения периодов в наших измерениях были равны:

$$T_1 = 3,5 \text{ сек} \text{ и } T_2 = 4,5 \text{ сек}.$$

Таким образом, погрешность одного измерения момента инерции оценивается величиной, равной

$$\frac{\Delta J}{J} = 2 \cdot 10^{-3} + \frac{2 \cdot 4,5}{4,5 - 3,5} \cdot 6 \cdot 10^{-4} = 7 \cdot 10^{-3} \%$$

Результаты измерений момента инерции подвесной системы с магнитом, при нагрузках разными телами инерции, показали хорошую сходимость результатов. Максимальное расхождение

¹ См. статью Г. К. Ягола «Методика измерения периода колебаний магнита» в настоящем сборнике.

между средними значениями момента инерции, измеренными при помощи разных тел инерции, составляет 0,005%.

С целью исключения погрешности от неоднородности материала магнита и тела инерции измерения производились при перекалывании в различные положения как магнита, так и тел инерции.

Для дальнейших расчетов принята величина момента инерции подвешенной системы с магнитом как среднее арифметическое значение из 33 серий наблюдений с тремя телами инерции.

Численное значение определенного таким образом момента инерции подвеса с магнитом при температуре $t = +20^\circ \text{C}$ оказалось равным

$$J_{20} = (265,891 \pm 0,018) \text{ гсм}^2.$$

Вероятная погрешность результата оценивается величиной

$$\frac{\Delta J_{20}}{J_{20}} = 0,007\%.$$

Электрические измерения при установлении эталона магнитных единиц

В работах по установлению эталона напряженности магнитного поля и магнитного потока требовалось в процессе измерений поддерживать с высокой степенью точности постоянную силу тока в цепи катушки электромагнитного эталона, навитой на пирексовом цилиндре.

Для поддержания постоянства силы тока и его измерения был принят компенсационный метод, как обеспечивающий из всех известных методов в наибольшей степени выполнение поставленных требований. Принципиальная электрическая схема представлена на рис. 8. Обозначения на схеме: ЭМЭ — катушка электромагнитного эталона; R_N — образцовое сопротивление; E'_N и E''_N — два последовательно включенных нормальных элемента; U — аккумуляторная батарея; R — регулируемое сопротивление; G — гальванометр; Π — спаренный двойной переключатель.

Согласно принятой методике воспроизведения единицы напряженности магнитного поля, требуется поддерживать в обмотке катушки эталона силу тока порядка 0,2 а, принимая по предварительному подсчету постоянную катушки равной 0,6 э/а.

При измерении горизонтальной составляющей земного магнитного поля наблюдаются углы отклонения свободно подвешенного магнита в центре катушки под действием поля этой катушки. Направление поля должно при этом составлять угол в 90° с осью отклоняемого магнита. Для обеспечения требуемой точности отсчета углов отклонения магнита необходимо создать такие условия эксперимента, при которых эти углы имели бы величину в пределах $45-60^\circ$. Пользуясь уравнениями (1) и (2), можно ориентировочно найти значения силы тока I для заданных углов отклонения.

Принимая $H_s = 0,153$ э, получим, что для угла отклонения магнита 45° сила тока в обмотке катушки должна быть равной $I_{45} = 0,180$ а, а для угла отклонения 60° — сила тока $I_{60} = 0,221$ а.

Погрешность измерения силы тока и допустимые колебания тока за время одного наблюдения, во всяком случае, не должны превосходить $1 \cdot 10^{-5}$ величины тока. Цифра эта установлена нами из тех соображений, чтобы погрешность в измерении тока практически не влияла на общую погрешность определения напряженности магнитного поля катушки эталона, принимая погрешность единичного определения равной $1 \cdot 10^{-1}$ величины напряженности поля.

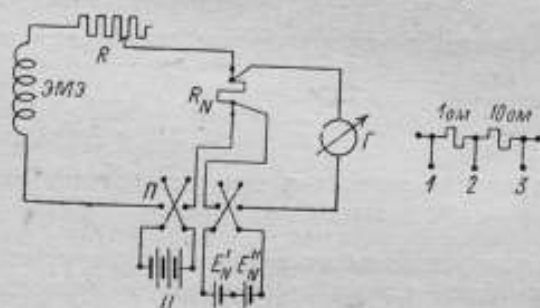


Рис. 8. Электрическая схема для измерения силы тока в обмотке электромагнитного эталона

Приведенные соображения служили основанием для выбора и расчета элементов электрической схемы.

Для получения наиболее надежных действительных значений сопротивлений R_N при их эталонировании желательно было иметь сопротивления с номинальными значениями, кратными 10.

Естественно, что при R_N , кратном 10, имея в виду компенсационную схему с нормальными элементами, осуществить выше указанные требования невозможно. Это обстоятельство заставило спроектировать одно из образцовых сопротивлений с номинальным значением в 11 ом специального типа, позволяющим при эталонировании с наибольшей точностью измерить действительное значение. Образцовая катушка сопротивления в 11 ом, изготовленная заводом «Эталон», намотана из проволоки одного диаметра и снабжена двумя токовыми и тремя потенциальными зажимами (см. рис. 8 справа). При эталонировании сопротивления измеряются отдельно между зажимами 1—2 и зажимами 2—3. Та же самая катушка используется и как 10-омная катушка. Совмещение сопротивлений в 10 ом и 11 ом в одном кожухе существенно также и потому, что в обоих случаях при измерении сохраняется температурный режим; цепь тока не приходится разрывать, а достаточно лишь пересоединить провод, идущий к одному из потенциальных зажимов.

Одним из основных вопросов при измерении силы тока является обеспечение постоянства тока за период времени одного измерения в пределах, не превышающих $1 \cdot 10^{-5}$ величины тока. Постоянство тока, главным образом, зависит от питающей аккумуляторной батареи и от температурных условий, в которых находится электрическая схема. Поэтому в первую очередь необходимо было выбрать аккумуляторную батарею, обеспечивающую требуемое постоянство напряжения при наиболее тяжелых условиях нагрузки.

Исследования, производившиеся с стационарной батареей 4 а, 480 а-ч, дали достаточно благоприятные результаты. Изменение напряжения при нагрузке 0,2 а составляет порядка 0,004% за 1 час от величины напряжения батареи, что является вполне приемлемым, если иметь в виду, что одна серия измерений занимает не больше 20 мин.

Следующие эксперименты были посвящены изучению температурного режима образцовых катушек сопротивления при нагрузке током 0,2 а, в соответствии с условиями работы подобных сопротивлений в схеме электромагнитного эталона. Опыты эти проводились с образцовыми катушками сопротивления в 10 ом и 1 ом. Катушки помещались в масляную ванну без перемешивания и без охлаждения масла. Температура катушек измерялась ртутным термометром с наименьшими подразделениями $0,05^{\circ}\text{C}$. Температура помещения, как правило, менялась в течение суток не больше $0,4^{\circ}\text{C}$.

Измерения показали, что достаточно стабильный температурный режим катушек (изменение температуры за 1 час порядка $0,03^{\circ}\text{C}$) наступает на вторые сутки непрерывной работы катушек под током.

При работе с электромагнитным эталоном наименьшее образцовое сопротивление в компенсационной схеме будет равно 10 ом. Таким образом, при повышении температуры образцовой катушки за 1 час на $0,03^{\circ}\text{C}$ изменение ее сопротивления можно ожидать порядка $5 \cdot 10^{-5}\%$. Величина эта сама по себе незначительная и к тому же в процессе измерений изменение сопротивления может быть учтено. Таким образом можно было констатировать, что применение образцовых катушек сопротивления при вышеуказанном нагрузочном режиме, более тяжелым, чем это принято при метрологических работах, вполне допустимо в схеме электромагнитного эталона.

Для обеспечения требуемой точности измерения силы тока существенным фактором является точное знание э. д. с. нормального элемента. Эталонирование нормальных элементов в условиях лабораторий ВНИИМ гарантирует получение заданной точности и для реализации этой точности при измерениях с электромагнитным эталоном необходимо сохранение того температурного режима, при котором производится эталонирование нормального элемента. Это требует поддержания температуры нормального элемента постоянной в пределах $0,01-0,02^{\circ}\text{C}$. При таких колебаниях температуры

изменения э. д. с. нормального элемента не будут превосходить 0,5—1,0 мкв.

При измерении тока существенным является также высокая изоляция всех элементов схемы между собой и по отношению к земле. Это относится как к компенсационной части схемы, так и к той ее части, которая содержит обмотку катушки электромагнитного эталона, так как сила тока в этой обмотке измеряется по падению напряжения на образцовом сопротивлении, включенном последовательно с катушкой. Благоприятным обстоятельством в нашем случае является то, что измерительная схема питается от источника тока низкого напряжения.

Все элементы схемы были установлены на мраморных подставках на столе, а гальванометр — на отдельном фундаменте с мраморной подставкой. Измерения сопротивления изоляции, производившиеся при напряжении 100 в с помощью гальванометра, показали, что сопротивления изоляции больше 10^{10} ом, что следует признать вполне удовлетворительным.

Последним разделом в настоящих исследованиях было измерение силы тока в цепи электромагнитного эталона по схеме, изображенной на рис. 8. Питание схемы осуществлялось от стационарной аккумуляторной батареи 4 в, 480 а-ч. В компенсационную цепь были включены последовательно два нормальных элемента. В качестве сопротивления R_N применялась образцовая катушка сопротивления в 10 ом, помещенная в ванну с трансформаторным маслом. Регулирование силы тока осуществлялось при помощи магазинов сопротивления.

Измерения производились в лаборатории, где температура в течение дня поддерживалась постоянной в пределах 0,1—0,2° С.

Измерения заключались в том, что, добившись нулевого отклонения гальванометра, т. е. полной компенсации, записывались показания термометров у образцовой катушки сопротивления и у нормальных элементов. Затем, через некоторый промежуток времени, если компенсация нарушалась, снова ее добивались, регулируя сопротивление. Такие наблюдения систематически проводились в течение нескольких дней. Результаты этих наблюдений показали, что требуемое постоянство тока в пределах $1 \cdot 10^{-6}$ величины тока в промежуток времени порядка 20 мин обеспечивается.

Измерение вариаций земного магнитного поля

При измерениях на электромагнитном эталоне требуется вносить поправки на вариации горизонтальной составляющей и склонение земного магнитного поля. Для этой цели была оборудована вариационная установка в отдельном помещении, удаленном от места расположения электромагнитного эталона на расстоянии порядка 100 м, позволяющая записывать на фотографической бумаге вариации вышеуказанных величин. Установка состоит из двух варио-

метров (горизонтальной составляющей и склонения) и самопишущего устройства конструкции Б. М. Яновского, изготовленных заводом «Эталон» (Л. 4).

Постоянные вариометров определялись экспериментально перед каждым измерением при помощи катушек, укрепленных непосредственно на вариометрах. Для вариометра *H* постоянная имела величину порядка $0,45 \cdot 10^{-6}$ э на 1 мм при расстоянии в 1,35 м между зеркалом вариометра и фотографической лентой самопишущего устройства. Для вариометра *D* постоянная равна $15''$ на 1 мм при том же расстоянии в 1,35 м.

Чтобы иметь возможность точно фиксировать вариации горизонтальной составляющей и склонения в моменты измерений с электромагнитным эталоном, была осуществлена сигнализация между помещениями с электромагнитным эталоном и вариационной установкой. У самопишущего устройства установлена электрическая лампочка, которая включалась нажатием кнопки, находящейся в помещении электромагнитного эталона, и на фотографической ленте фиксировался световой сигнал в виде вертикальной линии.

При измерениях выбиралось такое время, когда земное магнитное поле было спокойным.

Измерение индукционного коэффициента магнитного момента магнита

Определение индукционного коэффициента магнита проводилось на аstaticком магнитометре по схеме, изображенной на рис. 9.

Обозначения на этом рисунке: *ns* — нижний магнит магнитометра, *NS* — испытуемый магнит, *K₁* — намагничивающая катушка, *K₂* — компенсирующая катушка, *K* — катушка с известным произведением площади на число витков (*sw*).

Перед измерениями компенсирующая катушка *K₂* устанавливалась на скамье магнитометра так, чтобы магнитометр не давал отклонения при некоторой силе тока в цепи катушек *K₁* и *K₂*.

Затем испытуемый магнит помещался в центральную часть катушки *K₁*. По другую сторону от магнитометра на скамье устанавливалась катушка *K* на расстоянии *R₁* между центром этой катушки и центром магнита магнитометра, равному расстоянию *R₂* между центрами испытуемого магнита и магнита магнитометра. Регулируя ток в катушке *K*, добивались нулевого положения магнита магнитометра, когда в катушке *K₁* тока не было. Это свидетельствовало о том, что магнитный момент катушки *K* равен магнитному моменту испытуемого магнита.

Далее, в цепи намагничивающей катушки *K₁* устанавливалась такая сила тока, при которой напряженность магнитного поля, действующая на испытуемый магнит, была порядка 1–2 э. Наблюдаемое при этом отклонение магнитометра являлось мерой изменения магнитного момента испытуемого магнита.

Градировка магнитометра производилась при помощи катушки K , магнитный момент которой M_K определялся по формуле:

$$M_K = 0,1swI_0,$$

где I_0 — сила тока в обмотке катушки в амперах.

Индукционный коэффициент магнита ν вычислялся по формуле:

$$\nu = \frac{1}{M} \frac{\Delta M}{\Delta H} \quad \text{или} \quad \nu = \frac{\alpha I_0}{I a_0 K_0 I_1},$$

где

α_0 — отклонение магнита магнитометра в делениях шкалы при градуировке,

α — отклонение магнита магнитометра в делениях шкалы, вызванное изменением магнитного момента магнита под действием поля напряженностью ΔH ,

I — сила тока в катушке K при компенсации магнитных моментов в амперах,

K_0 — постоянная намагничивающей катушки K_1 в эрстедах на 1 ампер,

I_1 — сила тока в намагничивающей катушке K_1 в амперах.

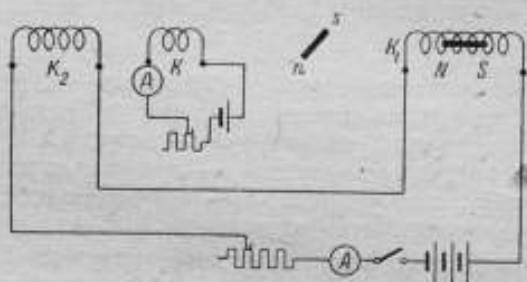


Рис. 9. Схема для измерения индукционного коэффициента магнита на магнитометре

На основании данных измерений, величина индукционного коэффициента магнита, который в дальнейшей работе применялся в качестве отклоняющего магнита, оказалась равной $42,3 \cdot 10^{-4}$ 1/эрстед.

Погрешность определения индукционного коэффициента может быть выражена формулой:

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{\Delta I_0}{I_0} + \frac{\Delta \alpha_0}{\alpha_0} + \frac{\Delta \alpha}{\alpha} + \frac{\Delta I_1}{I_1} + \frac{\Delta K_0}{K_0} + \frac{\Delta I}{I} = 3 \frac{\Delta I}{I} + 2 \frac{\Delta \alpha}{\alpha} + \frac{\Delta K_0}{K_0}$$

Погрешность в измерении силы тока оценивается нами в 0,5%, имея в виду, что сила тока измерялась прибором класса 0,2. Постоянная намагничивающей катушки была определена с точ-

ностью в 0,5%. При градуировке и измерении индукционного коэффициента отсчет по шкале был порядка 50 делений, погрешность в отсчете составляет порядка 0,2 деления. При этих условиях погрешность в определении индукционного коэффициента равна:

$$\frac{\Delta v}{v} = 3 \cdot 0,5 + 2 \cdot 0,4 + 0,5 = 2,8\%$$

Полученная погрешность находится за пределами требуемой точности.

Измерение температурного коэффициента магнитного момента магнита

Определение температурного коэффициента магнита производилось по схеме, приведенной на рис. 10, на том же магнитометре, на котором измерялся индукционный коэффициент.

Обозначения на рисунке: ns — нижний магнит магнитометра; NS — испытуемый магнит; K — катушка с известным произведением площади на число витков (sw).

Вначале испытуемый магнит помещался в сосуд с тающим льдом. Изменяя силу тока в катушке K , добивались нулевого положения магнита магнитометра. Затем, при помощи спиртовки вода в сосуде с испытуемым магнитом нагревалась до кипения. Вследствие изменения магнитного момента магнита, под влиянием изменения температуры на 100°C , магнит магнитометра давал некоторое отклонение, пропорциональное этому изменению магнитного момента. Температура в обоих случаях измерялась ртутным термометром. Температурный коэффициент магнита вычислялся по формуле:

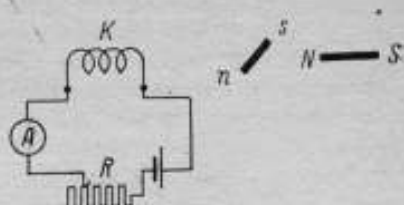


Рис. 10. Схема для измерения температурного коэффициента магнита на магнитометре

$$-\mu = \frac{1}{M} \cdot \frac{\Delta M}{\Delta t} \quad \text{или} \quad -\mu = \frac{\alpha I_0}{\alpha_0 I \Delta t}, \quad (10)$$

где

- I_0 — сила тока в катушке K при градуировке магнитометра в амперах,
- α_0 — отклонение магнита магнитометра при градуировке в делениях шкалы,
- α — отклонение магнита магнитометра при измерении изменения магнитного момента испытуемого магнита под влиянием изменения температуры в делениях шкалы,
- Δt — изменение температуры в градусах,
- I — сила тока в катушке K при компенсации магнитных моментов в амперах.

На основании данных измерения, величина температурного коэффициента магнита, который в дальнейшем применялся в качестве отклоняющего, оказалась равной $26,2 \cdot 10^{-6}$ 1/град.

Погрешность измерения температурного коэффициента выражается формулой:

$$\frac{\Delta \mu}{\mu} = \frac{\Delta I_0}{I_0} + \frac{\Delta \alpha}{\alpha} + \frac{\Delta \alpha_0}{\alpha_0} + \frac{\Delta(\Delta t)}{\Delta t} + \frac{\Delta I}{I} = 2 \frac{\Delta I}{I} + 2 \frac{\Delta \alpha}{\alpha} + \frac{\Delta(\Delta t)}{\Delta t}$$

Как и при определении индукционного коэффициента, погрешность в измерении силы тока принята равной 0,5%, погрешность в отсчете отклонений по шкале — 0,4%.

Погрешность в измерении температуры подсчитываем, исходя из того, что

$$\frac{\Delta(\Delta t)}{\Delta t} = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_0}{t_1 - t_0}$$

где

t_1 — температура кипения воды,

t_0 — температура таяния льда,

Δt_1 и Δt_0 — погрешность при измерении t_1 и t_0 .

Считая, что при отсчете по термометру погрешность может достигать 0,1°, получаем

$$\frac{\Delta(\Delta t)}{\Delta t} = \frac{0,2}{100} = 0,2\%$$

Тогда

$$\frac{\Delta \mu}{\mu} = 2 \cdot 0,5 + 2 \cdot 0,4 + 0,2 = 2,0\%$$

что находится за пределами требуемой точности.

Экспериментальное определение напряженности магнитного поля электромагнитного эталона

Как уже указывалось выше, для экспериментального определения напряженности магнитного поля, создаваемого катушкой на пирексовом цилиндре электромагнитного эталона, необходимо измерить горизонтальную составляющую земного магнитного поля, а также угол отклонения магнита, подвешенного в центре катушки, когда по обмотке катушки протекает неизменный постоянный ток определенной величины.

Эксперименты производились в следующем порядке.

- а) Измерение горизонтальной составляющей земного магнитного поля

Магнит эллипсоидальной формы, помещенный на подвесном устройстве в домике (рис. 7), выводился из равновесия, после чего производились наблюдения периода колебания магнита в земном

магнитном поле. Для каждой серии наблюдений определяли 150 периодов колебаний магнита. Затем магнит снимался с подвешенного устройства и перед наблюдениями угла отклонения производилась юстировка электромагнитного эталона.

Прежде всего измерялось расстояние между центрами отклоняющего и подвешенного магнитов. Для этой цели использовалась специальная мера, представляющая собой стержень из инструментальной стали «серебрянки» диаметром 11 мм, длиной 1 м с заделанными в него четырьмя серебряными пластинками со штрихами. Расстояния между штрихами меры были измерены в лаборатории мер длины ВНИИМ.

Мера располагалась параллельно оси катушки электромагнитного эталона на стойках, которые специально для этой цели укреплялись на кронштейнах шин.

На шинах электромагнитного эталона, как это описано выше (см. рис. 1 и 2), имеются поворотные столики, на которых центрировались два латунных цилиндра со штрихами в середине. Мера помещалась несколько выше латунных цилиндров. Столики с цилиндрами перемещались до тех пор, пока штрихи на цилиндрах не совпадали со штрихами на мере. Наблюдения велись при помощи микроскопов. В момент измерений записывалась температура, знание которой было необходимо для подсчета расстояния между магнитами при температуре $t = 20^{\circ}\text{C}$.

Затем производилась юстировка самих магнитов. Вначале салазки обоих столиков устанавливались таким образом, чтобы они были на одной прямой, проходящей через ось вращения подвижной части электромагнитного эталона. После этого в домике, установленном в центральной части эталона, подвешивался другой магнит (подвижной), также эллипсоидальной формы, но меньших размеров, чем первый магнит. Этот последний (отклоняющий) помещался на салазки одного из столиков. Вращая подвижную часть прибора, устанавливали ее так, чтобы магниты были расположены взаимно перпендикулярно, как показано на рис. 5. Затем, перемещая при помощи крутильной головки подвижной магнит по вертикали, находили такое его положение, при котором угол отклонения был бы максимальным. Это означало, что оси подвижного и отклоняющего магнитов расположены в одной плоскости.

Далее, посредством одного из винтов крутильной головки подвеса подвижной магнит перемещался в горизонтальной плоскости в направлении, перпендикулярном к продолжению оси отклоняющего магнита. При этом добивались такого положения подвижного магнита, при котором угол его отклонения был максимальным. Последнее означало, что центр подвижного магнита лежит на продолжении магнитной оси отклоняющего магнита.

Для уменьшения погрешностей в измерении углов отклонений, происходящих от несовпадения центра отклоняющего магнита с осью вращения столика, необходимо было произвести центрировку

магнита на столике. Предварительно по лимбу фиксировалось положение подвижного магнита в плоскости магнитного меридиана. При этом отклоняющий магнит был снят с прибора. После этого отклоняющий магнит помещался на один из столиков прибора и измерялся угол отклонения подвижного магнита. Отсчет углов производился от ранее фиксированного положения магнита в плоскости магнитного меридиана. Затем столик вместе с магнитом поворачивался на 180° и снова измерялся угол отклонения. Если измеренные углы были не равны, то это указывало на несовпадение центра магнита с осью вращения столика. Перемещая магнит вдоль оси шины посредством упорных винтов салазок столика, добивались таких условий, чтобы при последующих повторных измерениях углы отклонений магнита были одинаковы.

Последнее означало, что центр отклоняющего магнита лежит на оси вращения столика.

Таким же образом производилась центрировка магнита на втором столике.

Заключительным этапом юстировки магнитов являлась установка подвижного магнита так, чтобы его центр совпадал с серединой расстояния между центрами столиков. Для этого отклоняющий магнит помещался на один из столиков и производился отсчет по лимбу, соответствующий углу отклонения подвижного магнита при взаимном расположении магнитов, согласно рис. 5. Затем отклоняющий магнит перекладывали на второй столик, оставляя прежнюю его ориентировку к магнитному меридиану, и производился снова отсчет по лимбу.

Путем перемещения подвижного магнита вдоль оси шин прибора добивались, чтобы отсчеты по лимбу были одинаковыми, что свидетельствовало о том, что центр подвижного магнита находился в середине расстояния между центрами столиков.

Измерения углов отклонений θ при определении горизонтальной составляющей напряженности земного поля производились следующим образом. Отклоняющий магнит помещался на один из столиков на шинах электромагнитного эталона северным концом к востоку. Вращая затем подвижную часть электромагнитного эталона вокруг вертикальной оси, устанавливали ее так, чтобы ось зрительной трубы совпадала с осью подвижного магнита, что достигалось совмещением вертикальной нити окуляра трубы с отражением ее от зеркала магнита. После этого производился отсчет по лимбу электромагнитного эталона.

Затем отклоняющий магнит поворачивался на той же шине северным концом к западу и производилась повторная установка прибора по оси подвижного магнита и вторичный отсчет по лимбу.

Разность двух отсчетов соответствовала двойному углу отклонения магнита. Поворот отклоняющего магнита на шине исключает погрешность, вызываемую несовпадением магнитного центра магнита с его геометрическим центром.

Для устранения погрешности, вызываемой несовпадением центра подвижного магнита с осью вращения прибора, отклоняющий магнит переключался на противоположную шину и производились повторные наблюдения угла отклонения.

Таким образом, угол отклонения θ определялся из четырех отсчетов по лимбу при четырех положениях отклоняющего магнита.

Горизонтальная составляющая земного магнитного поля вычислялась по формуле:

$$H_H = \pi \sqrt{\frac{2J_{20} \left(1 + \frac{p}{R^2} + \frac{q}{R^4}\right)}{R_{20}^3}} \cdot \frac{1}{T_0 \sqrt{\sin \theta}}, \quad (11)$$

где

- J_{20} — момент инерции подвесной системы с магнитом при 20°C ,
- R_{20} — расстояние между центрами магнитов при 20°C ,
- p и q — коэффициенты распределения для данной пары магнитов,
- T_0 — период колебания магнита,
- θ — угол отклонения подвижного магнита.

В формулу (11) должны быть введены поправки, обусловленные отклонением температуры при измерениях от 20°C , вариациями земного магнитного поля, индукционным действием этого поля на магнит, наличием момента кручения нити подвеса, конечной величиной амплитуды колебаний магнита, суточным ходом хронометра и погрешностями лимба эталона.

Все поправки, вызываемые вышеуказанными факторами, вводились при определении численных значений периода колебаний магнита. Величина периода колебаний магнита T_0 , с учетом поправок, определялась по формуле:

$$T_0 = T \left[1 - \frac{\mu + \gamma}{2} (t - 20^\circ) + \frac{\nu H_s}{2} + \frac{\delta H_s}{2H_s} + \frac{a}{2} \Delta' - \frac{\pi^2}{16} \right], \quad (12)$$

$$T = T_{\text{изм}} \left(1 - \frac{\Delta \beta}{100 \Delta \tau} + bs \right),$$

где

- T_0 — истинное значение периода колебаний магнита,
- $T_{\text{изм}}$ — измеренное значение периода,
- $\frac{\Delta \beta}{100 \Delta \tau} + bs$ — поправка на суточный ход хронометра,
- $\Delta \beta$ — разность двух отсчетов по шкале хроноскопа при сличении с хронометром,
- $\Delta \tau$ — промежуток времени между двумя показаниями хронометра, соответствующий двум отсчетам по шкале хроноскопа,
- s — суточный ход хронометра,
- $b = \frac{1}{24 \cdot 60 \cdot 60}$,

- μ — температурный коэффициент магнитного момента магнита,
 γ — температурный коэффициент момента инерции подвесной системы с магнитом,
 ν — индукционный коэффициент магнита,
 δH_x — вариация горизонтальной составляющей земного магнитного поля,
 H_x — горизонтальная составляющая земного магнитного поля,
 t — температура при колебаниях магнита,
 Δ' — угол кручения нити подвеса магнита в минутах,
 α — амплитуда колебаний магнита,

$$a = \frac{\sin 1'}{2\pi}.$$

Коэффициенты p и q для системы двух магнитов, применявшихся в данных экспериментах, были определены экспериментальным путем [Л. 5]. Числовые значения этих коэффициентов оказались равными $p = 26,84 \text{ см}^2$; $q = 450 \text{ см}^4$.

Расстояние между центрами магнитов R_{20} измерялось, как указано выше, при помощи специальной меры. Численное значение этого расстояния при 20°C оказалось равным

$$R_{20} = 29,9956 \text{ см.}$$

Значение момента инерции подвесной системы с магнитом J_{20} принято равным

$$J_{20} = 265,891 \text{ гсм}^2,$$

как среднее арифметическое из ряда значений, полученных экспериментальным путем.

Действительное значение углов отклонения подвешенного магнита определялось по формуле:

$$\theta = \frac{\varphi_2 + \varphi_3 - \varphi_1 - \varphi_4}{4} + \delta\theta_D + \delta\theta_H + \delta\theta_\nu + \delta\theta_t + \delta\theta_{\Delta'}.$$

где

	Шкала	Отклоняющий магнит
φ_1 — отсчет по лимбу при положении	О (восток)	О (восток)
φ_2 — то же	О »	W (запад)
φ_3 — »	W (запад)	W »
φ_4 —	W »	О (восток)

Значения для каждого из углов φ_1 , φ_2 , φ_3 и φ_4 определялись как среднее арифметическое из отсчетов по двум микроскопам лимба.

- $\delta\theta_D$ — поправка на вариации склонения земного поля,
 $\delta\theta_H$ — поправка на вариации горизонтальной составляющей земного поля,
 $\delta\theta_\tau$ — поправка на температуру,
 $\delta\theta_\nu$ — поправка на индукционное действие земного поля на магнит,
 $\delta\theta_L$ — поправка на шкалу лимба.

Поправки эти вычислялись по следующим формулам:

$$\delta\theta_D = \frac{\delta D_2 + \delta D_3 - \delta D_1 - \delta D_4}{4},$$

где δD_1 , δD_2 , δD_3 , δD_4 — вариации склонения при измерении углов φ_1 , φ_2 , φ_3 и φ_4 ;

$$\delta\theta_H = \frac{\delta H_1 + \delta H_2 + \delta H_3 + \delta H_4}{4H_1} \cdot \frac{\text{tg } \theta}{\sin 1'},$$

где δH_1 , δH_2 , δH_3 , δH_4 — вариации горизонтальной составляющей земного поля при измерении углов φ_1 , φ_2 , φ_3 , φ_4 ;

$$\delta\theta_\tau = (\mu + 3\beta) (\tau - 20^\circ) \frac{\text{tg } \theta}{\sin 1'},$$

μ — температурный коэффициент магнитного момента магнита;
 β — температурный коэффициент линейного расширения материала шин эталона;
 τ — температура при измерении углов отклонения;

$$\delta\theta_\nu = \nu H \sin \theta \frac{\text{tg } \theta}{\sin 1'}, \quad \delta\theta_L = \frac{\delta\varphi_2 + \delta\varphi_3 - \delta\varphi_1 - \delta\varphi_4}{4},$$

где ν — индукционный коэффициент магнита; $\delta\varphi_1$, $\delta\varphi_2$, $\delta\varphi_3$, $\delta\varphi_4$ — поправки на шкалу лимба.

б) Измерение напряженности магнитного поля катушки на цилиндре электромагнитного эталона

Для измерения напряженности магнитного поля катушки на цилиндре электромагнитного эталона, в домике эталона подвешивался цилиндрический магнит малых размеров (длина 3,0 см, диаметр 0,5 см) с учетом того, чтобы магнит находился в однородном магнитном поле. После установки магнита в центре катушки пропускался по обмотке катушки некоторый ток, поддерживавшийся строго постоянным в процессе дальнейших измерений. Под действием магнитного поля катушки магнит отклонялся от магнитного

меридиана. Для измерения угла отклонения магнита катушку поворачивали вокруг вертикальной оси, добивались такого ее положения, когда при равновесии магнита его магнитная ось была перпендикулярна оси катушки и производили отсчет по лимбу эталона. Далее, переключив направление тока в обмотке катушки, подобным же образом снова измеряли угол отклонения магнита, делая отсчет по лимбу эталона.

Питание катушки током и измерение тока производилось с помощью описанной выше электронизмерительной установки.

Напряженность магнитного поля катушки H_K вычислялась по формуле:

$$H_K = (H_z + \delta H_{cp}) \sin \theta_0,$$

где

$$\theta_0 = \frac{\psi_2 - \psi_1}{2} + \delta \theta_D + \delta \theta_L,$$

δH_{cp} — поправка на вариации горизонтальной составляющей земного поля,

ψ_1 — отсчет по лимбу эталона при одном направлении тока в обмотке катушки,

ψ_2 — отсчет по лимбу эталона при противоположном направлении тока в обмотке катушки,

$\delta \theta_D$ — поправка на вариации склонения земного поля,

$\delta \theta_L$ — поправка на шкалу лимба;

$$\delta H_{cp} = \frac{\delta H_1 + \delta H_2}{2},$$

где δH_1 и δH_2 — вариации горизонтальной составляющей земного поля при измерении ψ_1 и ψ_2 ;

$$\delta \theta_D = \frac{\delta D_2 - \delta D_1}{2},$$

где δD_1 и δD_2 — вариации склонения земного поля при измерении ψ_1 и ψ_2 ;

$$\delta \theta_L = \frac{\delta \psi_2 - \delta \psi_1}{2},$$

где $\delta \psi_1$ и $\delta \psi_2$ — поправки на шкалу лимба при измерении ψ_1 и ψ_2 .

в) Определение постоянной катушки на цилиндре эталона

Постоянная K катушки на цилиндре эталона, т. е. напряженность магнитного поля, создаваемого катушкой при силе тока в ее обмотке, равной единице, определялась по формуле:

$$K = \frac{H_K}{I} = \frac{H_K R_N}{E_N}, \quad (13)$$

где

- I — сила тока в обмотке катушки,
 E_N — электродвижущая сила двух нормальных элементов,
 включенных последовательно при температуре t_E ;
 R_N — сопротивление образцовой катушки сопротивления при
 температуре t_R .

Исходя из формул (11), (12) и (13), получаем следующее выражение для средней квадратичной погрешности определения постоянной катушки:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta K}{K}\right)^2 = & \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta J}{J}\right)^2 + \frac{9}{4} \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + \frac{1}{4} \operatorname{ctg}^2 \theta (\Delta \theta)^2 + \frac{1}{4} \frac{(\Delta p)^2}{R^4} + \\ & + \frac{(\mu + \gamma)^2}{4} (\Delta t)^2 + \frac{(\mu + 3\beta)^2}{4} (\Delta \varepsilon)^2 + \frac{H^2}{4} (1 + \sin \theta)^2 (\Delta \nu)^2 + \\ & + \frac{\nu^2}{4} (1 + \sin \theta)^2 (\Delta H)^2 + \frac{a^2}{4} [\Delta(\Delta')]^2 + b^2 (\Delta s)^2 + \left(\frac{a \sin^2 \theta \Delta \alpha}{8}\right)^2 + \\ & + \frac{5}{4} \left[\frac{\Delta(\delta H)}{H}\right]^2 + \left[\frac{\Delta(\delta \beta)}{100 \Delta \varepsilon}\right]^2 + \left(\frac{\Delta E_N}{E_N}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_N}{R_N}\right)^2 + (\operatorname{ctg} \theta \Delta \theta)^2. \quad (14) \end{aligned}$$

В условиях наших экспериментов погрешности определения отдельных величин, входящих в формулу (14), имели следующие значения.

Как было установлено выше, относительная погрешность определения момента инерции магнита с подвесной системой составляет 0,007%; таким образом, $\Delta J = 0,018 \text{ гсм}^2$. Погрешность в определении периода колебаний магнита равна $\Delta T = 2 \cdot 10^{-5} \text{ сек}$. Расстояние между магнитами было измерено с погрешностью $\Delta R = 5 \cdot 10^{-4} \text{ см}$. Погрешность в определении углов отклонения магнита, отсчитываемых по лимбу эталона, оценивается нами в $15''$, т. е. $\Delta \theta = \Delta \theta' = 15''$, исходя из точности установки магнита по магнитному меридиану и точности определения поправок на склонение по записи на ленте самопишущего устройства вариометров.

Погрешность в определении температуры принята нами в $0,1^\circ$. Температура измерялась ртутными термометрами с ценой наименьшего деления $0,05^\circ$. Однако погрешность в определении температуры принимаем несколько большей, $\Delta t = 0,1^\circ$, имея в виду, что между показанием термометра и действительной температурой магнита, тел инерции и других элементов эталона будет некоторое расхождение.

Погрешность определения коэффициента распределения ρ принята, на основании опытных данных, равной $\Delta \rho = 0,05 \text{ см}^2$. Точность же определения второго коэффициента q не учитывалась, как имеющая величину, лежащую за пределами интересующей нас точности измерений.

Погрешности измерения индукционного и температурного коэффициентов магнитного момента, как указано выше, оцениваются величинами $\Delta\gamma = 6 \cdot 10^{-5}$ и $\Delta\mu = 4 \cdot 10^{-6}$.

Погрешность в определении вариаций горизонтальной составляющей земного магнитного поля составляет $\Delta H = 0,25 \cdot 10^{-5}$ эрстеда.

Погрешность в определении суточного хода хронометра, по данным лаборатории времени ВНИИМ, составляет $\Delta s = 0,08$ сек.

Амплитуда колебаний магнита определялась с погрешностью $\Delta\alpha = 10'$, а угол кручения подвеса — с погрешностью $\Delta(\Delta') = 0,2$.

Для сопротивления образцовой катушки сопротивление погрешность составляет $\Delta R_N = 1 \cdot 10^{-5}$ ом при номинальном значении сопротивления $R_N = 10$ ом, а для э. д. с. нормальных элементов погрешность $\Delta E_N = 1 \cdot 10^{-6}$ в.

Относительная погрешность сличения отсчетов времени по шкале хроноскопа с хронометром составляет $\frac{\Delta(\Delta s)}{100 \Delta s} = 3 \cdot 10^{-6}$.

Таблица 5

Результаты экспериментального определения напряженности магнитного поля и постоянной катушки на цилиндре электромагнитного эталона

Номера серий	Напряженность поля H_K катушки, э	Э. д. с. нормальных элементов E_N [в]	Сопротивление образцовой катушки сопротивления R_N [ом]	Постоянная катушки K [э/а]
1	0,122191	2,037726	10,00085	0,59969
2	0,122177	2,037725	10,00085	0,59963
3	0,122209	2,037726	10,00088	0,59978
4	0,122208	2,037725	10,00090	0,59978
5	0,122207	2,037723	10,00091	0,59978
6	0,122137	2,037611	10,00194	0,59953
7	0,122167	2,037610	10,00193	0,59967
8	0,122152	2,037607	10,00192	0,59960
9	0,122189	2,037605	10,00192	0,59979
10	0,122196	2,037602	10,00192	0,59982
11	0,122159	2,037599	10,00192	0,59964
12	0,122228	2,037672	10,00150	0,59993
13	0,122215	2,037671	10,00148	0,59987
14	0,122205	2,037689	10,00149	0,59981
15	0,122245	2,037688	10,00150	0,59993
16	0,122222	2,037685	10,00151	0,59989
17	0,122245	2,037682	10,00155	0,59995
18	0,122189	2,037669	10,00143	0,59973
19	0,122193	2,037667	10,00147	0,59976
20	0,122161	2,037666	10,00155	0,59961
21	0,122198	2,037666	10,00158	0,59979
22	0,122193	2,037664	10,00161	0,59977

Подставляя эти значения погрешностей в формулу (14), получаем, что средняя квадратичная погрешность определения постоянной катушки на пирексовом цилиндре равна:

$$\frac{\Delta K}{K} = 8 \cdot 10^{-5},$$

или

$$\frac{\Delta K}{K} = 0,008 \%$$

Для экспериментального определения постоянной катушки на пирексовом цилиндре было произведено 22 серии измерений.

Результаты этих измерений приведены в табл. 5.

Среднее арифметическое значение постоянной катушки

$$K = 0,59976 \pm 0,00002 \text{ в/а.}$$

На основании этих данных постоянная катушки на пирексовом цилиндре установлена равной

$$K = 0,59976 \pm 0,00002 \text{ в/а.}$$

Вероятная погрешность результата определения постоянной катушки оценивается величиной

$$\frac{\Delta K}{K} = 0,0033 \%$$

Достигнутая точность полностью соответствует тем требованиям, которые были поставлены при выполнении данной работы.

Расчет напряженности магнитного поля катушки на цилиндре

Катушка на пирексовом цилиндре, при протекании тока через ее обмотку, должна обеспечивать достаточно однородное магнитное поле в центральной части пространства между двумя половинами обмотки в зоне расположения подвижного магнита.

Для обеспечения однородности магнитного поля такой катушки расстояние AB между средними плоскостями обеих обмоток катушки должно быть равным среднему радиусу катушки R (рис. 11). Составляющие по осям X и Y напряженности магнитного поля в какой-либо точке P , находящейся на расстоянии r от центра катушки, определяются формулами [Л. 2]:

$$\begin{aligned} H_x &= \frac{\omega I}{R} \left[0,44959 \left(1 - \frac{\xi^2}{60R^2} \right) + 0,0035967 \frac{31\xi^2 - 36r^2}{R^4} (3 \cos^2 \varphi - 1) - \right. \\ &\quad \left. - 0,06474 \frac{r^4}{R^4} (35 \cos^4 \varphi - 30 \cos^2 \varphi + 3) \right], \\ H_y &= \frac{\omega I}{R} \sin \varphi \cos \varphi \left[0,06474 \frac{r^4}{R^4} (28 \cos^2 \varphi - 12) - \right. \\ &\quad \left. - 0,0035967 \frac{31\xi^2 - 36r^2}{R^4} r^2 \right], \end{aligned} \quad (15)$$

где

H_x — составляющая напряженности поля по оси X ,

H_y — составляющая напряженности поля по оси Y ,

φ — угол, составляемый вектором r с осью X ,

R — средний радиус катушки,

w — число витков катушки,

ξ — толщина обмотки катушки,

η — ширина обмотки катушки.

Если заменить в этих формулах полярные координаты точки P прямоугольными координатами x и y , то формулы примут вид:

$$H_x = \frac{wf}{R} \left[0,44959 \left(1 - \frac{\xi^2}{60R^2} \right) + 0,0047953 \frac{31\xi^2 - 36\eta^2}{R^4} (2x^2 - y^2) - 0,06474 \frac{1}{R^4} (8x^4 - 24x^2y^2 + 3y^4) \right],$$

$$H_y = \frac{wf}{R^3} xy [0,025896 (4x^2 - 3y^2) - 0,0035967 (31\xi^2 - 36\eta^2)].$$

В центре катушки ($x = 0$; $y = 0$) напряженность магнитного поля определяется выражением:

$$H = 0,44959 \frac{wf}{R} \left(1 - \frac{\xi^2}{60R^2} \right),$$

где H — напряженность поля в эрстедах,

I — сила тока в амперах.

Отсюда постоянная катушки

$$K = \frac{H}{I} = 0,44959 \frac{w}{R} \left(1 - \frac{\xi^2}{60R^2} \right).$$

При изготовлении катушки электромагнитного эталона и последующей поверке ее геометрических размеров были получены, как это указано выше, следующие данные:

Внешний диаметр обмотки катушки

$$2R_{\text{вн}} = 30,0619 \text{ см.}$$

Диаметр проволоки обмотки

$$d = 0,0974 \text{ см.}$$

Расстояние между средними плоскостями обмоток катушки

$$AB = 14,9967 \text{ см.}$$

Средний шаг обмотки

$$h = 0,1202 \text{ см.}$$

Общее число витков обмотки

$$\omega = 20.$$

Пользуясь этими данными, находим:

$$R = \frac{2R_{\text{вн}} - d}{2} = \frac{30,0619 - 0,0974}{2} = 14,9822 \text{ см.}$$

$$\xi = d = 0,0974 \text{ см.}$$

Вычисленная, исходя из этих данных, постоянная катушки оказалась равной

$$K = 0,60016 \text{ в/а.}$$

В эту величину необходимо внести поправку вследствие неравенства AB и R . Погрешность, обусловленную этим неравенством, можно определить, пользуясь приближенной формулой для расчета постоянной катушки:

$$K = \frac{0,2 \pi R^2 \omega}{(R^2 + z^2)^{3/2}}, \quad (16)$$

где z — половина расстояния AB .

Относительная погрешность может быть получена после дифференцирования формулы (16) по z и деления на величину K . Тогда

$$\frac{\Delta K}{K} = -\frac{3z \Delta z}{R^2 + z^2},$$

или, заменяя R на $2z$, находим

$$\frac{\Delta K}{K} = -\frac{3}{5} \frac{\Delta z}{z}.$$

Поправка ΔK , которую необходимо ввести в расчет постоянной катушки, будет равна:

$$\delta K = -\frac{3}{5} \frac{\Delta z}{z} K.$$

Тогда действительная постоянная катушки

$$K_0 = K \left(1 - \frac{3}{5} \frac{\Delta z}{z} \right). \quad (17)$$

Согласно данным измерения геометрических размеров катушки с обмоткой, имеем:

$$\Delta z = \frac{AB - R}{2} = \frac{14,9967 - 14,9822}{2} = 0,0072 \text{ см.}$$

$$z = 7,4983 \text{ см.}$$

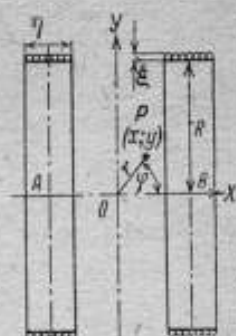


Рис. 11. Расположение обмоток катушки на цилиндре электромагнитного эталона

Подставляя в формулу (17) численные значения K , z и Δz , находим для постоянной катушки на цилиндре величину, равную

$$K_0 = 0,59982 \text{ э/а.}$$

Используя формулу (15), можно вычислять напряженность поля в любой точке в центральной части катушки.

При экспериментальном определении напряженности поля подвижной магнит занимает некоторое пространство внутри катушки, где поле должно быть однородным.

Вычислим среднюю величину напряженности поля в этом пространстве.

Экспериментальное определение напряженности поля нами производилось путем измерения угла отклонения, соответствующего условию равновесия магнита, как показано на рис. 4. Подвижной магнит при этом располагался вдоль оси Y (применительно к рис. 11). Составляющая H_x вдоль оси Y , для $x = 0$, согласно формуле (15), выражается зависимостью:

$$H_x = \frac{\omega I}{R} \left[0,44959 \left(1 - \frac{\xi^2}{60R^2} \right) - 0,0047953 \frac{31\xi^2 - 36\eta^2}{R^4} y^2 - 0,19422 \frac{y^4}{R^4} \right].$$

Среднее значение напряженности поля по всей длине магнита, при очень малом сечении магнита, определяется из выражения:

$$H_{x \text{ ср}} = \frac{1}{y_1} \int_0^{y_1} H_x dy,$$

или

$$H_{x \text{ ср}} = \frac{\omega I}{R} \left[0,44959 \left(1 - \frac{\xi^2}{60R^2} \right) - 0,0015984 \frac{31\xi^2 - 36\eta^2}{R^4} y_1^2 - \frac{0,03884}{R^4} y_1^4 \right].$$

Для подвижного магнита длиной $2y_1 = 3 \text{ см}$ среднее значение напряженности поля при силе тока в обмотке катушки в 1 а оказалось равным

$$H_{x \text{ ср}} = 0,59982 \text{ э/а.}$$

Произведенные расчеты показывают, что в пределах тысячной доли процента обеспечивается однородность поля в зоне расположения подвижного магнита.

Расчеты постоянной катушки на цилиндре эталона являются также подтверждением надежности данных для той же катушки, полученных экспериментальным путем. Расхождение между расчетом и экспериментом меньше $0,01\%$.

Определение постоянной катушки на фланцах электромагнитного эталона

Для передачи образцовым мерам значения напряженности магнитного поля катушки на пирексовом цилиндре, в электромагнитном эталоне предусмотрена вспомогательная катушка, намотанная на два пирексовых кольцевых фланца эталона (см. рис. 2 и 3).

Постоянная этой катушки определялась путем сличения с напряженностью поля катушки на пирексовом цилиндре. При сличении измерялось отношение сил токов, протекающих по обмоткам катушек K_1 и K_2 на цилиндре и на фланцах, включенных навстречу друг другу (рис. 12). При равенстве напряженностей магнитных полей, создаваемых этими катушками, магнит NS , подвешенный в центре этих катушек, должен оставаться в плоскости магнитного меридиана.

Сила тока в катушках определялась при помощи компенсатора путем измерения падения напряжения на зажимах образцовых катушек сопротивления R_1 и R_2 .

В момент равновесия подвижного магнита

$$H_1 = H_2, \text{ или } K_1 I_1 = K_2 I_2,$$

где H_1 и H_2 — напряженности магнитных полей, создаваемых катушками,

K_1 и K_2 — постоянные катушек,

I_1 и I_2 — силы токов, протекающих по обмоткам катушек.

Значки 1 и 2 относятся соответственно к катушке на цилиндре и к катушке на фланцах.

Таким образом, искомая величина $K_2 = K_1 \frac{I_1}{I_2}$ или $K_2 = \frac{U_1}{U_2} \cdot \frac{R_2}{R_1}$, где U_1 и U_2 — напряжения на зажимах образцовых катушек сопротивления, измеренные компенсатором.

В табл. 6 приведены результаты измерений и подсчеты постоянной катушки на фланцах.

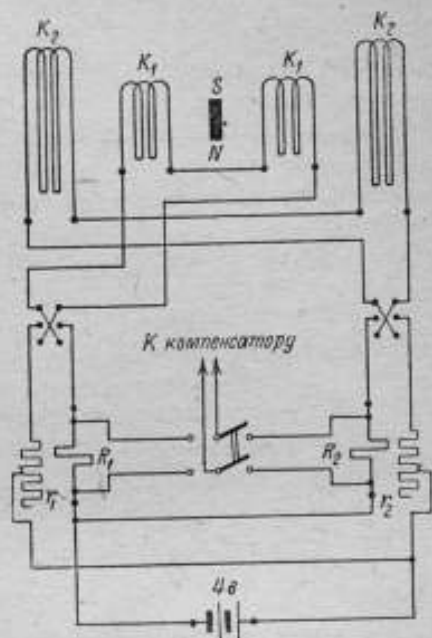


Рис. 12. Электрическая схема для определения постоянной катушки на фланцах электромагнитного эталона

Определение постоянной катушки на фланцах электромагнитного эталона

U_1 [в]	U_2 [в]	R_1 [ом]	R_2 [ом]	I_1 [а]	I_2 [а]	$\frac{K_2}{K_1} = \frac{I_1}{I_2}$	K_2 [э/а]
0,23440	0,10183	1,0001450	9,996982				
0,23440	0,10183	1,0001450	9,996982	0,23437	0,010186	23,0090	13,800
0,23455	0,10186	1,0001450	9,996982	0,23437	0,010186	23,0090	13,800
0,23450	0,10185	1,0001450	9,996982	0,23451	0,010189	23,0159	13,804
				0,23447	0,010188	23,0143	13,803

Среднее арифметическое значение постоянной $K_2 = 13,802$ э/а

Погрешность определения постоянной катушки оценивается формулой:

$$\left(\frac{\Delta K_2}{K_2}\right)^2 = \left(\frac{\Delta K_1}{K_1}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta U}{U}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta R_{20}}{R_{20}}\right)^2 + (\alpha_1 + \alpha_2)^2 \Delta t^2,$$

где α_1 и α_2 — соответственно температурные коэффициенты образцовых катушек сопротивления R_1 и R_2 .

R_{20} — сопротивление образцовой катушки при 20° С.

Величина погрешности сопротивления R_{20} принята нами равной

$$\Delta R_{20} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ ом.}$$

Температура измерялась с точностью до 0,05°, т. е.

$$\Delta t = 0,05^\circ.$$

При измерениях на компенсаторе погрешность измерения напряжения принята равной

$$\Delta U = 1 \cdot 10^{-5} \text{ в.}$$

Следовательно, погрешность определения постоянной катушки на фланцах может быть оценена величиной

$$\frac{\Delta K_2}{K_2} = 1 \cdot 10^{-4}, \text{ т. е. } 0,01\%.$$

Применение электромагнитного эталона в качестве эталона единицы магнитного потока

Для использования электромагнитного эталона в качестве эталона единицы магнитного потока предусматривается вторичная катушка с известным числом витков, равных по площади. Вторичная катушка имеет обмотку, навитую на цилиндрический мраморный каркас, из изолированного медного провода диаметром по меди 0,05 мм. Число витков обмотки равно 280 и среднее сечение витка —

$9,6528 \text{ см}^3$. Катушка эта располагается в центральной части катушки на цилиндре электромагнитного эталона коаксиально с ней. Размеры вторичной катушки рассчитаны так, чтобы в объеме, ею занимаемом, поле, создаваемое катушкой на цилиндре эталона, было в достаточной степени однородным. Как показывают подсчеты, напряженность поля в объеме, занимаемом вторичной катушкой, изменяется в пределах не больше $0,004\%$.

Постоянную эталона магнитного потока определяют путем вычисления магнитного потока, сцепляющегося с витками вторичной катушки, пользуясь значениями постоянной эталона напряженности магнитного поля и площади витков вторичной катушки, т. е. также в абсолютных единицах.

Заключение

Выполненная работа является завершением комплекса научных и инженерных изысканий по созданию высокой метрологической основы в области магнитных измерений.

Полученные результаты показывают, что поставленная задача успешно выполнена. Создан эталон, воспроизводящий единицу напряженности магнитного поля и единицу магнитного потока.

Наряду с этим, тот же прибор — электромагнитный эталон — допускает производить измерения магнитных моментов магнитов группового эталона единицы магнитного момента. Наконец, на том же приборе производятся измерения горизонтальной составляющей земного магнитного поля.

Экспериментальные исследования показали, что примененная методика и аппаратура в полной мере удовлетворили требованиям.

Особо должно быть отмечено, что до последнего времени обширные области магнитных измерений, связанные с изучением элементов земного магнитного поля, находились по причинам, указанным в введении к данной статье, вне сферы метрологического обслуживания. В настоящее же время и эти области, имеющие крупное народнохозяйственное значение, могут быть включены в орбиту общегосударственного метрологического обслуживания.

Укажем также и на то, что ВНИИМ в международной метрологической работе в области магнитных эталонов явился не только пионером, но и единственным национальным метрологическим учреждением, успешно осуществившим воспроизведение магнитных единиц в виде эталонов в абсолютной системе. Это особенно существенно и потому, что в 1948 г. в СССР осуществлен переход на абсолютную систему электрических и магнитных единиц.

Значение этой работы заключается также и в том, что созданы необходимые предпосылки для дальнейшего развития работ по воспроизведению единицы силы электрического тока в абсолютной мере через напряженность магнитного поля. Этот метод должен дать дополнительные подтверждения достоверности результатов воспроизведения абсолютного ампера.

В заключение необходимо сказать, что работа по созданию магнитного эталона проводилась под руководством проф. Б. М. Яновского и проф. Е. Г. Шрамкова почти всем коллективом сотрудников магнитной лаборатории.

Проф. Б. М. Яновскому принадлежит идея создания электромагнитного эталона и принцип его конструкции, а также теоретическая разработка и руководство магнитными измерениями.

Проф. Е. Г. Шрамков являлся руководителем работ по электрическим измерениям и ему же принадлежит разработка схемы и приборов для этих измерений.

Под руководством ст. научного сотрудника Г. К. Ягола и при его непосредственном участии проводился целый ряд магнитных и электрических измерений и им же был разработан метод измерения периода колебаний при помощи хроноскопа.

Магнитные и электрические измерения проводились сотрудниками лаборатории: Е. А. Соколовой, А. М. Ермаковой, Н. Г. Чернышевой и И. А. Ораловой. Установка вариационных приборов и наблюдения с ними производились научным сотрудником И. Я. Бедкер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. Г. Шрамков. Программа работ эталонной магнитной лаборатории. Сообщения Главной палаты мер и весов СССР Консультативному комитету по электричеству и фотометрии. ВИС № 100, изд. «Стандартизация и Рационализация», 1932.

2. Б. М. Яновский. Катушка Гельмгольца как эталон напряженности магнитного поля и магнитного потока. Изв. ГГО, № 3, 1932.

3. Б. М. Яновский. К вопросу об установлении эталонов магнитного момента в абсолютных единицах. Труды ВИС, вып. 1 (17), 1934.

4. Б. М. Яновский. Магнитографы. Труды ВНИИМ, вып. 18 (34), 1938.

5. Б. М. Яновский. К вопросу о методике абсолютных магнитных измерений. Труды ВНИИМ, вып. 18 (34), 1938.

6. Е. Г. Шрамков. К вопросу об установлении эталонов магнитных единиц. Лениздат, 1939.

7. Е. Г. Шрамков. Магнитные эталоны, «Электричество» № 7, 1946.

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРИОДА КОЛЕБАНИЙ МАГНИТА

Г. К. ЯГОЛА

Для измерений горизонтальной составляющей земного магнитного поля находит применение абсолютный метод, когда напряженность магнитного поля определяется через массу, длину и время. Метод этот заключается в измерениях: а) периода колебаний магнита в горизонтальной плоскости и б) угла отклонения некоторого другого магнита (отклоняемого) под действием первого (отклоняющего).

Связь между горизонтальной составляющей земного поля, периодом колебаний магнита и углом отклонения отклоняемого магнита выражается формулой [Л. 1]:

$$H = \pi \sqrt{\frac{2J \left(1 + \frac{p}{R^2} + \frac{q}{R^4}\right)}{R^2}} \cdot \frac{1}{T \sqrt{\sin \theta}}, \quad (1)$$

где

- H — горизонтальная составляющая земного поля,
- J — момент инерции подвесной системы с магнитом,
- p и q — коэффициенты распределения магнитов,
- R — расстояние между центрами отклоняющего и отклоняемого магнитов,
- T — период колебаний магнита,¹
- θ — угол отклонения отклоняемого магнита.

Согласно формуле (1), для определения H необходимо знать постоянные величины J , R , p и q и измерять с требуемой точностью T и θ .

Формула (1) справедлива, если измерения производятся при постоянной температуре, в отсутствии вариаций земного поля; при бесконечно малой амплитуде колебаний магнита и если нить подвеса магнита не обладает кручением.

В действительности эти условия не имеют места и поэтому приходится вводить соответствующие поправки.

¹ Величина T определяется промежутком времени между двумя последовательными прохождениями оси магнита через плоскость магнитного меридиана.

При точных измерениях горизонтальной составляющей H большие трудности вызывает определение (с необходимой точностью) периода колебаний магнита T .

Целью настоящей статьи является изложение методики измерения периода T , примененной нами при работе по исследованию эталона магнитных единиц.

В этих исследованиях мы отказались от визуального метода измерения периода колебаний магнита (на «зрение и слух»), который обычно применяется в магнитных обсерваториях. Основным и существенным недостатком этого метода является его субъективность и, как следствие, личные ошибки наблюдателя. Кроме того, для определения периода колебаний магнита с необходимой точностью требуется большое число наблюдений со значительной затратой времени и исключительная опытность наблюдателя.

В связи с этим возникла необходимость разработки такой методики измерения периода, которая позволила бы объективным путем производить отсчеты моментов времени, соответствующих каждому периоду колебаний магнита.

Одновременно была поставлена задача повышения точности отсчетов моментов времени, по сравнению с отсчетами визуальным методом.

Оказалось возможным для данной цели применить измерительную установку с хроноскопом, имеющим световой указатель, вспышка которого управляется фотоэлектрической схемой.

Описание измерительной установки

Принципиальная схема установки для измерения периода колебаний магнита изображена на рис. 1.

Свет от осветителя 1 попадает на зеркало 2 подвесной системы магнита 3. В момент прохождения магнита через магнитный меридиан отраженный луч света падает на фотоэлемент 4 фотореле 5. Фотореле, получив при этом импульс тока, производит кратковременное замыкание цепи сетки тиратрона 6, управляющего питанием вращающейся неоновой лампы 7. Происходящая при этом кратковременная вспышка неоновой лампы в виде тонкого светового указателя фиксирует момент времени на неподвижной шкале хроноскопа 8.

Шкала хроноскопа разделена на 100 делений с ценой наименьшего деления в 0,01 сек (рис. 2).

Отсчет времени по световому указателю на шкале производится с точностью до 0,002 сек.

Неоновая лампа скреплена с диском 9, вращающимся в непосредственной близости от шкалы и в плоскости, параллельной плоскости шкалы. Диск приводится во вращение синхронным двигателем 10, питаемым переменным током частотой 500 μ от высокостабильного камертонного генератора.

Схема фотореле 5 и тиратронная схема 6 изображены на рис. 3 и 4.

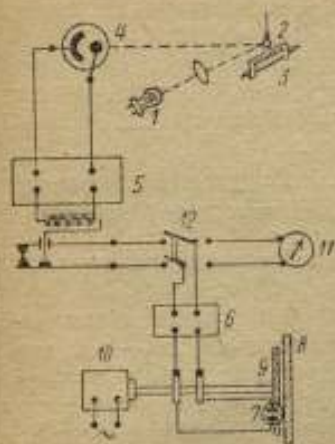


Рис. 1. Схема измерительной установки для определения периода колебаний магнита

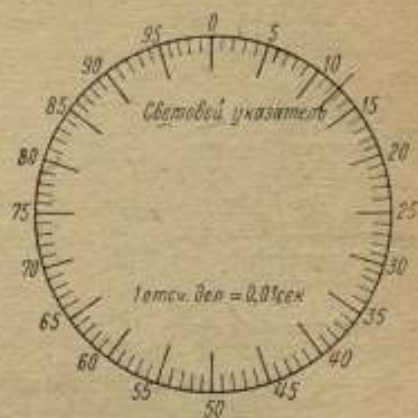


Рис. 2. Шкала хроноскопа

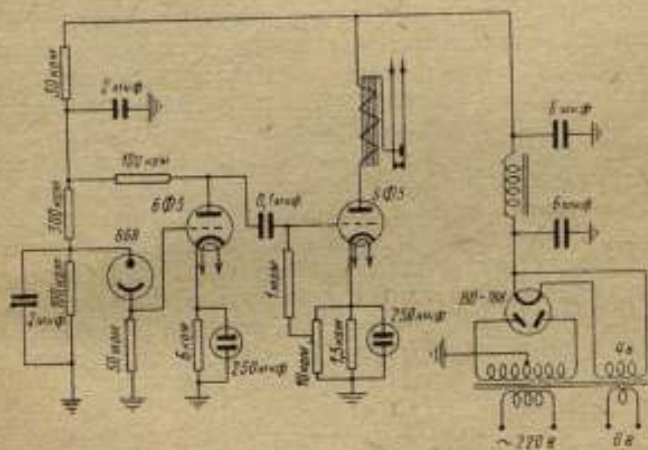


Рис. 3. Схема фотореле

Для контроля хода хроноскопа (определения суточного хода и постоянства скорости вращения диска) при измерениях производится сличение шкалы хроноскопа с секундными сигналами контактного хронометра 11 (рис. 1), который присоединяется переключателем 12. Для этой же цели в отдельных случаях нами использовались секундные сигналы времени, подаваемые радиопередатчиком ВНИИМ.

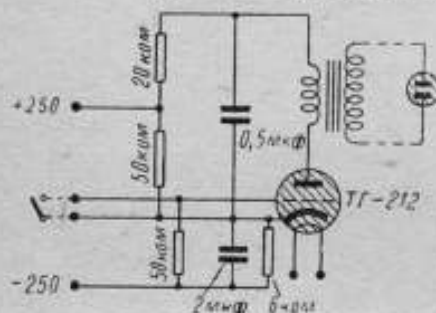


Рис. 4. Схема питания светового указателя хроноскопа

Определение периода колебаний магнита

Численная величина одного периода колебаний магнита определяется из серии наблюдений 140—200 периодов путем деления промежутков времени, соответствующих 70—100 периодам, на число периодов.

В качестве примера в табл. 1 приведены результаты определения периода колебаний магнита из одной серии наблюдений.

В графах 1 и 3 табл. 1 приведены порядковые номера прохождения оси магнита через плоскость магнитного меридиана и в графах 2 и 4 соответствующее им время, отсчитанное по шкале хроноскопа. Непосредственно на шкале хроноскопа отсчитываются десятичные доли секунды, целые же значения секунд вводятся в запись путем прибавлений величины периода следующим образом.

Первый отсчет времени принимается с нулевым значением в целой части числа. Затем к нему прибавляется значение периода, предварительно измеренное секундомером с точностью до 0,1 сек. Из полученного числа берется только целая часть и приписывается перед значением второго отсчета по шкале хроноскопа и т. д.

Так, например, в табл. 1 показаны моменты времени, в которых десятичные доли секунд отсчитаны по шкале хроноскопа, а целые знаки получены путем последовательного прибавления 6,9 сек, примерно, равным удвоенному значению периода.

Среднее арифметическое значение периода колебаний магнита, вычисленное по схеме, показанной в табл. 1, приводится к средне-суточному времени, согласно формуле:

$$T = T_{cp} \left(1 - \frac{\Delta\beta}{100 \Delta\tau} + bs \right), \quad (2)$$

где

- T — истинное значение периода колебаний магнита,
- T_{cp} — период, вычисленный из серии наблюдений,
- $\Delta\beta$ — изменение показаний хроноскопа за время $\Delta\tau$ при сличении его с контактным хронометром,

Таблица I

Результаты определения периода колебаний магнита из одной серии наблюдений

Номера прохождения магнита через меридиан	Время, сек	Номера прохождения магнита через меридиан	Время, сек	Промежуток времени, соответствующий $72T$ [сек]	Период T [сек]
1	0,465	73	249,546	249,081	3,45946
3	7,383	75	256,462	249,079	3,45943
5	14,304	77	263,390	249,084	3,45950
7	21,220	79	270,300	249,080	3,45944
9	28,147	81	277,217	249,070	3,45938
11	35,070	83	284,137	249,067	3,45926
13	41,995	85	291,063	249,068	3,45928
15	48,913	87	297,987	249,074	3,45936
17	55,827	89	304,910	249,083	3,45949
19	62,747	91	311,827	249,080	3,45944
21	69,667	93	318,740	249,073	3,45935
23	76,580	95	325,657	249,077	3,45940
25	83,503	97	332,573	249,070	3,45930
27	90,420	99	339,490	249,070	3,45930
29	97,340	101	346,407	249,067	3,45926
31	104,260	103	353,330	249,070	3,45930
33	111,180	105	360,247	249,067	3,45926
35	118,106	107	367,160	249,054	3,45908
37	125,022	109	374,080	249,058	3,45914
39	131,942	111	381,005	249,063	3,45921
41	138,855	113	387,923	249,068	3,45928
43	145,772	115	394,837	249,065	3,45924
45	152,690	117	401,753	249,063	3,45921
47	159,610	119	408,672	249,062	3,45919
49	166,531	121	415,593	249,062	3,45919
51	173,447	123	422,517	249,070	3,45930
53	180,360	125	429,430	249,070	3,45930
55	187,278	127	436,348	249,070	3,45930
57	194,196	129	443,267	249,071	3,45932
59	201,117	131	450,191	249,074	3,45936
61	208,044	133	457,107	249,063	3,45921
63	214,970	135	464,030	249,060	3,45917
65	221,880	137	470,950	249,070	3,45930
67	228,797	139	477,880	249,083	3,45949
69	235,712	141	484,800	249,088	3,45955
71	242,628	143	491,710	249,082	3,45947
73	249,546	145	498,640	249,094	3,45960

Среднее арифметическое значение периода $T_{cp} = 3,45932 \pm 0,00002$ сек.

s — суточный ход хронометра,

b — коэффициент, равный $\frac{1}{24 \cdot 60 \cdot 60}$.

Анализ результатов измерения, получаемых по этому методу, показывает, что вероятная погрешность определения периода колебаний магнита, вычисленного из одной серии наблюдений, составляет $0,0006\%$.

Выводы

Практическое применение фотоэлектрической установки с хроноскопом показало, что выбранная методика измерения периода колебаний магнита имеет ряд преимуществ по сравнению с ранее применявшимися методами, а именно:

1. Значительное сокращение времени, необходимого для одной серии наблюдений колебаний магнита. Простота измерительных операций.

2. Независимость результатов измерения от опытности и личных особенностей наблюдателя, благодаря чему исключаются личные погрешности наблюдателя.

3. Высокая точность определения периода колебаний магнита, обусловленная тем, что данный метод позволяет фиксировать моменты времени с точностью до $0,002$ сек.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. М. Яновский, Земной магнетизм, 1941.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ОБРАЗЦОВ МАГНИТНЫХ СТАЛЕЙ

Е. Т. ЧЕРНЫШЕВ

Определение магнитной неоднородности образцов магнитной стали представляет интерес как с точки зрения изучения качества стали, связанного с однородностью структуры, так и с точки зрения метрологической практики, использующей эти стали для создания нормальных образцов.

Одним из основных требований, предъявляемых к нормальному образцу, является однородность его магнитных свойств по длине.

Несоблюдение этого условия вызывает искажение магнитного поля в окружающем образце пространстве и увеличивает ошибки в определении магнитных характеристик.

Особенно большое значение эти искажения напряженности магнитного поля будут иметь в том случае, когда область неоднородности совпадает с местом расположения измерительной обмотки.

С точки зрения измерительной техники к магнитным неоднородностям могут быть отнесены как неоднородности структуры, так и местные изменения размеров или раковины.

Эти явления не дают возможности, даже при правильном определении искаженного магнитного поля, судить о характеристиках материала, из которого состоит основная однородная часть образца, так как полученные магнитные характеристики не будут соответствовать свойствам образца.

Настоящая работа посвящается рассмотрению вопроса о методике количественного определения неоднородности.¹

Методика исследования магнитной однородности прямолинейных образцов магнитной стали

Магнитной неоднородностью образца предлагается считать отношение отклонения индукции в каком-либо сечении от среднего ее значения по всей длине образца к этому среднему значению.

¹ В экспериментальной части работы принимал участие ст. и. сотр.

Н. И. Спиридович.

Предполагается при этом, что весь образец находится в условиях намагничивания однородным полем.

Последнее обстоятельство практически осуществить весьма трудно, и для исследования вопросов неоднородности намагничивания в условиях однородного поля целесообразно заменить намагничиванием, при котором индукция является какой-нибудь простой функцией от линейной координаты. Такой зависимостью может быть выбрана квадратичная зависимость индукции от длины образца.

Достаточно точно это может быть осуществлено применением электромагнита, между полюсами которого расположен испытуемый образец O (рис. 1).

Подбирая конструкцию электромагнита и условия намагничивания, можно добиться того, что индукция в любом сечении образца

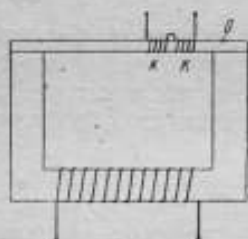


Рис. 1. Эскиз электромагнита для исследования магнитной однородности образцов

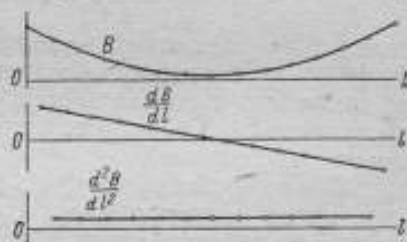


Рис. 2. Кривые B , $\frac{dB}{dl}$ и $\frac{d^2B}{dl^2}$ в функции l для однородных образцов

будет являться квадратичной функцией расстояния. В случае симметрично однородного образца это условие математически может быть выражено:

$$B = B_0 + al^2,$$

где

B_0 — магнитная индукция в центре образца,

a — некоторый коэффициент,

l — расстояние от середины образца.

Поместив две измерительные катушки K с одинаковым числом витков, охватывающие исследуемый образец, мы получим возможность измерить поток в двух различных сечениях образца.

Если включить обе катушки навстречу и последовательно с баллистическим гальванометром и быстро переместить их на некоторое расстояние, то отклонение гальванометра будет пропорционально разности магнитных индукций в тех сечениях образца, где расположены катушки, при условии равенства сечений образца. Деля эту разность на длину перемещения, получим в первом приближении при малых перемещениях l производную от магнитной индукции по длине, т. е. $\frac{dB}{dl}$. Тогда

$$\frac{dB}{dl} = 2al.$$

Составляя разности между смежными значениями $\frac{dB}{dl}$ и относя их к расстоянию между точками, соответствующими этим значениям, получим приближенно, что для однородного в магнитном отношении образца вторая производная от B по l

$$\frac{d^2B}{dl^2} = 2a = \text{const.}$$

Кривые B , $\frac{dB}{dl}$ и $\frac{d^2B}{dl^2}$ в функции l для магнитно-однородного образца приведены на рис. 2.

Таким образом, для определения неоднородности наиболее целесообразно непосредственно определять вторую производную от индукции по длине.

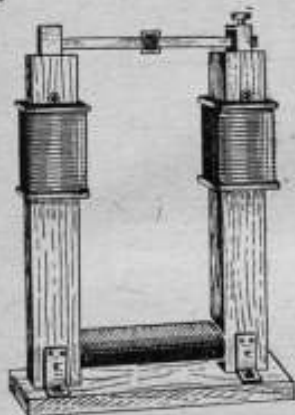


Рис. 3. Макет электромагнита для определения магнитной однородности по длине образца

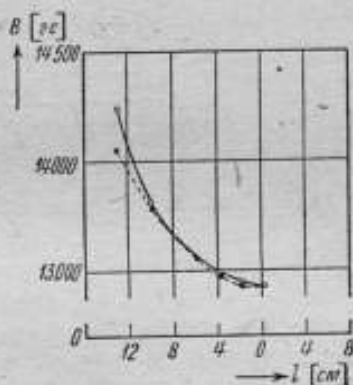


Рис. 4. Распределение индукции по длине сырого образца вольфрамовой стали
сплошная линия — измеренная, пунктирная — вычисленная

В соответствии с этим на образец помещались четыре одинаковых катушки по 500 витков каждая, навитые на общий каркас длиной 2 см, по 0,5 см на каждую катушку, свободно перемещаемые на разные участки образца по его длине. Катушки включались попарно навстречу друг другу, пары между собой также включались навстречу и последовательно с баллистическим гальванометром.

С четырьмя катушками имелась возможность при изменении основного потока в образце измерять не разность индукций, а разность разностей, т. е. получать вторую производную от B по l .

Изменение потока в образце производилось переключением намагничивающего тока в электромагните при неподвижных измерительных катушках.¹

¹ Применяемая в Бюро Стандартов методика использует сходный метод, обеспечивающий, однако, только измерение $\frac{dB}{dl}$, с дальнейшим графическим построением второй производной B по l .

Исследования, произведенные с построенным в Магнитной лаборатории макетом (рис. 3), показали, что распределение индукции по длине образца не вполне подчиняется закону $B = B_0 + al^2$, а имеет более сложный характер.

Макет представлял собой электромагнит, на боковых частях ярма которого были расположены намагничивающие катушки.

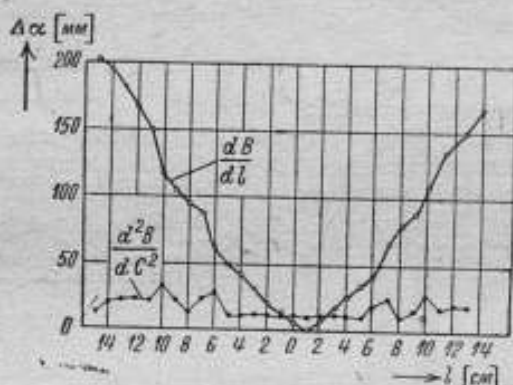


Рис. 5. Экспериментальные кривые $\frac{dB}{dl}$ и $\frac{d^2B}{dl^2}$ в функции l для сырого образца вольфрамовой стали

На рис. 4 и в табл. 1 приведены результаты измерений распределения индукции по длине образца сырой вольфрамовой стали. Пунктирной линией показана вычисленная парабола второй степени, наиболее близкая к измеренному распределению индукции.

Таблица 1

Расстояние от середины образца, см	Магнитная индукция		Разница, %
	вычисленная	наблюдаемая	
	гауссы		
0	13415	13415	0
2	13430	13440	0,07
4	13475	13490	0,11
6	13550	13550	0
8	13655	13655	0
10	13790	13810	0,14
13	14049	14240	1,35

Сила тока в электромагните $I = 1,75$ а

Как видно из приведенных данных, наибольшее расхождение между экспериментальной кривой и параболой наблюдается по

краям образца, вследствие чего при дифференцировании получается не прямая линия, а кривая.

Для сырого образца вольфрамовой магнитной стали на рис. 5 приведены результаты определения величины,¹ пропорциональных

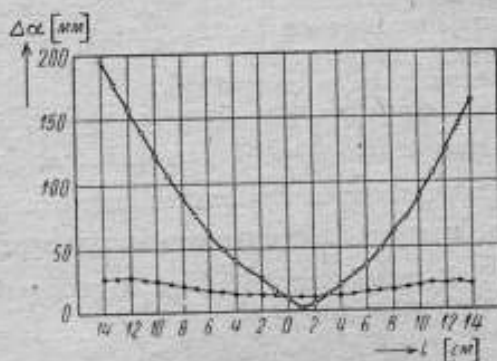


Рис. 6. Экспериментальные кривые $\frac{dB}{dl}$ и $\frac{d^2B}{dl^2}$ в функции l для образца закаленной вольфрамовой стали: верхняя кривая $\frac{dB}{dl}$; нижняя кривая $\frac{d^2B}{dl^2}$

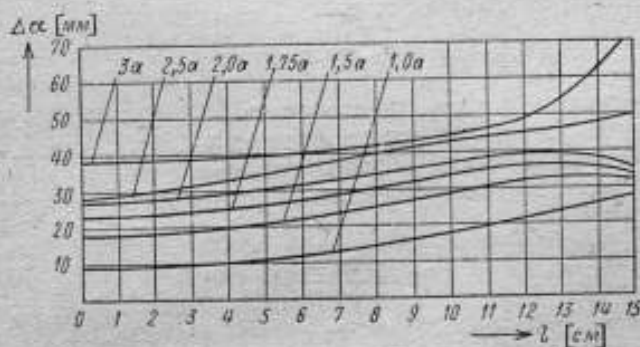


Рис. 7. Кривые $\frac{d^2B}{dl^2}$ при разных силах тока в обмотке электромагнита

$\frac{dB}{dl}$, полученные при двух измерительных катушках, и $\frac{d^2B}{dl^2}$ при четырех измерительных катушках при силе тока в электромагните

¹ На кривой рис. 5 и далее, если нет оговорок, по оси ординат вместо величины $\frac{d^2B}{dl^2}$ откладывалась величина отклонения гальванометра в миллиметрах [см. ниже формулу (4)].

$I = 1,75$ а. Правая половина кривой $\frac{dB}{dl}$ начерчена как зеркальное изображение действительной кривой по отношению к оси абсцисс.

Аналогичные измерения были произведены с закаленным образцом № 2 магнитной вольфрамовой стали, причем полного выпрямления кривой $B = f(l)$ после первого и второго экспериментального дифференцирования тоже не получилось.

Результаты этих измерений изображены на рис. 6.

Результаты измерений $\frac{d^2B}{dl^2} = f(l)$ для закаленной вольфрамовой стали при различных силах намагничивающего тока в обмотке электромагнита, который также влияет на ход кривых $\frac{d^2B}{dl^2}$, приведены на рис. 7. В дальнейшем большинство экспериментов производилось при силе тока $1,75$ а.

Критерий степени магнитной неоднородности нормальных образцов

Для количественной оценки неоднородности в настоящей работе исходили из следующих рассуждений.

Будем предполагать в первом приближении кривую $B = f(l)$ параболой второй степени, т. е.

$$B = B_0 + al^2,$$

где B_0 — индукция в середине образца.

Зададимся некоторой опорной точкой $l = l_n$, где n — число сантиметров от середины образца до данной точки.

Тогда величина коэффициента a может быть определена из выражения:

$$a = \frac{B_n - B_0}{l_n^2}, \quad (1)$$

где B_n — известная индукция в опорной точке.

Следовательно,

$$B = B_0 + \frac{B_n - B_0}{l_n^2} l^2. \quad (2)$$

Имея в виду, что измерения индукции производились при переключении тока в электромагните, для индукции мы можем написать следующее выражение:

$$B = \frac{c \alpha_0}{2 sw_1} + \frac{c}{2 sw_1} \cdot \frac{\alpha_n - \alpha_0}{l_n^2} l^2 = \frac{c}{2 sw_1} \left[\alpha_n \frac{l^2}{l_n^2} + \alpha_0 \left(1 - \frac{l^2}{l_n^2} \right) \right], \quad (3)$$

где

- c — постоянная гальванометра в максвеллах,
- α_0 — отклонение гальванометра при измерении в середине образца,
- α_l — отклонение гальванометра при измерении в опорной точке,
- l — расстояние от середины образца до рассматриваемой точки в сантиметрах,
- l_0 — расстояние от середины образца до опорной точки в сантиметрах,
- ω_1 — число витков измерительной катушки,
- s — сечение образца в кв. сантиметрах.

Предположим, что на кривой $B = B_0 + al^2$ имеется местная неоднородность ΔB (рис. 8). На рис. 8 внизу показано расположение четырех измерительных катушек, середины которых смещены на 0,5 см друг относительно друга, причем катушка № II помещена непосредственно над местом неоднородности в образце.

Индуктируемая в катушке № IV э. д. с. будет пропорциональна индукции

$$B_{I_4} = B_0 + al_1^2,$$

а в катушке № III

$$B_{I_3} = B_0 + a(l_1 + 0,5)^2.$$

Так как эти катушки включены навстречу, то гальванометр будет измерять разность индукций

$$\Delta_1 B = B_{I_3} - B_{I_4} = al_1 + 0,25 a.$$

Аналогично для пары катушек № I и II при встречном включении их будет измеряться разность индукций

$$\Delta_2 B = B_{I_1} - B_{I_2} = al_1 + 1,25 a - \Delta B.$$

Если обе пары катушек включить навстречу, то мы измерим разность второго порядка

$$\Delta'' B = \Delta_2 B - \Delta_1 B.$$

Подставляя в это выражение ранее найденные значения для $\Delta_2 B$ и $\Delta_1 B$, будем иметь

$$\Delta'' B = a \pm \Delta B.$$

т. е. $\Delta'' B = \text{const} \pm \Delta B$.

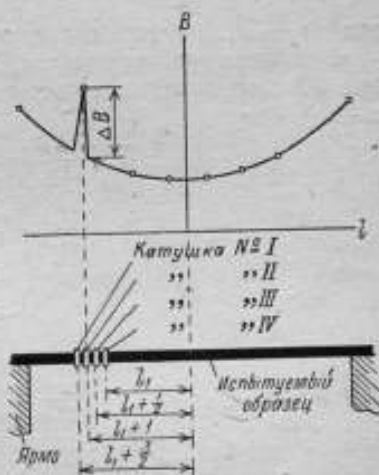


Рис. 8. Расположение измерительных катушек на образце и кривая $B = f(l)$

Таким образом, исследуя четырьмя катушками однородный образец, мы получим прямую, параллельную оси абсцисс и отстоящую от нее на расстоянии, равном a .

Подставляя в формулу (1) значения индукции, выраженные через отклонения гальванометра, получим:

$$a = \frac{c}{2 \omega_1} \cdot \frac{\alpha_n - \alpha_0}{I_n^2}$$

При измерении неоднородного образца на такой прямой получаются пики или провалы, равные

$$\Delta B = \frac{c_1}{2 \omega_1} \Delta \alpha,$$

где $\Delta \alpha$ — отклонение гальванометра.

Величина неоднородности ϑ может быть вычислена как отношение ΔB к индукции в том сечении, где имеет место неоднородность, т. е.

$$\vartheta = \frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta B}{B_0 + \frac{B_n - B_0}{I_n^2} I^2}$$

Принимая во внимание формулу (3), будем иметь

$$\vartheta = \frac{\frac{c_1}{2 \omega_1} \Delta \alpha}{\frac{c_2}{2 \omega_2} \left[\alpha_n \frac{I^2}{I_n^2} + \alpha_0 \left(1 - \frac{I^2}{I_n^2} \right) \right]}$$

или

$$\vartheta = \frac{\Delta \alpha}{\frac{c_2 \omega_1}{c_1 \omega_2} \left[\alpha_n \frac{I^2}{I_n^2} + \alpha_0 \left(1 - \frac{I^2}{I_n^2} \right) \right]}$$

где

c_1 и ω_1 — постоянная гальванометра и число витков при измерении неоднородности,

c_2 и ω_2 — то же при измерении опорных значений индукции B_0 и B_n .

В нашем случае $\omega_1 = 500$, $\omega_2 = 4$, $I_n = 5$ см. Полагая $c_1 = c_2$ (расхождение между ними составляло 15%), для величины неоднородности получим выражение:

$$\vartheta = \frac{\Delta \alpha}{125 \alpha_0 + 5 (\alpha_n - \alpha_0) \frac{I^2}{I_n^2}} \quad (4)$$

Однако, оценивая неоднородность в данном сечении, мы не даем еще полной характеристики образца, так как образец, имеющий относительно большую сосредоточенную неоднородность в одном

только месте, может быть лучше образца, дающего меньшие значения неоднородности, но в большем числе мест.

Чтобы избежать ложного представления об образце, целесообразно ввести еще понятие «средней неоднородности», как отношения среднего значения ΔB к среднему значению индукции, считая распределение последней параболическим,

$$\theta_{cp} = \frac{L \sum_1^m \Delta B}{2m \int_0^L B dl} = \frac{L \sum_1^m \Delta B}{2m \left(B_0 L + \frac{B_n - B_0}{l_n^2} \cdot \frac{L^3}{3} \right)},$$

или

$$\theta_{cp} = \frac{\sum_1^m \Delta B}{2m \left(B_0 + \frac{B_n - B_0}{l_n^2} \cdot \frac{L^2}{3} \right)},$$

если L — длина от середины образца до крайнего сечения образца, где измерялась неоднородность, и m — число мест измерений по длине.

Заменяя индукции через отклонения гальванометра и числа витков катушек и полагая $c_1 = c_2$ и $s = \text{const}$, имеем:

$$\theta_{cp} = \frac{w_2}{w_1} \cdot \frac{\sum \Delta \alpha}{2 \left(\alpha_0 + \frac{\alpha_n - \alpha_0}{l_n^2} \cdot \frac{L^2}{3} \right)}.$$

В нашем случае $L = 14$ см, а следовательно,

$$\theta_{cp} = \frac{\sum \Delta \alpha}{650 \alpha_n - 400 \alpha_0}.$$

На основании всего вышеизложенного, для оценки степени магнитной неоднородности образца окончательно были выбраны три величины:

1) неоднородность в рабочей части образца, где при последующих определениях магнитных характеристик нормального образца будут располагаться измерительные обмотки;

2) максимальная неоднородность, встречающаяся на всей длине образца;

3) средняя арифметическая неоднородность.

Так как параболический закон распределения индукции по длине образца на практике не вполне оправдывается, то для внесения соответствующей поправки необходимо поступить следующим образом.

Пусть кривые неоднородности $\frac{d^2B}{dl^2} = f(l)$ имеют вид, изображенный на рис. 9. Проводя между точками плавные кривые, мы сможем получать вероятные значения $\Delta\alpha$ как разность ординат кривых ломаной и плавной и пользоваться ими для дальнейших

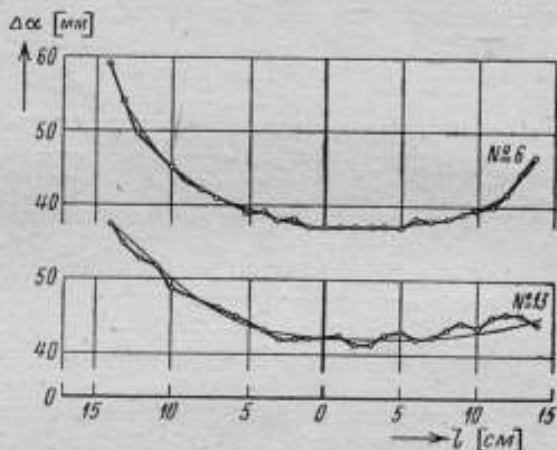


Рис. 9. Кривые $\frac{d^2B}{dl^2}$ образцов (№ 6 и 13) вольфрамовой магнитной стали

вычислений, что вполне возможно, так как плавная кривая отличается от параболы относительно не сильно.

Влияние магнитной неоднородности на характеристики образца

Прежде чем переходить к изучению соответствия между неоднородностью испытуемого образца и ошибками при измерениях магнитных характеристик, вызываемыми этой неоднородностью, рассмотрим основные виды неоднородностей образца. К ним могут быть отнесены внутренние полости, разрезы и т. п. и включения инородного материала в испытуемый образец.

С целью искусственного воспроизведения этих дефектов было изготовлено два прямолинейных образца, размерами $400 \times 10 \times 20$ мм. С одной стороны образца были сделаны вырезы, размеры и расположение которых указаны на рис. 10. В вырезы закладывались различного рода вкладыши, причем зазор между вкладышами и телом образца не превышал 0,1 мм на обе стороны. Один из образцов был закален, а другой оставлен сырым; для обоих образцов определялась магнитная неоднородность по всей длине при различных условиях заполнения впадин.

Исследование неоднородности было начато с изучения распределения $\frac{d^2B}{dl^2}$ по всей длине, когда впадины образца были заполнены вкладышами из такого же материала.

На кривой рис. 11 сплошной линией изображена зависимость $\frac{d^2B}{dl^2}$ от l ; правая сторона чертежа относится к половине образца, не имевшей впадин, а левая — к стороне с впадинами. Пунктиром с левой стороны проведена кривая, симметричная правой стороне.

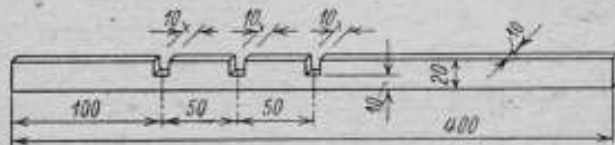


Рис. 10. Образец с вырезами для искусственного создания неоднородности

В предположении достаточной однородности материала сырого образца это позволяет судить о возможной степени неоднородности, вызываемой поперечными разрезами до половины образца толщиной порядка 0,1 мм.

Для сырого образца максимальная величина неоднородности, вызываемая этой причиной, колеблется в пределах от 0,03 до 0,05%.

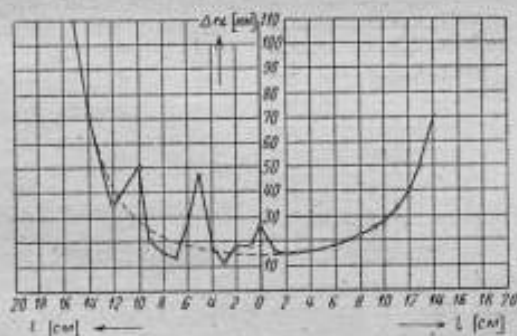


Рис. 11. Кривые неоднородности образца с вкладышами

Далее была определена неоднородность, вызываемая удалением одного из вкладышей. При удаленном среднем вкладыше толщиной 10 мм распределение $\frac{d^2B}{dl^2}$ приведено на рис 12. Пунктиром проведена кривая, симметричная правой, однородной половине образца. Как показывает сравнение кривых рис. 11 и 12, резкое уменьшение сечения образца дает положительную величину $\frac{d^2B}{dl^2}$ в центре неоднородности и отрицательную по краям. Однако резкое изменение $\frac{d^2B}{dl^2}$ в месте основной неоднородности не сказалось на местных неоднородностях в других точках образца, величина которых,

в пределах ошибок опыта, сохранилась практически неизменной. Последнее обстоятельство говорит о возможности при больших местных неоднородностях улавливать также незначительные дефекты в других местах образца.

Как видно из кривой рис. 12, неоднородность оказалась настолько значительной, что не могла быть измерена. При изъятии

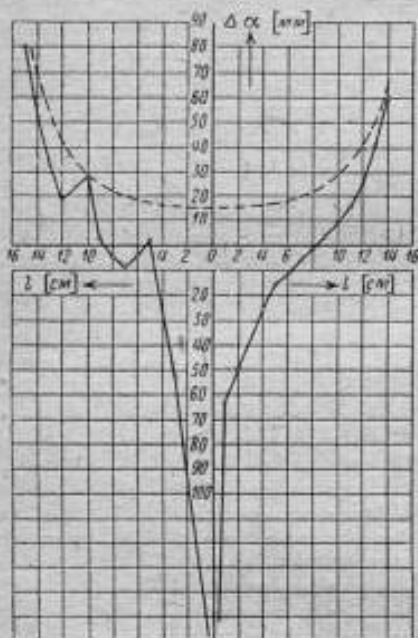


Рис. 12. Кривые неоднородности образца с удаленным вкладышем

вкладыша толщиной 5 мм максимальная неоднородность составляет 2,5%.

Далее было изучено влияние включений более жесткого материала на характер неоднородности образца. Испытуемый образец имел $B_r = 12\,500$ гс и $H_e = 20$ э, материал более жесткого включения имел $B_r = 9000$ гс и $H_e = 70$ э. Включение создавалось путем замены мягкого вкладыша более жестким. Размеры вкладышей были $10 \times 10 \times 10$ мм. На рис. 13, а показана кривая $\Delta\alpha = f(l)$ при замене среднего вкладыша, а на рис. 13, б — при замене вкладыша, расположенного на расстоянии 5 см от середины образца. Замена среднего вкладыша давала для величины $\frac{\partial^2 B}{\partial l^2}$

положительное значение порядка 0,35% и резко падала по мере удаления от места включения, почти не сказываясь уже

на расстоянии порядка 4 см. Значения $\frac{\partial^2 B}{\partial l^2}$ для всей кривой получились меньшими, чем у однородного образца.

Аналогичные исследования были проведены с закаленным образцом вольфрамовой стали. Было проведено исследование образца, у которого все впадины были заполнены вкладышами из закаленного же материала того же сорта. Зазор в этом случае имел порядок от 0,1 до 0,2 мм, а неоднородность — соответственно от 0,025 до 0,040%. Для этого же образца было произведено изучение влияния впадин и полостей различной ширины и глубины, а именно — впадины шириной 10 мм и глубиной 5 мм, впадины глубиной 10 мм и шириной 5 мм и полости, начинающейся на расстоянии 5 мм от поверхности и имеющей размеры по глубине 5 мм и по ширине 10 мм. Пустота осуществлялась путем неполного опускания во впадину вкладыша размерами $5 \times 10 \times 10$ мм.

Во всех этих случаях неоднородность получилась одной и той же и имела порядок 0,12%.

Далее было проведено изучение влияния включения магнитного материала. В этом случае величина неоднородности имеет порядок 0,11% и наблюдается понижение значения $\frac{d^2B}{dl^2}$ в месте неоднородности без заметного влияния по обе стороны от этого места, в противоположность характеру распределения $\frac{d^2B}{dl^2}$ в сыром образце, содержащем включения из закаленного материала.

Результаты определения всех вышеуказанных неоднородностей сведены в табл. 2.

Для суждения о влиянии неоднородности на измеренные

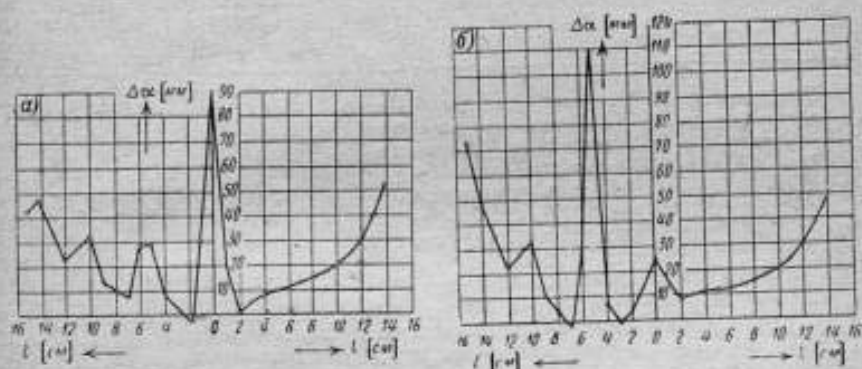


Рис. 13. Кривая неоднородности образца с замененным вкладышем: а) вкладыш в центре образца, б) вкладыш на расстоянии 5 см от середины образца

магнитные характеристики образцов, при наличии того или иного искусственного дефекта, определялись их магнитные характеристики в пермеамetre баллистическим методом.

Обмотка для измерения индукции занимала 3 мм по длине и помещалась вблизи середины образца со смещением на 1 см от центра. Характеристики, полученные при наличии зазоров порядка 0,1 мм, приняты за действительные характеристики образца.

В табл. 3 приводятся данные для магнитных характеристик образца сырой вольфрамовой стали в сопоставлении с неоднородностью образца.

Определенной величине неоднородности соответствуют те или иные значения измеренных характеристик, в зависимости от места расположения неоднородности по отношению к месту расположения измерительной катушки. Имея в виду худший случай, когда неоднородность находится в непосредственной близости к измерительной катушке, можно считать, что неоднородности в 0,35% бу-

Таблица 2

Материал и характеристика образца	Характер неоднородности	Характеристики включенного материала	Величина неоднородности, %
Сырая вольфрамовая сталь $B_r = 12600$ гс $H_c = 19$ э	Разрезы толщиной в 0,1 мм на глубину половины толщины образца	Воздух	0,03—0,05
	Впадина размерами 10 × 5 мм	»	2,5
	Включение инородного тела размерами 10 × 10 × 10 мм	Закаленная вольфрамовая сталь $B_r = 8900$ гс $H_c = 69$ э	0,35
Закаленная вольфрамовая сталь $B_r = 8900$ гс $H_c = 69$ э	Разрезы толщиной в 0,1 мм на глубину половины толщины образца	Воздух	0,025—0,04
	Впадина размерами 10 × 5 мм	То же	0,12
	Впадина размерами 5 × 10 мм	»	0,12
	Полость размерами 5 × 10 × 10 мм	»	0,12
	Включение инородного тела размерами 10 × 10 × 10 мм	Сырая вольфрамовая сталь $B_r = 12600$ гс $H_c = 19$ э	0,11

дет соответствовать ошибка в определении действительных магнитных свойств, для коэрцитивной силы около 1% и для остаточной индукции около 2%.

Результаты измерений магнитных характеристик закаленного образца с различными искусственно созданными неоднородностями приведены в табл. 4.

Наибольшие расхождения в этом случае составляют: 2,1% для максимальной индукции, 4% для изменения индукции ΔB и 1,5% для коэрцитивной силы; остаточная индукция изменяется мало.

Для случая включения сырой стали в закаленном образце было проведено измерение распределения потока в образце при наличии внешнего намагничивающего поля в пермеамetre. Результаты этих измерений приведены в табл. 5.

На основании этих данных, на рис. 14 схематически показано примерное распределение потока при наличии вкладыша из более мягкого материала.

Как видно из этой схемы, при наличии мягкого включения несколько увеличивается общий поток в образце, значительно увеличивается поток в месте мягкого включения и сильно ослабляется

Характер неоднородности	Величина неоднородности, %	Магнитные характеристики				
		B_{\max}	ΔB	B_r	H_c	
		гауссы			эрстеды	
Включение закаленной стали на расстоянии от центра:	} Порядка 0,35	0 см	17980	5320	12660	18,7
		5 »	18210	5400	12810	18,6
		10 »	18210	5400	12810	18,5
Образец с вкладышами из того же материала	Порядка 0,04	18220	5320	12900	18,5	
Вкладыш посредине удален	Определить не удалось (слишком большая)	14460	5240	9220	18,1	

вблизи этого включения. При измерениях баллистическим методом вблизи места порока мы получаем преувеличенное значение потока

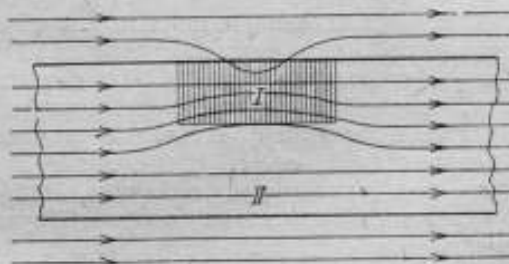


Рис. 14. Распределение магнитного потока в неоднородном образце

по сравнению как со средней величиной потока для всего неоднородного образца, так и с потоком однородного образца из того же материала.

Таким образом, мы получаем положительную ошибку при измерении магнитной индукции в области I порядка 4% и 2,0% в области II (рис. 14).

Таблица 4

Характер неоднородности	Величина неоднородности, %	Магнитные характеристики			
		B_{\max}	ΔB	B_r	H_c
		гауссы			эрстеды
Образец с вкладышами из того же материала	0,04	14050	5190	8860	69,2
Включение сырой стали на расстоянии от центра: 0 см 5 » 10 »	Порядка 0,11	14310	5440	8870	68,2
		14000	5200	8890	68,8
		14090	5190	8900	68,8
Вертикальная впадина (длина 5 мм, глубина 10 мм)	0,12	14060	5410	8650	69,9
Горизонтальная впадина (длина 10 мм, глубина 5 мм)	0,12	14070	5260	8810	69,8
Полость (глубина 5 мм, ширина 10 мм на расстоянии 5 мм от поверхности)	0,12	14090	5240	8850	70,6

При отсутствии намагничивающего поля, т. е. в области остаточной индукции, распределение потока наблюдается приблизительно такое же, как и у однородного образца. Что же касается остаточной индукции, то она в местах, непосредственно соприкасающихся с мягким включением, несколько возрастает.

Измерения коэрцитивной силы, проведенные во вкладыше и в теле образца под вкладышем, показали, что среднее из этих значений дает приблизительно коэрцитивную силу, измеренную во всем данном сечении. Действительно, коэрцитивная сила, измеренная в перешейке, была равна 77,7 э, во вкладыше — 60,9 э, а в перешейке с вкладышем — 69,6 э. Среднее из первых двух значений равно 69,3 э.

Кроме сосредоточенных неоднородностей, рассмотренных выше, могут иметь место неоднородности с постепенным изменением в структуре образца, захватывающие большую область и имеющие постепенный переход к нормальной структуре. Изучение влияния этих неоднородностей на результаты измерений магнитных характеристик в пермеамetre производилось также на образцах сырой и закаленной вольфрамовой стали.

	Максимальный магнитный поток в максвеллах	Магнитная индукция, гс		Остаточное изменение потока в максвеллах	Остаточный поток в максвеллах	Остаточное изменение индукции, гс	Остаточная индукция, гс
		в однородном образце	в неоднородном образце				
Закаленная сталь с включением незакаленной:							
а) тело образца	13890	14055	13290	4300	8990	4300	8990
б) вкладыш	16030	18280	16030	7160	8870	7160	8870
в) общее значение в области I	29500	14055	14800	11670	17830	5840	8960
г) То же в области II	28600	14055	14310	10870	17750	5440	8870
* Закаленная сталь	—	14055	14660 среднее	10380	17730	5190	8860

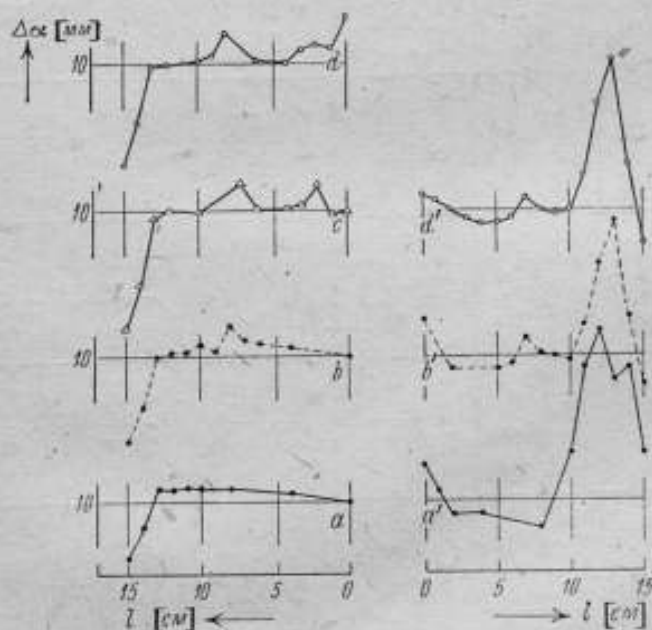


Рис. 15. Кривые неоднородности образца, подвергнувшегося порче

Мягкие образцы были изучены в отношении неоднородности и затем в пермеамetre определялась размагничивающая часть гистерезиса.

Таблица 6

Характер порчи образца	Место нагрева образца и заделки от середи- ны, см	Расстояние от сере- дины образца, на котором произведе- ны изме- рения, см	Величина максималь- ной неод- нородности, %	Магнитные характеристики, измеренные в центре образца				Обозначения на кривых рис. 15
				до порчи		после порчи		
				B_r [эс]	H_c [э]	B_r [эс]	H_c [э]	
Нагрев вольтовой ду- гой и местная задел- ка в воде	13	13	-0,0004	—	—	13620	15,4	a
	13	8	+0,011	—	—	—	—	b
	8	8	+0,010	—	—	13620	15,8	
	8	2	+0,011	—	—	—	—	
Левая половина образ- ца	—	—	—	—	—	13620	15,6	c
	2	2	+0,009	—	—	—	—	d
	2	8	+0,011	—	—	—	—	
	0	0	+0,018	—	—	—	—	
Нагрев газовой горелкой и местная заделка в воде. Правая поло- вина образца	13	13	+0,014	—	—	—	—	a'
	13	14	+0,017	—	—	—	—	b'
	13	12	+0,056	—	—	—	—	d'
	—	—	—	—	—	13620	15,6	
	7	7	+0,006	—	—	—	—	
	7	13	+0,042	—	—	—	—	
	0	0	+0,008	—	—	—	—	
	0	7	+0,004	—	—	—	—	
0	13	+0,042	—	—	—	—		

резисного цикла. Далее они подвергались местному нагреванию электрической дугой и газовой горелкой в различных местах с последующей частичной закалкой в воде, чтобы вызвать искусственную местную порчу.

После этого вновь производились те же измерения на электромагните и в пермеатре.

На рис. 15 и в табл. 6 приведены результаты исследования магнитной неоднородности отожженного образца после порчи, имевшего до порчи неоднородность в центральной части на протяжении 6 см, равную 0,008%, максимальную неоднородность по всей длине 0,012% и среднюю арифметическую 0,001%.

Характер этой неоднородности для образца, не подвергавшегося порче, показан на рис. 16.

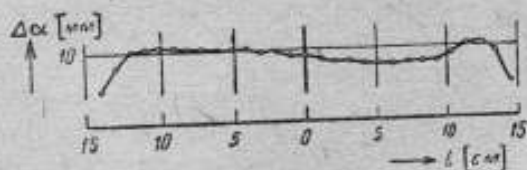


Рис. 16. Кривая неоднородности образца, не подвергавшегося порче

После порчи, как видно из табл. 6, неоднородность в образце возросла до 0,056%, особенно в правой половине его, нагревавшейся газовой горелкой.

Наряду с этим особо резких изменений в результатах измерений B_c и H_c до и после нагрева не обнаруживается.

Аналогично мягким, был исследован закаленный образец № 10, подвергнутый местному отжигу. Результаты исследования этого образца приведены в табл. 7.

До порчи этого образца отжигом максимальная неоднородность равнялась 0,08%, а после отжига достигла 0,49%. Результаты испытания закаленного образца № 10 в пермеатре показали, что отжиг оказал достаточно сильное влияние на магнитные характеристики, измеренные в центральном сечении образца: B_c увеличилась на 7,2% и H_c уменьшилась на 23,2%. Эти данные и характер неоднородности показывают на значительное изменение структуры образца и при установлении допустимой неоднородности для нормальных образцов они не принимались во внимание.

Далее с закаленным образцом № 9 был произведен опыт исследования его на неоднородность, причем порча производилась применением муфты из пермаллоя шириной 0,5 см, толщиной 0,7 мм, которая надевалась на образец и которую можно было перемещать в любое место по длине образца.

Данные этих измерений приведены в табл. 8.

Таблица 7

Место нагрева образца от середины, см	Расстояние от середины образца, на котором производились измерения, см	Величина максимальной неоднородности, %	Магнитные характеристики, измеренные в середине образца				Разница в %, отнесенная к величине до порчи образца	
			до порчи		после порчи			
			B_r [эс]	H_c [э]	B_r [эс]	H_c [э]	для B_r	для H_c
13	13	-1,49	—	—	10530	56,9	0	-4,5
13	9	+0,073	—	—	—	—	—	—
—	—	—	10530	59,6	—	—	—	—
6	6	-0,32	—	—	11280	45,7	+7,2	-23,2
6	3	-0,38	—	—	—	—	—	—
6	10	-0,36	—	—	—	—	—	—
6	12	+0,054	—	—	—	—	—	—
6	13	-0,40	—	—	—	—	—	—

Таблица 8

Местонахождение муфты от середины образца, см	Расстояние от середины образца, на котором производились измерения, см	Величина максимальной неоднородности, %	Магнитные характеристики, измеренные в центре образца				Разница в %, отнесенная к величине, полученной у образца без муфты	
			без муфты		с муфтой			
			B_r [эс]	H_c [э]	B_r [эс]	H_c [э]	для B_r	для H_c
4	4	0,35	—	—	9780	62,8	-0,49	-0,57
4	5	0,27	—	—	—	—	—	—
4	6	0,41	—	—	—	—	—	—
2	8	0,48	9830	63,2	9820	62,9	-0,16	-0,42
2	1	0,14	—	—	—	—	—	—
0	0	0,35	—	—	9730	62,0	-0,51	-1,75
0	2	0,78	—	—	—	—	—	—

Как видно, непосредственное приближение мягкого материала к образцу вызывало резкое нарушение однородности, тогда как размагничивающая кривая мало изменилась.

По отношению к нормальным образцам ошибка, вызываемая неоднородностью образца, во всяком случае не должна превышать другие возможные ошибки измерения (отсчет по шкале гальванометра, показание амперметра, влияние температуры и т. д.).

Поэтому можно допустить такую неоднородность, которая вызывает ошибку в измерениях магнитных характеристик, равную,

в худшем случае, наибольшей из ошибок, обусловленных указанными выше источниками. Из всех ошибок наибольшая может быть

Таблица 9

Характер порчи образца	Максимальная неоднородность, %	Ошибка в измерении коэрцитивной силы, %	Степень неоднородности в %, при которой погрешность измерения магнитной величины не превышает 0,1%
А. Распределенная однородность			
Отжиг	0,49	4,4	0,01
Муфта из пермаллоу, надетая на расстоянии 4 см от середины образца	0,41	0,6	0,06
Муфта, надетая на середине образца	0,85	1,0	0,05
Б. Сосредоточенная неоднородность			
Включение сырой стали на расстоянии 0,5 см	0,11	2,1	0,005
Полость на расстоянии 10 см	0,12	2,0	0,005
Впадина на расстоянии 10 см	0,12	0,86	0,012

отнесена за счет показаний измерительных приборов и оценивается величиной не меньше 0,2%. Так как коэрцитивная сила, по данным наших измерений, изменяется больше, чем остаточная индукция, то при установлении критерия неоднородности целесообразнее основываться на измерениях коэрцитивной силы.

Пользуясь приведенными выше результатами исследования неоднородности и измерениями в пермеамetre, найдем цифровые значения допустимой степени неоднородности, вытекающие из этих данных (табл. 9). Считая, в первом приближении, неоднородность и погрешность измерений связанными прямой пропорциональностью, можно подсчитать допустимую неоднородность, исходя из допустимой погрешности в измерениях в 0,1%.

Чтобы обеспечить для нормальных образцов ошибку, во всяком случае, не превышающую 0,1%, допустимой степенью неоднородности нужно считать величину 0,005%.

В отличие от магнитных сталей типа вольфрамовой и кобальтовой, никельалюминиевая сталь обладает специфическими технологическими показателями, не позволяющими изготовить образец с большой степенью однородности как по составу, так и по степени дисперсности. Хотя эта неоднородность в некоторой степени может быть несколько выравнена термической обработкой, все же стали

этого типа в отношении однородности не дают тех результатов, которые можно получить для других сортов стали. Кроме того, в никельалюминиевой стали часто имеют место раковины.

Исходя из этого, изучение неоднородности приходится проводить методами, отличными от описанных ранее. К этому вынуждает также относительно малая магнитная проницаемость стали, не

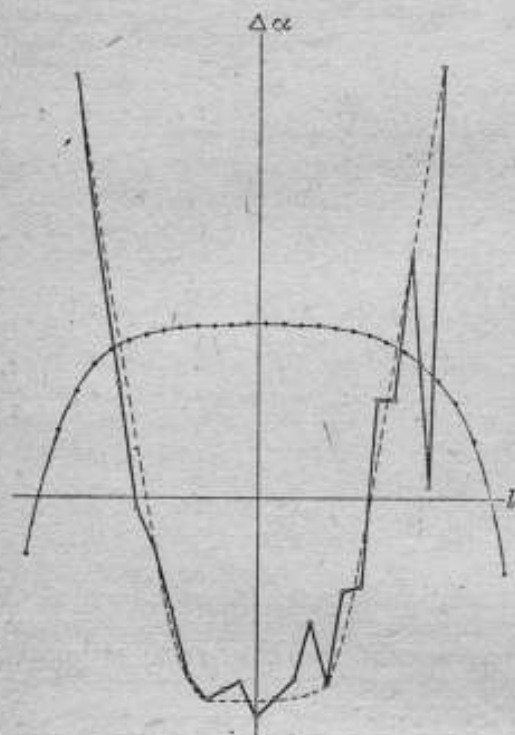


Рис. 17. Кривая неоднородности образца никельалюминиевой стали

позволяющая получить заметное намагничение при больших расстояниях между полюсами электромагнита, в котором испытывались образцы других сортов стали в отношении магнитной однородности.

Предварительные исследования магнитной однородности производились путем изучения распределения остаточной магнитной индукции в разных сечениях образца по всей его длине. Образцы намагничивались в разомкнутой магнитной цепи и затем определялась остаточная индукция сдвиганием катушки, соединенной с баллистическим гальванометром. Кроме того, проводились измерения изменений остаточной индукции на 1 см длины образца при сдвигании

катушки на длину 1 см. Вторым методом по сравнению с первым, давая возможность повысить чувствительность благодаря большому числу витков, и был принят в дальнейшем для определения магнитной однородности образцов никельалюминиевой стали.

Предполагая, что для однородного образца зависимость остаточной индукции (сплошная плавная кривая), а также ее изменение по длине (плавная пунктирная кривая) графически выражаются плавными кривыми, можно считать, что всякое нарушение плавного хода кривой является следствием имеющейся неоднородности в данном сечении образца. Результаты испытания магнитной однородности одного из образцов приведены на рис. 17.

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА ТОКА НА ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

А. М. ЕРМАКОВА

Основным методом магнитных измерений на постоянном токе до настоящего времени является индукционный метод, основанный на применении баллистического гальванометра, измеряющего количество электричества, протекшее через его рамку и пропорциональное изменению измеряемого магнитного потока.

Эта пропорциональность является приближенной и отклонение от нее тем больше, чем меньше период гальванометра по сравнению с длительностью баллистического импульса.

В связи с широким применением в практике магнитных измерений намагничивающих устройств типа электромагнита с большим отношением L/R , случай экспоненциально убывающего тока в цепи гальванометра представляет существенный интерес.

Для случая экспоненциально убывающего тока, заданного в виде

$$i = I \cdot a e^{-at},$$

где

$$i \text{ — сила тока, } I \text{ — постоянная, } a = \frac{R}{L},$$

общее решение уравнения движения рамки гальванометра может быть представлено в виде:

$$\frac{a}{\alpha_0} = \frac{t_b}{t_{b_0}} e^{-\frac{t_b}{t_{b_0}}}, \quad (1)$$

где t_b и α — время установления и величина баллистического отклонения при длительности импульса τ измеряемого тока, t_{b_0} и α_0 — время установления и величина баллистического отклонения при бесконечно малой длительности импульса измеряемого тока.

Отношение $\frac{t_b}{t_{b_0}}$, входящее в уравнение (1), находится из уравнения:

$$\frac{t_b}{t_{b_0}} = \frac{x \frac{h}{a}}{1 - \frac{h}{a}}, \quad (2)$$

где $x = (a - h)t_b$, $h = \frac{2\pi^2}{T_0^2}$,

T_0 — период незатухающих колебаний гальванометра, β — коэффициент затухания.

Величина x находится из следующего уравнения:

$$1 - \frac{h}{a} x = e^x. \quad (3)$$

Уравнение (1) дает возможность найти зависимость $\frac{\pi}{\alpha_0}$ от отношения $\frac{h}{a}$. В частности, при $\frac{h}{a} < \frac{1}{8}$, т. е. при $\frac{1}{a} < \frac{1}{8h}$, погрешность в измерении отклонения, вызванная определенной длительностью импульса, имеет порядок 1%.

На основании этого для критического режима работы гальванометра, т. е. для $h = \frac{2\pi}{T_0}$, составлена табл. 1, дающая допустимые значения постоянной времени намагничивающего устройства, при которых погрешность в отклонении гальванометра не превышает 1%.

Таблица 1

T_0 [сек]	h	$\frac{1}{a}$ [сек]
15	0,418	0,299
20	0,314	0,398
25	0,251	0,498
30	0,209	0,598
35	0,179	0,698

Данные этой таблицы позволяют выбрать такой период баллистического гальванометра T_0 , когда при соответствующей постоянной времени намагничивающего устройства длительность импульса тока, измеряе-

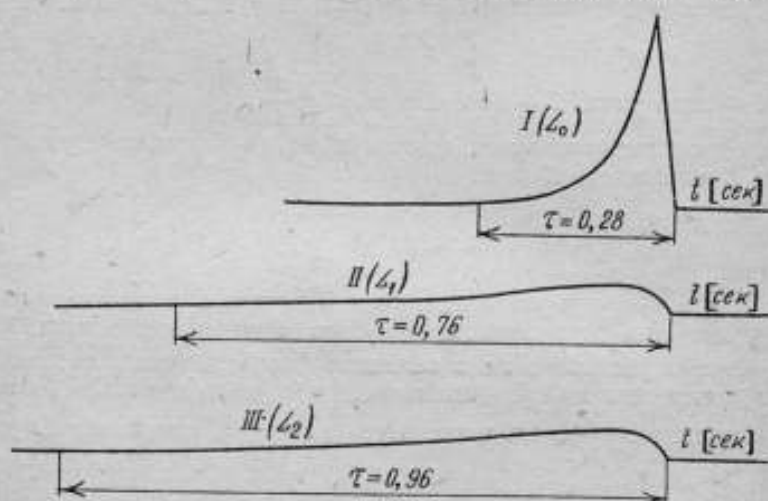


Рис. 1а. Осциллограммы импульса тока в измерительной цепи при включении тока в намагничивающей цепи

мого гальванометром, вызывает погрешность в отклонении гальванометра не более 1%.

Для подтверждения теоретических расчетов было проведено экспериментальное исследование влияния индуктивности первичной цепи намагничивающего устройства на характер и величину отклонения гальванометра.

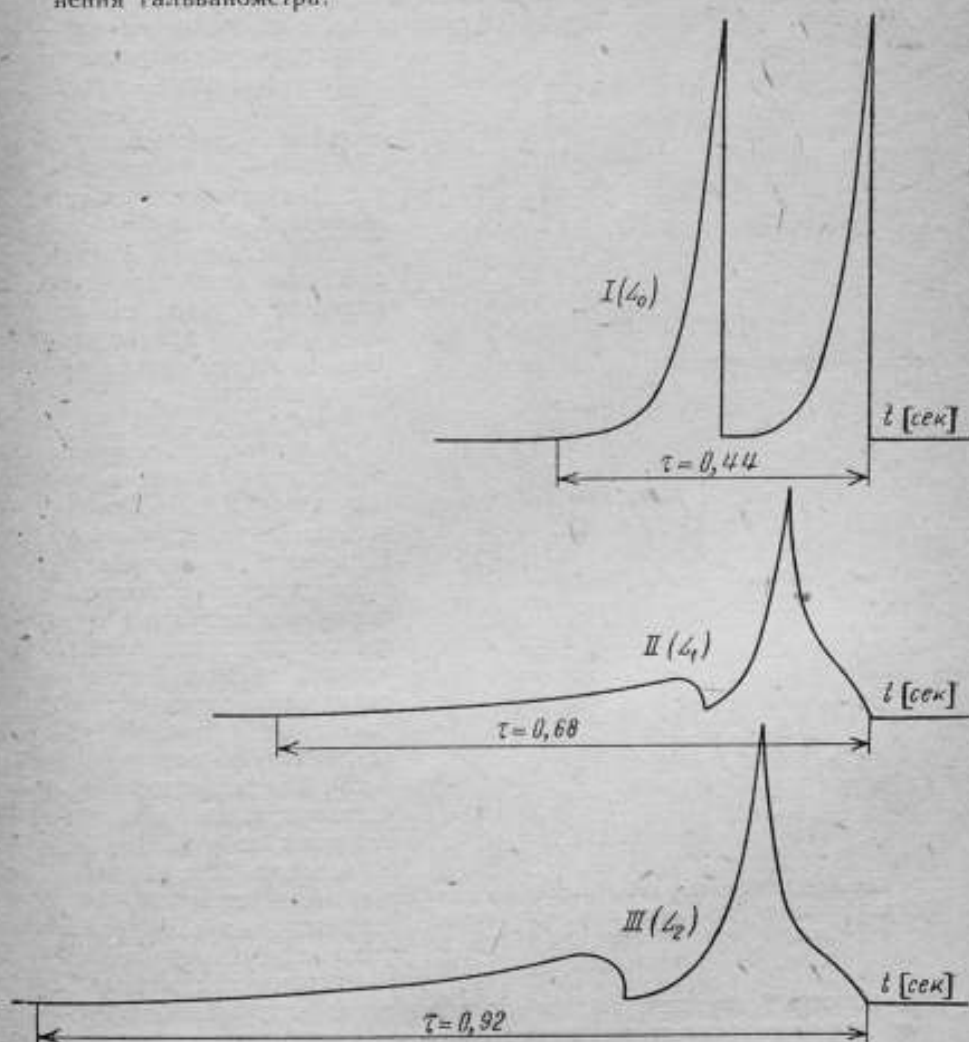


Рис. 16. Осциллограммы импульса тока в измерительной цепи при переключении тока в намагничивающей цепи

Для изучения этого влияния была создана установка с намагничивающим соленоидом и измерительной катушкой, в которой возбуждался баллистический импульс. Измерительная катушка помещалась внутри соленоида и обмотка ее присоединялась к балли-

стическому гальванометру с периодом колебаний 22 секунды. Роль переменной индуктивности выполнял электромагнит, воздушный промежуток которого имел различную длину соответственно следующим положениям: полюсные наконечники сдвинуты до предела, чему соответствует индуктивность L_1 ; полюсные наконечники

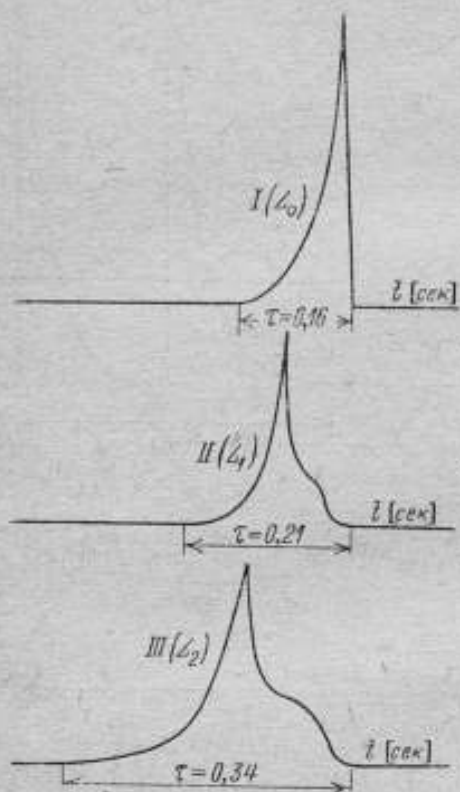


Рис. 1в. Осциллограммы импульса тока и измерительной цепи при выключении тока в намагничивающей цепи

Быстрый характер спада и нарастания тока, который наблюдается при включении только индуктивности L_0 , сменяется с увеличением индуктивности более плавным снижением и нарастанием экспоненциальной кривой.

Длительность импульса заметно увеличивается для случая включения и переключения тока.

* Величины L_0 , L_1 , L_2 и L_3 имели порядок: $L_0 \approx 0,5$ эн, $L_1 \approx 1,3$ эн, $L_2 \approx 1,6$ эн, $L_3 \approx 1,9$ эн.

сдвинуты наполовину этого расстояния — индуктивность L_2 ; полюсные наконечники сомкнуты друг с другом — индуктивность L_3 . Индуктивность самого соленоида обозначим через L_0 .* Помещенная внутрь соленоида измерительная катушка с известной постоянной sw присоединялась то к гальванометру, то к вибратору осциллографа.

Осциллограф служил для фотографирования формы импульса тока, получаемого гальванометром. Измерение отклонений гальванометра и фотографирование импульсов тока производилось для разных токов в первичной цепи и различного характера их изменения (включение, переключение и выключение тока). Рассмотрение полученных осциллограмм, приведенных на рис. 1а, 1б, и 1в, показывает, насколько изменяется форма и длительность импульса тока с увеличением индуктивности первичной цепи.

Длительность импульса определялась при помощи отметок времени на осциллограмме путем подачи на вибратор осциллографа переменного тока частотой 50 $\text{ц}.$ ¹

Пользуясь общей теорией баллистического гальванометра, зная период его свободных колебаний T_0 , длительность и форму импульса, можно в каждом конкретном случае по формулам (1), (2) и (3) примерно оценить отношение $\frac{a_1}{a_0}$, т. е. подсчитать ошибку в измерениях. Подобный примерный подсчет приведен в табл. 2 для всех указанных выше случаев включения индуктивности и изменения тока.

Таблица 2

Сила тока $I[a]$	Отклонение гальванометра $a_1(L_0)$	Отклонение гальванометра $a_1(L_1)$	$\frac{a_0 - a_1}{a_0} \cdot 100\%$		Отклонение гальванометра $a_2(L_2)$	$\frac{a_0 - a_2}{a_0} \cdot 100$	
			эксперимент	расчетное		эксперимент	расчетное
Включение тока							
4	171,6	167,2	2,5	2,4	164,8	3,9	3,9
5	215,2	210,8	2,0	2,3	208,0	3,3	3,7
7	304,0	295,2	2,8	2,6	292,0	3,9	3,8
Выключение тока							
4	172,8	172,4	0,2	0,1	172,0	0,5	0,6
5	215,2	215,2	0	0,1	214,4	0,4	0,5
7	304,0	304,0	0	0,1	302,4	0,5	0,6
Переключение тока							
4	193,1	188,0	2,6	2,4	186,1	3,6	3,9
6	290,5	282,6	2,7	2,4	280,2	3,5	3,9
7	340,8	331,9	2,6	2,4	329,6	3,2	3,9

Примечание. Отношения $\frac{a_1}{a_0}$ и $\frac{a_2}{a_0}$ рассчитывались на основании осциллограмм, приведенных на рис. 1а, 1б, 1в.

Наряду с этим при тех же условиях наблюдались отклонения гальванометра и находилось отношение $\frac{a}{a_0}$. За a_0 принималось отклонение гальванометра, когда в первичной цепи был включен один соленоид, т. е. при индуктивности L_0 .

Результаты измерений, приведенные в табл. 2, показывают относительно хорошее совпадение (до 1%) расчетных и эксперимен-

¹ Период собственных колебаний шлейфа вибратора не принимался во внимание, так как он имеет порядок 0,003 сек. в то время как длительность снимаемых процессов имела порядок секунды.

тальных данных, несмотря на то, что в расчетах за α_0 принималось отклонение, которое получилось бы, если бы импульс был мгновенным. Это условие, однако, практически невыполнимо, и импульс, соответствующий отклонению α_0 , в нашем случае имел некоторую длительность, которая сама обуславливает при расчете по формулам (1), (2) и (3) погрешность измерения в 0,2—0,3%.

Подобный расчет погрешности был произведен для коммутационного метода определения напряженности поля H_k (рис. 2), соответствующей точкам размагничивающей кривой, при измерениях в электромагните Магнитной лаборатории ВНИИМ с большим отношением L/R .

Размагничивающая кривая является основной характеристикой магнитных свойств сплавов для постоянных магнитов, а потому этот случай представляет большой интерес для практики.

В междупольное пространство электромагнита помещался образец из сплава Fe—Ni—Al с поперечным сечением $s=7,05 \text{ см}^2$ и длиной $l=70 \text{ мм}$.

Для измерения напряженности поля служила плоская катушка с известной постоянной.

Осциллограмма импульса тока, получаемого гальванометром, соединенным с измерительной катушкой, помещенной на

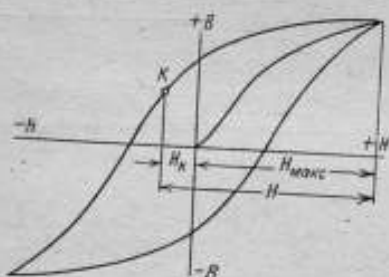


Рис. 2. Гистерезисная кривая ферромагнитного материала

поверхности образца, при изменении намагничивающего тока от I_{\max} до $-I_k$ (т. е. при измерении величины H), изображена на рис. 3. Вычисленная для данной длительности импульса тока погрешность значения H составляет примерно 5%.

Для определения H_k — напряженности поля, соответствующей точке K размагничивающей кривой, необходимо определить также H_{\max} .

H_{\max} находится переключением максимального намагничивающего тока от I_{\max} до $-I_{\max}$. Осциллограмма импульса тока, получаемого при этом гальванометром, изображена на рис. 4.

Определив на основании формул (1), (2) и (3) отношение $\frac{\alpha}{\alpha_0}$, имеем, что ошибка в определении H_{\max} , совершаемая при переключении тока, составляет примерно 2%.

Таким образом, конечная величина длительности импульса тока в цепи гальванометра при измерении напряженности поля методом коммутации вызывает систематическую погрешность порядка нескольких процентов.

При определении значений индукции, соответствующих точкам на размагничивающей кривой, метод коммутации является ос-

новым. Поэтому особенно важно установить погрешность, вызываемую тем, что импульс тока имеет конечную длительность. Для решения этого вопроса также были сняты осциллограммы импульса тока. Эти осциллограммы для включения тока от нуля до I_{\max} ,



Рис. 3. Осциллограмма импульса тока в измерительной цепи при измерении напряженности магнитного поля на размагничивающем участке гистерезисной кривой



Рис. 4. Осциллограмма импульса тока в измерительной цепи при измерении максимальной напряженности магнитного поля

для переключения тока от I_{\max} до $-I_{\max}$, для выключения тока от I_{\max} до нуля и для «скачка» тока от I_{\max} до $-I_{\max}$ приведены на рис. 5. Результаты примерного расчета отношения α/α_0 показывают, что

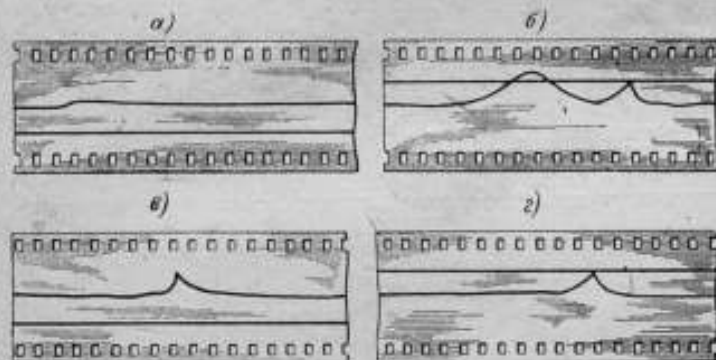


Рис. 5. Осциллограмма импульса тока в измерительной цепи при измерении магнитной индукции: а) включение, б) переключение, в) выключение, г) «скачок» тока

конечная длительность импульса тока и при измерении индукции играет заметную роль и вызывает погрешность порядка 1,5%.

Ошибка усугубляется еще тем, что определение постоянной баллистического гальванометра c_b производится в других условиях в отношении формы и длительности импульса тока, получаемого гальванометром.

Действительно, импульс тока, получаемый гальванометром при определении c_b , имеет совершенно другой вид (рис. 6). Убывание и нарастание тока происходит почти мгновенно ($\tau = 0,2 \text{ сек}$) и при такой длительности импульса погрешность в отклонении галь-

ванометра не будет превышать 0,4% при переключении тока в первичной цепи катушки взаимной индуктивности.

Для того чтобы приблизить режим работы гальванометра при определении c_0 к режиму при измерении индукции, можно поступить следующим образом.

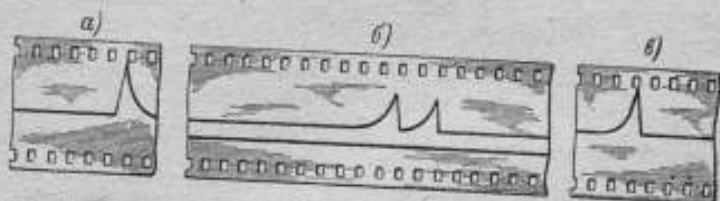


Рис. 6. Осциллограммы импульса тока в измерительной цепи при определении постоянной баллистического гальванометра: а) включение, б) переключение, в) выключение

В цепь электромагнита можно включить последовательно соответственно подобранные сопротивление и подавать снимаемое с него падение напряжения на зажимы первичной обмотки катушки взаимной индуктивности. На рис. 7 изображены осциллограммы, полученные для импульса тока во вторичной цепи катушки вза-

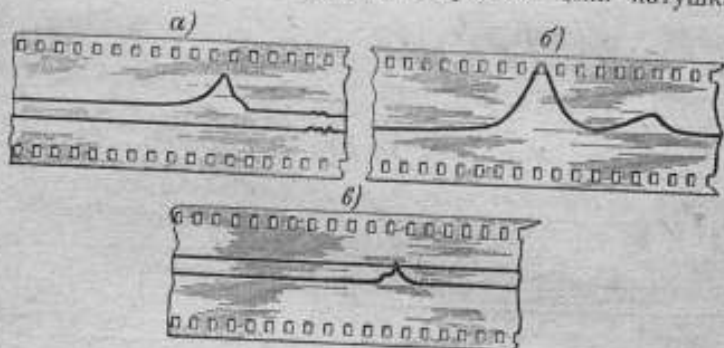


Рис. 7. Осциллограммы импульса тока в измерительной цепи в случае определения постоянной баллистического гальванометра при увеличенной индуктивности первичной цепи: а) включение, б) переключение, в) выключение

имной индуктивности при прохождении тока I_{max} через обмотки электромагнита и сопротивление R . Длительность импульса тока в этом случае близка к той, которая получается при измерении индукции методом коммутации тока. Таким образом, погрешность в отклонении α_1 при определении c_0 будет такого же порядка, что и в α_2 при определении индукции, и ошибка в измерении B , вызываемая конечной длительностью импульса тока, будет исключена. Для экспериментальной проверки зависимости погрешности в отклонениях гальванометра от индуктивности первичной цепи

при определении B , были сняты размагничивающие кривые одного и того же образца в пермеамetre ВНИИМ для сильных полей при разных условиях в первичной цепи. Пермеамetre для сильных полей представляет собой намагничивающее устройство, основанное на принципе ярма-перешейка. При снятии размагничивающих кривых напряженность поля измерялась выбросом измерительной катушки за пределы действия поля.

Кривая I на рис. 8 получена в пермеамetre, индуктивность намагничивающей цепи которого невелика, так же как и длительность импульса гальванометра при измерениях индукции. О длительности импульса тока в данном случае можно судить по осциллограммам, изображенным на рис. 9. Другая размагничивающая кривая II (рис. 8) получена в том же пермеамetre, но в его намагничивающую цепь была включена большая дополнительная индуктивность в виде электромагнита, который в дальнейшем был использован для определения кривых намагничивания (см. ниже).

Как показывают осциллограммы рис. 5, длительность импульса тока в этом случае возрастает настолько, что это должно привести к увеличению погрешности примерно на 1,5%. Действительно, размагничивающая кривая II идет ниже первой кривой приблизительно на эту величину (табл. 3).

Далее была проведена проверка теоретических положений о погрешностях в отклонении гальванометра за счет конечной длительности импульса в случае магнитных испытаний образцов высококоэрцитивных сплавов в большом электромагните Магнитной лаборатории ВНИИМ (рис. 10). Данный электромагнит снабжен приспособлением для вырывания образцов из междуполюсного пространства и позволяет получать при 100 мм междуполюсного расстояния напряженность поля порядка 4000 э.

Результаты испытаний в электромагните сравнивались с результатами, полученными в пермеамetre для сильных полей, так как при исследовании последнего было найдено, что погрешности определения магнитных характеристик в нем лежат в пределах, допустимых для баллистического метода.

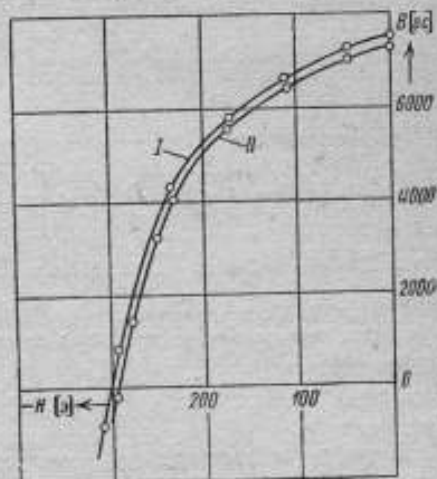


Рис. 8. Размагничивающие кривые, полученные в пермеамetre для сильных полей

I — пермеамetre для сильных полей; II — пермеамetre для сильных полей с последовательно включенным электромагнитом

Основные кривые, снятые для одного и того же образца из высококоэрцитивного сплава в пермеамetre и в электромагните, изображены на рис. 11 и приведены в табл. 4. Напряженность поля

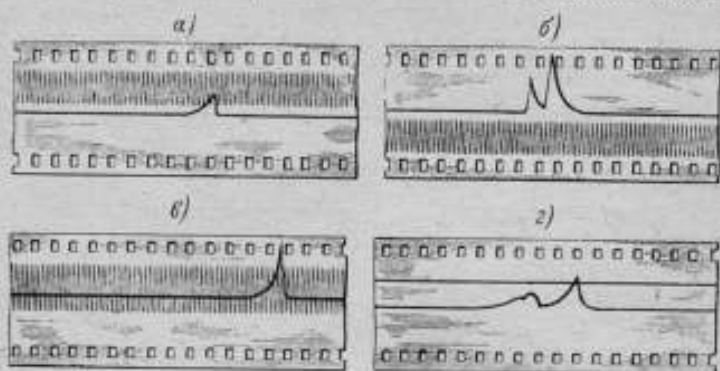


Рис. 9. Осциллограммы импульса тока в измерительной цепи при измерениях в пермеамetre для сильных полей: а) включение, б) переключение, в) выключение, г) «скачок» тока

при этих измерениях определялась выбросом измерительной катушки.

Кривая, полученная в электромагните, идет несколько ниже кривой, снятой в пермеамetre, и для максимального намагничива-

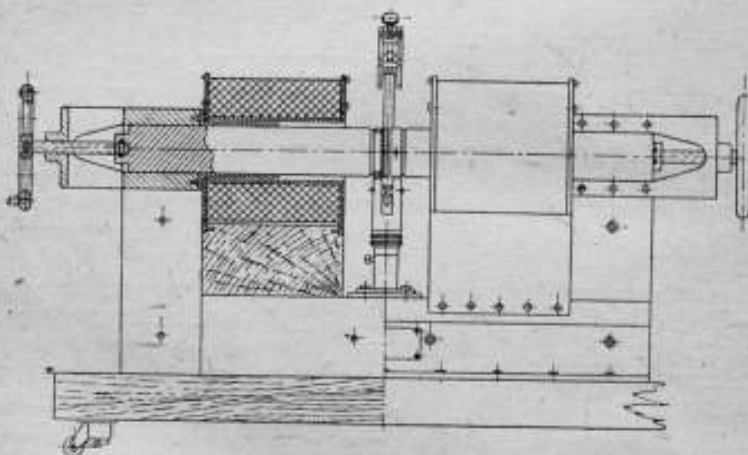


Рис. 10. Электромагнит магнитной лаборатории ВНИИМ

ющего поля в нашем опыте это понижение составляет примерно 1,5%. Объяснение этому дают осциллограммы импульса тока, полученного гальванометром при переключении тока в первичной цепи электромагнита (рис. 12).

Таблица 3

Размагничивающие кривые образца из железо-никель-алюминиевого сплава с поперечным сечением $s=5,95 \text{ см}^2$ и длиной $l=70 \text{ мм}$

Пермеаметр для сильных полей		Пермеаметр для сильных полей с последовательно-включенной индуктивностью	
Напряженность поля H [э]	Магнитная индукция B [эс]	Напряженность поля H [э]	Магнитная индукция B [эс]
0	7480	0	7290
45,3	7230	44,6	7030
113,3	6630	108,8	6420
173,7	5780	176,4	5570
235,7	4300	232,1	4130
292,3	810	250,3	3200
309,7	-838	278,2	1400
319,2	-1930	296,0	-198

Таблица 4

Основная коммутационная кривая намагничения образца из железо-никель-алюминиевого сплава с поперечным сечением $s=7,05 \text{ см}^2$ и длиной $l=70 \text{ мм}$

Пермеаметр для сильных полей		Электромагнит	
Напряженность поля H [э]	Магнитная индукция B [эс]	Напряженность поля H [э]	Магнитная индукция B [эс]
184,4	1870	183,1	2010
324,3	5180	431,6	7680
477,3	8680	530,9	9300
939,0	10820	974,3	10889
1254	11500	1471	11830
2189	12990	2742	13520
2830	13840	3255	14110
3140	14200		
3749	14940	3745	14750

Длительность импульса тока в гальванометре при испытании образца в электромагните, как это следует из осциллограммы (рис. 12), обуславливает погрешность в отклонении гальванометра примерно 1,5—2%, чем и может быть объяснено расхождение основных кривых намагничения.

Для того же образца были определены размагничивающие кривые в пермеамetre и в электромагните для одинакового максимального намагничивающего поля в 3500 э (рис. 13 и табл. 5).

Напряженность поля в обоих случаях измерялась выбросом плоской катушки, а индукция — методом переключения тока.

Размагничивающая кривая, снятая в электромагните, идет параллельно и значительно выше кривой, снятой в пермеамetre, причем для остаточной индукции расхождение составляет примерно 4%. Для выяснения причин, вызывающих эти расхождения, был проделан ряд экспериментов.

Прежде всего была погашена дуга, возникающая при выключении большого намагничивающего тока. Однако полученная при этом кривая размагничивания имела то же самое расхождение с кривой, снятой в пермеамetre, что и раньше.

Для выяснения влияния на погрешность определения магнитных характеристик в электромагните таких факторов, как индуктивность электромагнита и магнитная вязкость цепи его ярма, была определена размагничивающая кривая в пермеамetre, когда в его первичную цепь включалась индуктивность, в качестве которой был использован тот же электромагнит, в котором проводились испытания. Таким образом, индуктивность первичной цепи как при измерениях в электромагните, так и при измерениях в пермеамetre оставалась неизменной. Испытания проводились при одном и том же максимальном намагни-

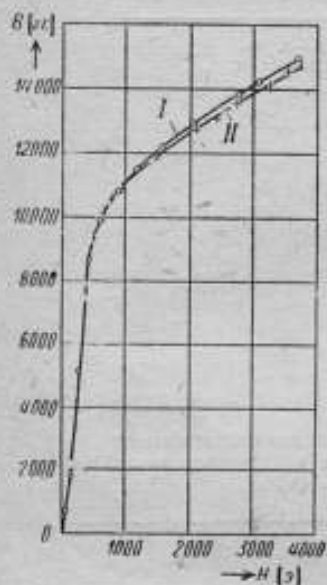


Рис. 11. Основные кривые намагничивания, полученные в пермеамetre и в электромагните

I — пермеаметр,
II — электромагнит

чивающем поле в обоих случаях. В результате кривая, снятая в пермеамetre с дополнительной индуктивностью в его первичной цепи, пошла ниже кривой, снятой без дополнительной индуктивности (рис. 8 и табл. 3).

Оциллограммы импульса тока, получаемого гальванометром, в обоих этих случаях (рис. 9 и 5) показывают, что длительность импульса тока увеличивалась при наличии большой индуктивности в первичной цепи.

Увеличение длительности импульса тока приводит, как известно, к уменьшению отклонения гальванометра. Отклонения уменьшаются как в случае переключения тока, так и в случае его скачка от максимального значения до некоторой отрицательной величины примерно на одну и ту же величину в процентном отношении, что

ведет к уменьшению на эту же величину и ординат размагничивающей кривой. Вследствие этого вся размагничивающая кривая располагается ниже, что и наблюдается экспериментально.

Если же образец испытывается в электромагните, но в его первичную цепь включен пермеаметр, то получающаяся при этом размагничивающая кривая практически совпадает с кривой, снятой



Рис. 12. Оциллограмма импульса тока в измерительной цепи при переключении тока в обмотке электромагнита

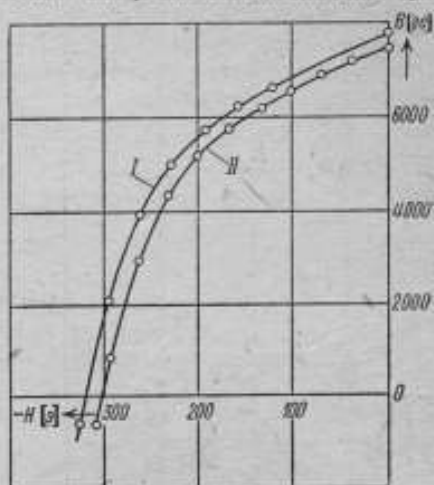


Рис. 13. Размагничивающие кривые, полученные в пермеаметре и электромагните

I — электромагнит, II — пермеаметр для сильных полей

в электромагните без включения пермеаметра в его первичную цепь (рис. 14 и табл. 6).

Из этих опытов следует, что пермеаметр обладает не столь значительной индуктивностью, чтобы заметно увеличить длительность импульса тока при измерениях в электромагните.

Таблица 5

Размагничивающие кривые образца из железо-никель-алюминиевого сплава с поперечным сечением $s = 7,05 \text{ см}^2$ и длиной $l = 70 \text{ мм}$

Пермеаметр для сильных полей		Электромагнит	
Напряженность поля H [э]	Магнитная индукция B [гс]	Напряженность поля H [э]	Магнитная индукция B [гс]
0	7490	0	7800
101,9	6590	120,5	6670
167,7	5770	157,1	6270
232,7	4350	229,3	5020
		294,9	2070
		319,9	-211
292,3	859	—	—
305,6	-595	—	—

Кроме того, на основании этих данных можно считать, что полученный ход кривой размагничивания в электромагните связан

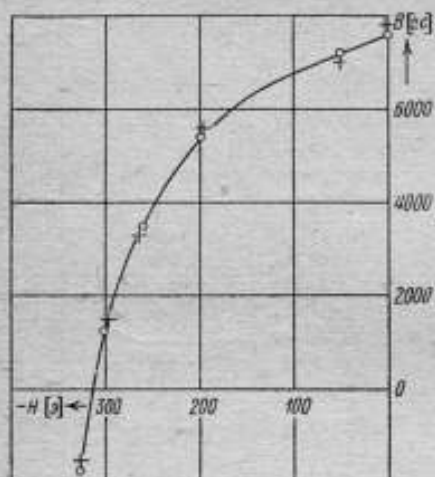


Рис. 14. Размагничивающие кривые, полученные в электромагните крестиком обозначены электромагнит, кругом — электромагнит с последовательно включенным пермеаметром для сильных полей

с магнитной вязкостью всей системы ярма с образцом и не может быть объяснен только индуктивностью электромагнита. Лишним подтверждением этому служит размагничивающая кривая, снятая в электромагните при параллельно включенных намагничивающих катушках, т. е. при уменьшенной индуктивности его цепи. Эта кривая снижается очень незначительно по сравнению с кривой, снятой при последовательно включенных катушках.

Причину параллельного сдвига размагничивающей кривой, полученной в электромагните, нельзя искать также в остаточном поле, хотя оно и достигает в данном случае значительной величины (порядка 20—25 э), так как напряженность поля каждый раз измерялась непосредственно методом выброса катушки за пределы действия поля.

Причину параллельного сдвига размагничивающей кривой, полученной в электромагните, нельзя искать также в остаточном поле, хотя оно и достигает в данном случае значительной величины (порядка 20—25 э), так как напряженность поля каждый раз измерялась непосредственно методом выброса катушки за пределы действия поля.

Таблица 6

Размагничивающие кривые образца из железо-никель-алюминиевого сплава с поперечным сечением $s = 7,05 \text{ см}^2$ и длиной $l = 70 \text{ мм}$

Электромагнит		Электромагнит с последовательно включенным пермеаметром для сильных полей	
Напряженность поля H [э]	Магнитная индукция B [гс]	Напряженность поля H [э]	Магнитная индукция B [гс]
0	7710	0	7680
53,3	7170	58,6	7190
201,3	5490	196,4	5450
265,1	3400	261,4	3490
299,7	1430	302,2	1260
325,8	-1570	324,8	-1730

Неоднородность поля в объеме, занимаемом измерительным устройством, столь незначительна, что также не может оказать существенного влияния на измерения напряженности поля.

При измерениях в электромагните нами было замечено, что включение и выключение максимального намагничивающего тока при снятии размагничивающей кривой дает различную величину отклонения гальванометра, соединенного с обмоткой для измерения индукции, в то время как для пермеаметра совпадение этих отклонений было полное. При выключении тока в электромагните отклонение гальванометра было меньше на величину, достаточную для объяснения полученного расхождения размагничивающих кривых.

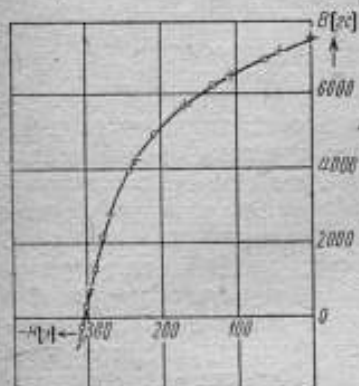


Рис. 15. Размагничивающие кривые, полученные в пермеаметре и электромагните крестиком обозначен пермеаметр для сильных полей; кружком — электромагнит

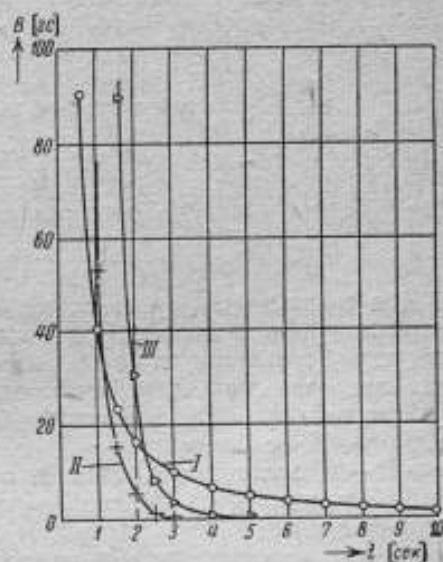


Рис. 16. Кривые изменения индукции во времени

I — выключение тока, II — включение, III — переключение

вых. Поэтому нами была снята кривая размагничивания таким образом, чтобы исключить из эксперимента выключение максимального намагничивающего тока. Для этого отклонение $\Delta\alpha_B$, соответствующее точке на кривой при $H = 0$, снималось включением максимального намагничивающего тока, а все остальные точки размагничивающей кривой — скачком от некоторой величины намагничивающего поля до максимального намагничивающего поля.

Снятая таким образом размагничивающая кривая практически совпадает с кривой, полученной в пермеаметре (табл. 7, рис. 15).

Итак, достаточно было исключить при измерениях размагничивающей кривой выключение максимального намагничивающего тока, как результаты, полученные при испытании в пермеаметре и электромагните, оказались совпадающими.

Таблица 7

Размагничивающие кривые образца из железо-никель-алюминиевого сплава с поперечным сечением $s = 7,05 \text{ см}^2$ и длиной $l = 70 \text{ мм}$

Пермеаметр для сильных полей		Электромагнит	
Напряженность поля H [э]	Магнитная индукция B [гс]	Напряженность поля H [э]	Магнитная индукция B [гс]
0	7480	0	7490
108,5	6590	130,8	6210
236,7	4260	245,9	3960
270,0	2820	—	—
296,5	800	290,3	1300
311,3	—578	303,4	275
	—	308,6	—240

Для выяснения вопроса о том, как происходит процесс изменения индукции во времени при выключении тока, был проделан следующий эксперимент. После выключения в обмотке электромагнита максимального намагничивающего тока, через определенные промежутки времени включался баллистический гальванометр, соединенный с измерительной обмоткой, навитой на образец Fe—Ni—Al стали и наблюдались отклонения гальванометра. На рис. 16 представлена кривая зависимости отклонений гальванометра от времени. Такие же кривые были сняты также для случаев включения и переключения тока (рис. 16). Процесс изменения индукции во времени в обоих последних случаях происходит гораздо быстрее, чем при выключении тока.

Медленное изменение индукции при выключении тока и приводит к наблюдавшемуся нами уменьшению величины отклонения гальванометра, в то время как подобное уменьшение для случая переключения тока будет незначительным.

При выключении тока в толще сплошного материала полюсных наконечников возникают вихревые токи, достигающие заметной величины.

Вихревые токи в замкнутой магнитной цепи, создавая поток, направленный противоположно изменению основного потока, замедляют процесс изменения последнего и, следовательно, приводят к уменьшению величины отклонения гальванометра.

Переключение тока можно представить как выключение и последующее включение тока. Таким образом, вихревые токи, возникшие при выключении, будут компенсироваться токами, появляющимися при включении, благодаря чему этот процесс происходит быстрее процесса при выключении тока, т. е. погрешность в отклонении гальванометра в первом случае будет меньше, чем во втором.

И действительно, кривая изменения индукции во времени при переключении намагничивающего тока идет в середине между кривыми, наблюдаемыми при включении и выключении тока.

В результате отклонение α_B (ордината размагничивающей кривой), которое находится как разность между половиной отклонения при переключении максимального тока и отклонения $\Delta\alpha_B$ при скачке от максимального тока до некоторой его отрицательной величины, будет преувеличено из-за уменьшенного значения $\Delta\alpha_B$. Увеличенные значения ординат и обусловят ход размагничивающей кривой, полученной нами в электромагните.

Дополнительным подтверждением того, что именно процессы, происходящие при нестационарном токовом режиме в намагничивающих катушках, приводят к получению завышенных значений магнитной индукции на размагничивающем участке гистерезисной кривой, определяемых в электромагните обычным коммутационным методом, служит следующее обстоятельство. Размагничивающая кривая, снятая в электромагните при установившемся токовом режиме, когда индукция определяется методом вырывания образца из междуполюсного пространства, совпадает с кривой, полученной в пермеамetre (рис. 17, табл. 8).

Вырывание образца осуществлялось с помощью специального приспособления, позволяющего определять индукцию на всем размагничивающем участке гистерезисной кривой.

При определении индукции этим методом ордината размагничивающей кривой получается как сумма двух отклонений: одного при вырывании образца и другого при сбрасывании измерительной катушки с нейтрального сечения образца. Напряженность поля в этом случае измеряется, как обычно, методом выброса катушки.

В заключение кратко сформулируем основные результаты, полученные в работе.

1. Путем экспериментальной проверки формулы (1) для погрешностей в отклонении баллистического гальванометра, возникающих вследствие конечной длительности импульса, установлено совпадение опытных и расчетных данных. Расхождение между ними не

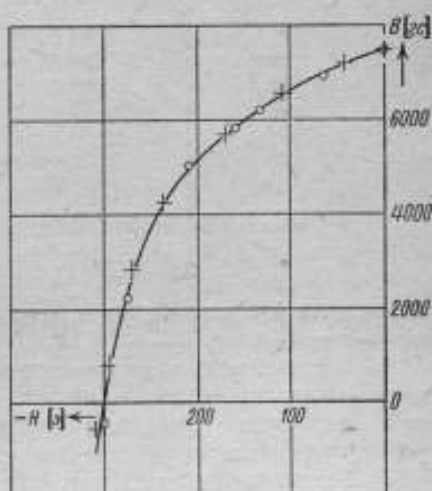


Рис. 17. Размагничивающие кривые, полученные в пермеамetre и электромагните
крестиком обозначен пермеаметр для сильных полей, кружком — электромагнит

Таблица 8

Размагничивающие кривые образца из железо-никель-алюминиевого сплава сечением $s = 7,05 \text{ см}^2$ и длиной $l = 70 \text{ мм}$

Пермеаметр для сильных полей		Электромагнит	
Напряженность поля H [э]	Магнитная индукция B [эс]	Напряженность поля H [э]	Магнитная индукция B [эс]
0	7480	0	7450
43,2	7220	65,4	6970
108,5	6590	132,1	6200
170,0	5720	159,3	5800
236,7	4250	209,2	5020
270,0	2820	274,6	2220
311,3	-578	300,8	-464

превышает 1% в том случае, если форма импульса близка к убывающей экспоненте.

2. Установлено наличие систематических погрешностей порядка нескольких процентов при применении баллистического метода при коммутации тока для определения напряженности поля на размагничивающем участке гистерезисной кривой.

3. Экспериментально исследовано явление замедленного изменения индукции в образце при снятии размагничивающей кривой в намагничивающих устройствах типа электромагнита с большой постоянной времени после выключения поля и установлены связанные с этим явлением погрешности.

4. Предлагается методика снятия размагничивающих кривых образцов высококоэрцитивных сплавов в простых намагничивающих устройствах типа электромагнита, позволяющая производить измерения путем включения намагничивающих токов и тем самым уменьшить погрешности при измерении индукции, обусловленные конечной длительностью импульса тока, получаемого гальванометром.*

ЛИТЕРАТУРА

Е. Г. Шрамков, Погрешности измерения магнитных характеристик ферромагнитных материалов, Труды ВНИИМ, вып. 1 (56), 1947.

* В Свердловском филиале ВНИИМ была проведена проф. Р. И. Янусом и его сотрудниками работа, рассматривающая общее решение задачи для случая, когда время баллистического импульса сравнимо с периодом колебания гальванометра.

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Н. Г. ЧЕРНЫШЕВА

Введение

Среди дополнительных погрешностей, определяющих качество электроизмерительного прибора, существенное значение имеет погрешность, вызываемая внешними магнитными полями, если иметь в виду, что магнитное поле окружает каждый электроизмерительный прибор.

Задачей работы являлось установление численного значения погрешностей от внешних магнитных полей, а также выяснение картины явлений, возникающих при наложении этих полей на магнитоэлектрические приборы.

Согласно нормам СССР, для этих приборов допустимой является дополнительная погрешность в 2% в магнитном поле напряженностью в 5 э (Л. 1, 2).

В условиях же эксплуатации в ряде производств, как, например, электролизном, электроизмерительные приборы оказываются в полях напряженностью порядка 20 э.

Кроме полей токоведущих шин, искажающее влияние на показания приборов оказывают поля соседних электроизмерительных приборов. В табл. 1 приведены значения напряженности магнитного поля у корпуса ряда магнитоэлектрических приборов.

Таблица 1

Корпус	Род прибора	Наибольшая напряженность поля у корпуса, э
Деревянный	Амперметр	11
Пластмасса	То же	10
Латунный	Вольтамперметр	9
Деревянный	То же	4
Пластмасса	»	10
Чугунный	Милливольтметр	4
Латунный	Гальванометр	10
Алюминиевый	То же	7

Даже лучшие конструкции магнитоэлектрических приборов, с точки зрения влияния на них внешних магнитных полей, дают в земном поле погрешность в 0,1% [Л. 3].

К магнитам электроизмерительных приборов, имея в виду их устойчивость к внешним полям, следует предъявить ряд требований. Прежде всего, они должны обладать большим запасом магнитной энергии для создания требуемой плотности потока в воздушном зазоре. При наложении магнитного поля их индукция, а следовательно, и полезный поток не должны иметь изменений, превышающих допустимую для прибора погрешность. Остаточные изменения индукции от действия внешних магнитных полей не должны выходить за установленные нормы, т. е. быть значительно меньше погрешности, определяющей класс точности прибора.

Обратимые изменения состояния магнита под влиянием внешних магнитных полей

Говоря о стали для постоянных магнитов, следует отметить, что ее поведение в замкнутой магнитной цепи под воздействием внешних магнитных полей характеризуется средней проницаемостью μ_{Δ} , являющейся функцией индукции. Эта средняя проницаемость различна для разных сталей и, наряду с размагничивающей кривой, является весьма важной характеристикой как стали, так и самого магнита.

Таблица 2

Наименование сталей	Химический состав по основным элементам	Средняя проницаемость μ_{Δ}	
		при B_0 *	при B_r
Вольфрамовая	5,5—6,5% W	32	21
Хромистая	2,8—3,8% Cr	31	20
Среднекобальтовая . . .	12—15% Co 8—10% Cr	10	7,6
Высококобальтовая . . .	30—35% Co 3—7% Cr	9,5	7,0
Никель-алюминиевая . . .	24—28% Ni 12—16% Al	5,4	3,9
Никель-алюминий-кобальтовая	24—30% Ni 9—13% Al 5—10% Co	3,7	3,0
Сталь состава кобальт-никель-титан-алюминий	27% Co 17,7% Ni 6,7% Ti 3,7% Al	3,8	2,8

* B_0 — индукция, соответствующая максимальной энергии.

Все изменения индукции магнита под действием внешних полей будут происходить обратимо, если его состояние характеризуется точкой на прямой возврата, тангенс угла наклона которой и является средней проницаемостью.

В табл. 2 приведены значения средней проницаемости ряда стале-лей для постоянных магнитов.

Переходя к рассмотрению процессов в постоянных магнитах, начнем с выяснения изменений индукции в нейтрале разомкнутого магнита под действием внешнего поля.

В табл. 3 приводится полученное нами относительное изменение индукции в нейтрале подковообразного магнита из вольфрамовой стали под действием внешнего постоянного поля напряженностью в 5 и 10 э. Наложение магнитного поля осуществлялось как вдоль, так и против магнитных линий, проходящих в нейтрале магнита.

Таблица 3

Напряженность внешнего поля, э	Относительное изменение индукции в нейтрале магнита, %	
	Поле совпадающего направления	Поле обратного направления
5	2,5	6,9
10	4,9	14,5

При рассмотрении реального магнита с полюсными наконечниками и сердечником будем исходить из возможности наложения внешнего поля в трех направлениях:

- 1) поле действует перпендикулярно ножкам магнита и направление его совпадает с направлением магнитного потока в нейтрале;
- 2) направление внешнего поля противоположно направлению магнитного потока в нейтрале магнита и
- 3) внешнее поле действует вдоль ножек магнита.

Влияние внешнего поля на магнит искусственно расчлняем на две независимые части:

- а) внешнее поле изменяет магнитодвижущую силу магнита и, следовательно, полезный поток в рабочем зазоре и
- б) поле накладывается на полюсные наконечники вместе с прилежащими к ним частями магнита и на воздушный зазор, изменяя плотность потока в зазоре.

Рассмотрим наложение внешних полей на магниты, намагниченные до и после сборки. Прежде всего остановимся на магнитах, намагниченных до сборки.

Предположим, что свободная магнитодвижущая сила сосредоточена в нейтрале магнита. В случае действия внешнего потока в направлении, совпадающем с направлением магнитного поля в нейтрале, считаем, что ножки магнита не подвержены его влиянию.

Состояние магнита, намагниченного в замкнутой цепи и затем разомкнутого, характеризуется на диаграмме (рис. 1) точкой P . Сборка магнита, т. е. надевание armатуры, переместит точку P по прямой возврата в точку P' . При наложении внешнего поля напряженностью h , направление которого совпадает с направлением магнитного потока в нейтрали, состояние магнита будет характеризоваться точкой K . Этому переходу соответствует увеличение индукции магнита ΔB , которое разделим на две примерно равные составляющие, пропорциональные полезному потоку и потоку утечки [Л. 4].

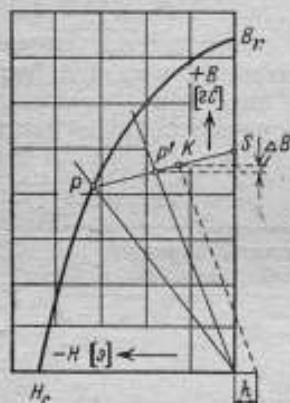


Рис. 1. Размагничивающий участок гистерезисной кривой

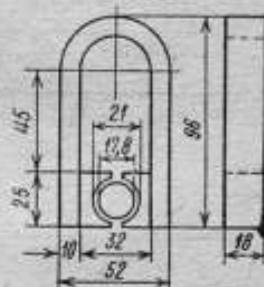


Рис. 2. Эскиз вольфрамового магнита

Составляющая, пропорциональная полезному потоку, даст приращение плотности потока в зазоре, равное

$$\Delta B_{12} = \frac{\Delta B \cdot s_m}{2s_3}$$

где s_m и s_3 — соответственно площади поперечного сечения магнита и зазора.

Уменьшив это выражение в отношении длины магнита l , на которой направление индукции совпадает с направлением внешнего поля, ко всей длине l , получим значение изменения плотности потока в зазоре, вызванное изменением магнитодвижущей силы магнита под влиянием внешнего поля.

Наложение внешнего поля того же направления на полюсные наконечники и зазор вызовет дополнительное изменение плотности потока в зазоре.

Это изменение, которое мы обозначим ΔB_{23} , будет отрицательным, так как направление внешнего поля в рассматриваемом случае обратно индукции в зазоре. Таким образом, разность $\Delta B_{12} - \Delta B_{23}$ даст общее изменение плотности потока в зазоре под влиянием внешнего поля.

Произведем подсчет изменения плотности потока в зазоре под влиянием внешнего поля на примере типичного вольфрамового магнита. Размеры магнита и его магнитные характеристики даны на рис. 2 и 3.

Воздушная проводимость данного магнита

$$P_A = 11,5 \text{ CGS } \mu_0.$$

Величина

$$P_A \cdot \frac{l}{s_m},$$

где l — длина магнита и

s_m — площадь его поперечного сечения,

дает тангенс угла наклона линии OZ_1 к оси абсцисс. Пересечение линии OZ_1 с гистерезисной кривой определяет точку P , характеризующую состояние магнита без арматуры. Индукция, соответствующая этому состоянию, в нашем примере равна $B = 6400 \text{ гс}$ и средняя проницаемость $\mu_\Delta = 40$. Таким образом, точка S соответствует индукции

$$B_1 = B + \mu_\Delta H = 6400 + 40 \cdot 48,5 = 8300 \text{ гс}.$$

Проводимость магнита с арматурой

$$P = P_a + P_p,$$

где

P_a — полезная проводимость,

P_p — проводимость рассеяния.

$$P = 14,0 + 14,2 = 28,2 \text{ CGS } \mu_0.$$

Линия OZ_2 определяется углом, тангенс которого равен

$$P \frac{l}{s_m} = 322.$$

Точка P' (пересечение линии OZ_2 с прямой возврата) соответствует индукции $B = 7420 \text{ гс}$.

Тангенс угла наклона линии OZ_2 к оси абсцисс равен

$$P_a \frac{l}{s_m} = 160.$$

Пересечение вертикали, опущенной из точки P' , с линией полезной проводимости OZ_3 даст точку R , делящую полный поток на полезный и поток рассеяния, пропорциональные соответственно отрезкам RM' и $P'R$.

Полезный поток

$$\Phi_a = 3680 \cdot 1,8 = 6620 \text{ макс.}$$

Поток рассеяния

$$\Phi_p = (7420 - 3680) \cdot 1,8 = 6370 \text{ макс.}$$

Плотность потока в зазоре данного магнита

$$B_s = \frac{\Phi_n}{S_2} = \frac{\Phi_n}{P_n 2(R-r)} = \frac{6620}{4,5} = 1470 \text{ гс,}$$

где R и r — внешний и внутренний радиусы воздушного зазора.

От действия внешнего поля напряженностью $h = 5 \text{ э}$, направление которого совпадает с направлением магнитного потока магнита в нейтрали, индукция магнита увеличится на величину $\Delta B = 180 \text{ гс}$ (точка P' на диаграмме рис. 3 займет положение K).

Ввиду того что полезный поток и поток рассеяния примерно

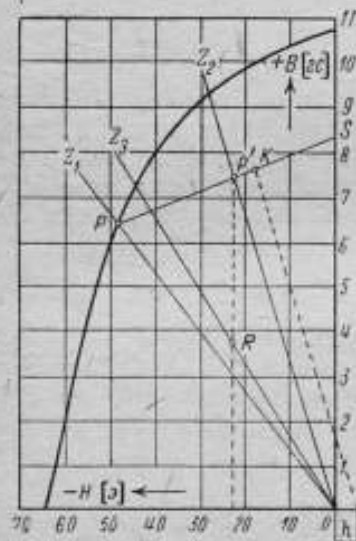


Рис. 3. Размагничивающий участок гистерезисной кривой вольфрамового магнита



Рис. 4. Электрическая схема, эквивалентная магнитной цепи

равны по величине, по результатам ряда расчетов и экспериментов, приращение полезного потока можно считать равным половине приращения полного потока, т. е.

$$\Delta \Phi_n = \frac{\Delta B}{2} S_n = 90 \cdot 1,8 = 162 \text{ мкс,}$$

откуда приращение потока в зазоре, вызываемое изменением магнитодвижущей силы в дуге магнита, равно

$$\frac{162}{6620} \cdot 100 = 2,4\%$$

и соответственно приращение индукции в зазоре

$$\Delta B_{12} = 0,024 \cdot 1470 = 35 \text{ гс.}$$

Умножив эту величину на отношение длины магнита l_1 , подвергнутой действию внешнего поля данного направления, ко всей длине магнита, равное в нашем примере $\frac{l_1}{l} = \frac{4}{21} = 0,19$, получим окончательно

$$\Delta B_{1z} = 35 \cdot 0,19 = 6,6 \text{ гс.}$$

Экспериментальное определение величины изменения индукции, заключающееся в измерении при помощи специальной катушки изменения плотности потока в зазоре под действием внешнего поля напряженностью в 5 э, создаваемого обмоткой на дуге магнита, дало значение 0,3%, а подсчет той же величины 0,4%.

Учитывая невысокую точность расчетов магнитных цепей, это совпадение можно считать вполне удовлетворительным.

Кроме изменения магнитодвижущей силы магнита, внешнее поле изменит плотность потока в зазоре, действуя на полюсные наконечники и сердечник.

Оценим количественно, исходя из представлений о магнитной цепи, эффект изменения плотности потока в зазоре от этого наложения поля.

По закону магнитной цепи магнитный поток равен магнитодвижущей силе, деленной на магнитное сопротивление:

$$\Phi = \frac{H \cdot l}{R}.$$

Для простоты рассуждений уподобим магнит электрической схеме, изображенной на рис. 4. Обозначим: r_0 — сопротивление магнита по дуге и ножкам до полюсных наконечников, r_1 — сопротивление полюсных наконечников, r_2 — сопротивление сердечника, r_3 — сопротивление участков магнита, соприкасающихся с полюсными наконечниками, r_4 — сопротивление воздушного зазора.

Напряженность внешнего поля в рассматриваемом случае равна 5 э, длина участка, к которому приложена данная магнитодвижущая сила, $l' = 5,2 \text{ см}$. Общее магнитное сопротивление магнита

$$R = \frac{r_0(2r_1 + r_2 + 2r_3 + 2r_4)}{r_0 + 2r_1 + r_2 + 2r_3 + 2r_4}.$$

$$r_0 = 0,22 \text{ CGS } \mu_0, \quad 2r_1 = 0,0006 \text{ CGS } \mu_0, \quad r_2 = 0,0014 \text{ CGS } \mu_0,$$

$$2r_3 = 0,011 \text{ CGS } \mu_0 \quad \text{и} \quad 2r_4 = 0,077 \text{ CGS } \mu_0.$$

Подставляя численные значения, получим:

$$R = 0,064 \text{ CGS } \mu_0.$$

Таким образом, полный поток, пронизывающий магнит, равен:

$$\Phi = \frac{5 \cdot 5,2}{0,064} = 406 \text{ мкс.}$$

Обозначим Φ_1 — поток, проходящий через сопротивление r_0 , а Φ_2 — поток через сопротивления r_1, r_2, r_3 и r_4 .

Тогда

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \frac{2r_1 + r_2 + 2r_3 + 2r_4}{r_0} = 0,41.$$

Поток, проходящий через зазор, т. е. тот же поток $\Phi_2 = 290$ макс и приращение плотности потока в зазоре

$$\Delta B_{2z} = \frac{\Phi_2}{s_z} = 64 \text{ зс.}$$

Однако, если напряженность поля, создаваемая посторонним источником, равна 5 э, то на зазор будет действовать поле меньшей напряженности из-за собственного размагничивающего поля магнита.

В данном магните на магнитную систему действовало поле напряженностью в 2,7 э. Тогда изменение плотности потока в зазоре от наложения поля будет равняться

$$\Delta B_{2z} = 64 \cdot \frac{2,7}{5,0} = 34,6 \text{ зс.}$$

Общее изменение плотности потока в зазоре под влиянием внешнего поля напряженностью в 5 э, направление которого совпадает с направлением магнитного потока в нейтрали магнита, равно

$$\Delta B_z = \Delta B_{1z} - \Delta B_{2z} = 6,6 - 34,6 = -28,0 \text{ зс.}$$

Суммарный эффект, по опытным данным, равен 26,5 зс и проявляется в уменьшении плотности потока в зазоре.

Таблица 4

Номер магнита	H_1
	H_2
1	1,9
2	2,1
3	2,0

Следует отметить, что практически можно ограничиться подсчетом изменения плотностей потока в зазоре только от прямого наложения поля, т. е. величины ΔB_{2z} .

Аналогичные подсчеты и экспериментальная их проверка были проведены для вольфрамовых магнитов других размеров. Об их собственных размагничивающих полях можно судить из данных табл. 4.

H_1 — напряженность внешнего поля.

H_2 — напряженность поля, измеренная катушкой на полюсных наконечниках.

Результаты измерений и подсчетов величин ΔB_z для нескольких магнитных систем приведены в табл. 5.

Экспериментальная проверка приведенных выше формул была проведена также и по показаниям магнитоэлектрических приборов, которые с целью повышения их чувствительности были переделаны на приборы с подавленным нулем. Подсчет изменения по-

Номер магнита	Данные	Изменение плотности потока в зазоре в гауссах под действием внешнего поля напряженностью в 5 э		Плотность потока в зазоре магнита B_z [эс]	Изменение плотности потока в зазоре магнита (суммарное) ΔB_z [эс]	Относительное изменение плотности потока в зазоре $\frac{\Delta B_z}{B_z}$ [%]
		от изменения магнитодвижущей силы магнита в нейтрали, ΔB_{1z}	от прямого наложения поля на зазор, ΔB_{2z}			
1	Расчет . . .	7,0	37,5	1470	30	2,1
	Эксперимент . . .	—	—	1290	26	2,0
2	Расчет . . .	5,9	31,7	900	26	2,9
	Эксперимент . . .	—	—	950	20	2,1
3	Расчет . . .	8,2	42,5	1600	34	2,1
	Эксперимент . . .	—	—	—	—	2,3

тока в зазоре магнита дал значение 2,1%, а опыт — 2,3% (табл. 5, номер магнита 3).

Случай действия поля, перпендикулярного ножкам и обратного по направлению магнитному потоку магнита в нейтрали, практически отличается от предыдущего только знаком суммарного изменения плотности потока в зазоре.

Итак, экспериментальные данные и расчеты показали, что внешнее поле напряженностью в 5 э, направленное перпендикулярно ножкам магнита, т. е. в самом невыгодном случае, изменяет плотность потока в зазоре приборов с вольфрамовыми магнитами на величину порядка 2—2,5%.

Для нескольких магнитов из никель-алюминиевой стали с размерами, указанными на рис. 5, также было проведено как экспериментальное, так и расчетное определение суммарной погрешности от действия внешнего поля.

Результаты экспериментальных определений приводятся в табл. 6.

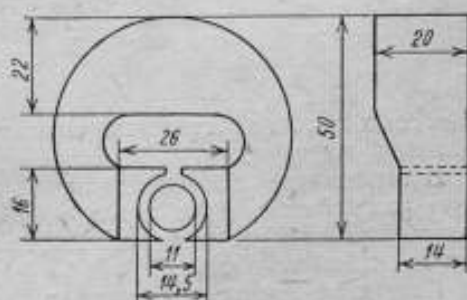


Рис. 5. Эскиз никель-алюминиевого магнита

Таблица 6

Номер магнита	Плотность потока в зазоре B_g [гс]	Изменение плотности потока в зазоре в гауссах под действием внешнего поля напряженностью в $H = 5 \text{ э}$	Относительное изменение плотности потока в зазоре $\frac{\Delta B_g}{B_g}$ [%]
1	1560	12,2	0,8
2	1380	12,3	0,9
3	1330	12,0	0,9

Для сопоставления этих данных с расчетом проведем последний для одного из никель-алюминиевых магнитов. Изменение плотности потока в зазоре от действия магнитного поля на нейтраль в данном случае оказалось равным

$$\Delta B_{1g} = 5,3 \text{ гс},$$

а от прямого наложения поля на зазор

$$\Delta B_{2g} = 17,3 \text{ гс}.$$

Таким образом, суммарное изменение плотности потока в зазоре

$$\Delta B_g = \Delta B_{1g} - \Delta B_{2g} = -12,0 \text{ гс},$$

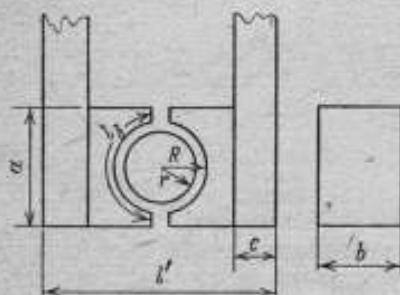


Рис. 6. Эскиз рабочего пространства магнитной системы

т. е. с достаточной степенью точности совпадает с экспериментальными данными.

В заключение приведем выведенную нами формулу, обобщающую разобранные выше примеры расчета и позволяющую проводить численный подсчет влияния магнитного поля с достаточной для практики точностью.¹

Изменение плотности потока в зазоре магнита под влиянием внешнего поля равно

$$\Delta B_g = \Delta B_{1g} - \Delta B_{2g}. \quad (1)$$

Изменение плотности потока в зазоре от изменений магнитодвижущей силы магнита в нейтрали под влиянием внешнего поля

$$\Delta B_{1g} = \frac{\epsilon_m}{s_g} \cdot \frac{l_1}{l} \cdot \Delta B \frac{\Phi_n}{\Phi}$$

¹ Приводимые формулы не относятся к магнитам внутрирамочных приборов.

или приближенно

$$\Delta B_{12} = \frac{s_m}{s_g} \cdot \frac{l_1}{l} \mu_{\Delta} H \frac{\Phi_m}{\Phi}, \quad (2)$$

где

- ΔB — изменение индукции в нейтрали,
 s_m — площадь поперечного сечения магнита,
 s_g — площадь зазора,
 l_1 — длина участка магнита, на который воздействует внешнее поле,
 l — длина магнита,
 μ_{Δ} — средняя проницаемость,
 H — напряженность внешнего поля,
 Φ_m — полезный поток магнита,
 Φ — полный поток магнита.

Изменение плотности потока в зазоре от прямого наложения внешнего поля на зазор и наконечники

$$\Delta B_{23} = \frac{l'}{2s_g(2r_1 + r_2 + 2r_3 + 2r_4)} H, \quad (3)$$

где

- l' — расстояние между наружными поверхностями ножек магнита,
 r_1 — магнитное сопротивление полюсных наконечников,
 r_2 — магнитное сопротивление сердечника,
 r_3 — магнитное сопротивление участков магнита, прилегающих к полюсным наконечникам,
 r_4 — магнитное сопротивление воздушного зазора.

Пренебрегая в формуле (3) членами $2r_1$ и r_2 , ввиду их малости, и подставляя значения

$$r_3 = \frac{c}{ba\mu_{\Delta}} \quad \text{и} \quad r_4 = \frac{R-r}{l_3 b},$$

можно для подсчета величины ΔB_{23} предложить следующую упрощенную формулу:

$$\Delta B_{23} = \frac{l'}{4s_g \left(\frac{c}{ba\mu_{\Delta}} + \frac{R-r}{l_3 b} \right)} H. \quad (4)$$

(буквенные обозначения соответствуют рис. 6).

Анализируя данные подсчета по приведенным выше формулам и результаты экспериментов, можно сделать вывод, что полученные формулы могут быть рекомендованы при конструировании магнитоэлектрических приборов для предварительной оценки погрешности, вызванной влиянием внешних магнитных полей.

Рассматривая случай наложения поля, направленного параллельно ножкам, мы видим, что дуга магнита оказывается практически вне воздействия внешнего магнитного поля.

Этот случай разобран в работах Н. Н. Разумовского [Л. 5], а кроме того, как показали наши эксперименты, при напряженности поля в 5 э изменение плотности потока в зазоре составляло всего лишь 0,2%, т. е. изменение плотности потока в зазоре оказывается примерно в 10 раз меньшим, чем для случая действия поля, перпендикулярного ножкам.

В табл. 7 приведены экспериментальные данные об относительном изменении плотности потока в зазоре под влиянием полей различной напряженности, направленных вдоль ножек магнита и перпендикулярно к ним.

Таблица 7

Напряженность внешнего поля, \mathcal{E}	Изменение плотности потока в зазоре магнитов, %	
	Внешнее поле направлено перпендикулярно ножкам магнита	Внешнее поле направлено вдоль ножек
5,0	2,1	0,16
7,7	3,2	0,26
9,3	3,9	0,31

Приведенные выше формулы справедливы и для подсчета изменения плотности потока в зазоре магнитов, намагниченных после сборки, под действием внешнего поля, совпадающего по направлению с потоком в нейтрале магнита или направленного ему навстречу. Расчеты и их экспериментальная проверка даны в табл. 8 в сопоставлении с рассмотренными ранее случаями.

Таблица 8

Номер магнита	Относительное изменение плотности потока в зазоре, %			
	Расчет		Эксперимент	
	Намагничен до сборки	Намагничен после сборки	Намагничен до сборки	Намагничен после сборки
1	2,1	1,7	2,3	1,5
2	2,9	1,9	2,1	1,6
3	2,1	1,6	2,3	—

Необратимые изменения состояния магнита под влиянием внешних магнитных полей

До сих пор нами рассматривались изменения магнитного состояния магнитов в момент действия внешнего поля, имевшие обратимый характер.

Однако при наложении больших переменных и постоянных полей возможны также и необратимые влияния. В литературе имеются указания на то, что переменное поле напряженностью в 20 э уменьшает плотность магнитного потока вольфрамовых магнитов приборов на несколько процентов. На рис. 7 приведены кривые уменьшения индукции под влиянием переменных размагничивающих полей для различных сталей, полученные в результате обработки материалов различных исследований. Как видно из кривых, поле напряженностью, равной коэрцитивной силе материала, вызывает уменьшение остаточной индукции больше, чем на 50%. Эти данные относятся к длинным магнитам, находящимся в условиях, близких к замкнутой магнитной цепи.

Рассмотрение этих кривых, а также работ различных исследователей [Л. 6, 7, 8] обнаружило неполноту освещения данного вопроса. В связи с этим мы считали целесообразным уделить особое внимание вопросу о соотношении между напряженностью внешнего поля, т. е. поля пространства, в котором может оказаться прибор в условиях эксплуатации, и поля размагничивающего.

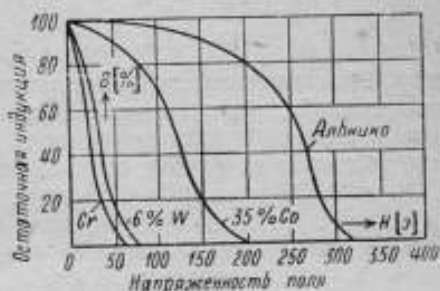


Рис. 7. Изменение индукции для различных сталей в функции размагничивающего переменного поля

Задачей ряда экспериментов было установление порядка тех внешних полей, которые вызывают необратимые изменения плотности потока в зазоре магнита. Рассмотрение этих процессов было начато с изучения разомкнутого магнита. В табл. 9 приведены значения относительного изменения индукции в нейтрали магнита после действия внешнего поля различной напряженности. Для сопоставления в этой же таблице приводятся данные для вольфрамовой стали, т. е. для полностью замкнутой магнитной цепи.

Как видно из этой таблицы, значения напряженности полей, вызывающих одно и то же остаточное изменение магнитной индукции, для разомкнутого магнита оказались значительно большими, чем для стали. Это явление находит свое объяснение в том, что намагниченный разомкнутый магнит сам является источником поля, направленного противоположно внешнему, и результирующее поле получается меньшей напряженности, чем это указано в табл. 9.

Для установления численного соотношения между величиной напряженности размагничивающего поля и остаточными изменениями индукции, было определено изменение плотности потока в зазоре магнита, считая ее пропорциональной индукции магнита. Магнит с полюсными накопечниками и сердечником приближенно рассматривали воспроизводящим условия замкнутой магнитной

Таблица 9

Напряженность внешнего поля, э	Изменения индукции в нейтрале разомкнутого магнита, %	Изменения индукции стали, %
1	0	1,0
10	0,9	8,0
30	4,3	30
50	7,9	85
70	11,3	98
80	13,0	100
100	16,4	—

цепи. Размагничивающее поле создавалось обмоткой, распределенной по всей длине магнита. Остаточное изменение плотности потока в зазоре магнита измерялось баллистическим методом путем выдергивания из зазора специальной измерительной катушки.

В табл. 10 приводятся результаты этих измерений, показывающие, что эффект наложения поля существенно различен для различных направлений внешнего поля.

Таблица 10

Напряженность внешнего поля, направленного противоположно потоку в нейтрале магнита, э	Относительное изменение плотности потока в зазоре магнита, %	Напряженность внешнего поля, совпадающего по направлению с потоком в нейтрале магнита, э	Относительное изменение плотности потока в зазоре, %
2	2,4	5	0
4	4,8	10	0
6	7,9	20	0
10	11,4	30	0
15	18,4	40	0
20	22,9	50	0

В случае, если магнит был собран и затем намагничен, его поведение во внешних полях аналогично поведению стали, т. е. при действии внешнего поля в направлении, совпадающем с направлением намагничения, изменения индукции происходят обратимо по прямому обратных циклов, при противоположном же направлении — по размагничивающей кривой гистерезисного цикла.

В магнитах, собранных после намагничения или магнитно стабилизированных, в случае намагничения после сборки, изменения магнитного состояния в значительном диапазоне полей проис-

ходят обратимо по прямым возврата, независимо от направления внешнего поля [Л. 9, 10).

В табл. 11 приводятся данные об остаточном изменении плотности потока в зазоре после действия размагничивающих полей

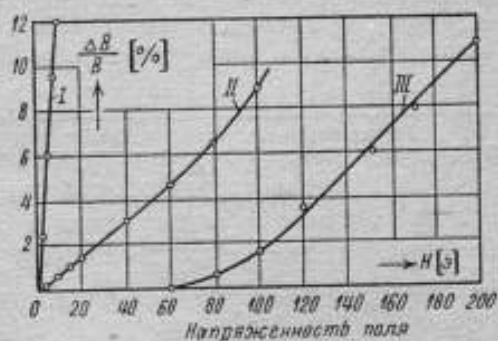


Рис. 8. Изменение индукции в функции постоянного размагничивающего поля
I — сталь, II — магнит, намагниченный после сборки, III — магнит, намагниченный до сборки

различной напряженности на один и тот же магнит, намагниченный до и после сборки (см. также рис. 8, где для сопоставления приведена кривая I изменения индукции для сталей).

Таблица 11

Напряженность размагничивающего поля, э	Остаточные изменения плотности потока в зазоре магнита, %	
	Намагничен до сборки (кривая III)	Намагничен после сборки (кривая II) без магнитной стабилизации
5	0	0,3
15	0	1,0
40	0	3,1
80	0,5	6,4
100	1,3	9,0

Эти данные показывают, что магниты, намагниченные после сборки, обнаруживают остаточные погрешности в пределах основной погрешности прибора в размагничивающих полях напряженностью в единицы эрстед, в то время как для магнитов, намагниченных до сборки, поля напряженностью порядка 50—60 э еще безопасны.

Для выяснения вопроса о соотношении величин размагничивающих полей для стали и магнита, вызывающих одинаковые остаточные изменения индукции, были измерены изменения индукции в нейтрале сначала в разомкнутом магните, а затем при постепенном замыкании его полюсными наконечниками, сердечником и, наконец, накоротко якорем.

Данные этих экспериментов приведены в табл. 12 и на рис. 9.

Таблица 12

Остаточные изменения индукции в нейтрале, %	Напряженность размагничивающего поля, μ				
	Сталь (I)	Разомкнутый магнит (II)	Магнит с полюсными наконечниками (III)	Магнит с системой (IV)	Замкнутый накоротко магнит (V)
0,2	0,2	1,0	5,0	42	60
0,5	0,6	2,2	13	49	80
1,0	1,2	4,4	23	58	97
2,0	2,5	8,0	36	65	118
3,0	3,8	10	43	74	132
4,0	5,0	13	48	80	140

Цифры в скобках указывают обозначения кривых на рис. 9. Объяснение этого расхождения в значениях напряженности размагничивающего поля можно дать следующим образом.

Прежде всего необходимо отметить, что напряженность поля, действующего на магнит, не равна напряженности внешнего поля, а имеет меньшую величину из-за размагничивающего действия самого магнита.

Кроме того, при различном замыкании магнита поток силовых линий внешнего размагничивающего поля, естественно, идет по пути наименьшего магнитного сопротивления. Если поместить разомкнутый магнит в однородное магнитное поле, то большая часть силовых линий пройдет через тело магнита и лишь небольшое количество их будет проходить между ножками магнита через воздух. Обозначим первую группу линий через *A*, вторую — через *B*. В данном случае нас интересует первая часть потока, изменяющего магнитодвижущую силу магнита в дуге и, следовательно, вызывающего необратимые изменения плотности потока в зазоре.

При замыкании магнита полюсными наконечниками произойдет перераспределение потоков: поток *A* уменьшится, а поток *B* увеличится, так как для последнего потока магнитное сопротивление стало меньше. Помещение сердечника между полюсными наконечниками еще больше увеличит поток *B* и соответственно уменьшит поток *A*. При замыкании магнита накоротко якорем из магнитно-мягкого материала поток *B* будет значительно больше потока *A*.

При действии внешнего поля вдоль ножек размагничивающее действие магнита будет меньше, чем при действии поля перпендикулярно ножкам, так как соотношение размеров магнита обуславливает меньший коэффициент размагничивания. Степень разомкнутости магнита в этом случае не играет существенной роли, так как почти весь поток, создаваемый внешним полем, пройдет вдоль ножек и лишь незначительная его часть ответвится в полезное пространство.

Следовательно, при действии поля, направленного вдоль ножек магнита, последний оказывается более устойчивым к внешним полям, чем при действии поля в перпендикулярном направлении.

Законно поставить вопрос о том, что же будет происходить при применении других сталей, имеющих другой наклон и длину прямых возврата. Естественно, что чем меньше средняя проницаемость и чем больше коэрцитивная сила стали, тем более устойчивым по отношению к внешним полям будет изготовленный из нее магнит [Л. 6]. Подтверждение этому можно найти в литературных данных (см. рис. 7) для 35% Со стали и

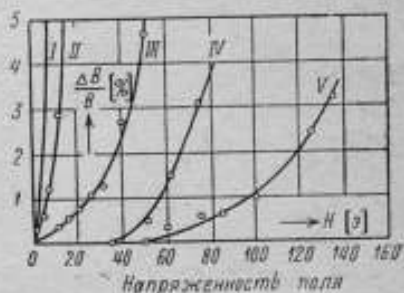


Рис. 9. Остаточные изменения индукции, вызванные действием постоянного магнитного поля на магниты с различным воздушным зазором

стали «сальнико», приведенными наряду с данными для вольфрамовой стали.

Это положение было бы справедливо и для изготовленных из разнородной стали магнитов, если бы они имели одни и те же конструктивные параметры.

В табл. 13 и на рис. 10 (кривая IV) приведены типичные данные испытания разомкнутого никель-алюминиевого магнита (см. рис. 5), показывающие значительную разницу в величинах напряженности полей, вызывающих такие же остаточные изменения у разомкнутого вольфрамового магнита (см. рис. 9, кривая II).

Испытания замкнутого никель-алюминиевого магнита (рис. 10, кривая II и табл. 14) той же формы не показали существенного различия с вольфрамовым магнитом, что объясняется особенностью формы данного никель-алюминиевого магнита (большая площадь сечения представляет для потока внешних силовых линий сравнительно малое сопротивление и, следовательно, их размагничивающее действие будет велико).

Таблица 13

Напряженность внешнего поля, э	Остаточные изменения индукции в нейтрале, %
10	0
30	0
50	0,2
100	1,1
150	2,4

При действии на магниты переменных полей размагничивающий эффект определяется амплитудным значением внешнего переменного поля. Сравнение размагничивающего действия постоянного и переменного полей дано на рис. 11 и 12.

После магнитной стабилизации магнитов, т. е. частичного размагничивания их переменными полями с убывающей амплитудой, поля меньшей напряженности не дают остаточных изменений плотности потока в зазоре.

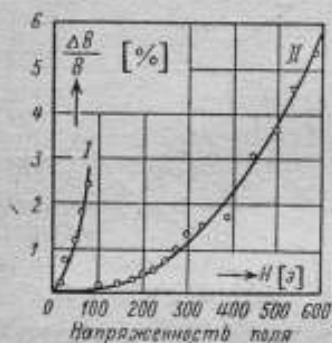


Рис. 10. Изменение индукции в функции постоянного размагничивающего поля
I — разомкнутый и II — замкнутый
арматурой никель-алюминиевый магнит

Таблица 14

Напряженность внешнего поля, э	Остаточное изменение плотности потока в зазоре магнита, %
75	0
100	0,1
150	0,2
200	0,4
300	1,3
450	3,0
580	5,4

Для выяснения вопроса о соотношении между внешним полем и внутренним, стабилизирующим, были измерены остаточные изменения индукции после действия поля, создаваемого один раз со-

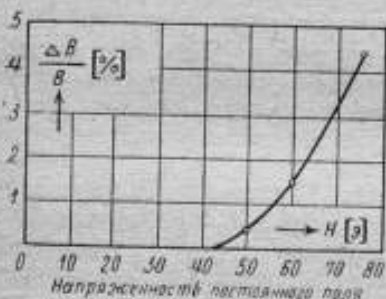


Рис. 11. Изменение индукции в функции постоянного размагничивающего поля

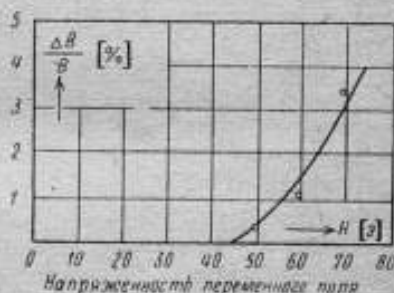


Рис. 12. Изменение индукции в функции переменного размагничивающего поля

нодом, внутри которого помещался магнит, а второй — обмоткой, навитой непосредственно на дугу магнита (форму магнита см. на рис. 2). Результаты этих экспериментов приведены в табл. 15.

Данные этой таблицы показывают, в соответствии с высказанными ранее положениями, что определенное изменение плотности потока в зазоре магнита вызывается приблизительно в 8 раз боль-

шей напряженностью внешнего магнитного поля, чем можно было ожидать из рассмотрения поведения стали при размагничении.

Таблица 15

Остаточные изменения плотности потока магнита, %	Напряженность стабилизирующего поля, э	
	внутреннее	внешнее
5	4	36
10	8	58
15	10	80
20	12	95
30	17	130
40	21	162

Следует остановиться также на влиянии стабилизирующих полей на магниты, намагниченные после сборки, и, в частности, сопоставить эти данные со стабилизирующим действием самой сборки [Л. 10]. Эксперименты с вольфрамовыми подковообразными магнито-

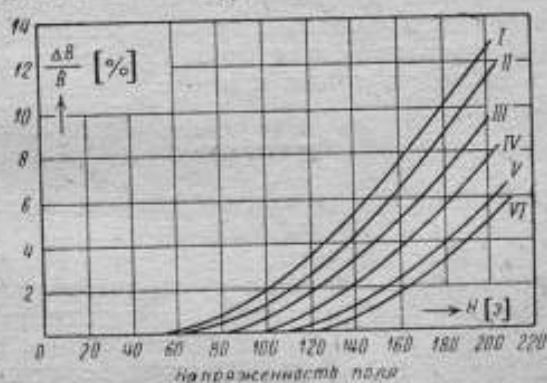


Рис. 13. Изменение индукции в функции постоянного размагничивающего поля стабилизированного магнита

I — $H_z = 10$ э; II — сборка; III — $H_z = 13,5$ э; IV — $H_z = 15$ э;
V — $H_z = 18$ э; VI — $H_z = 22,5$ э

тами показали, что магниты, намагниченные после сборки, при однократном размыкании и замыкании их обмоткой теряют примерно 25% своей плотности потока в зазоре, а после трехкратного повторения этой операции наступает стабильное состояние. Этот же эффект достигается действием на намагниченный после сборки магнит переменного поля убывающей амплитуды с максимальным значением напряженности поля порядка 15 э.

В табл. 16 приведены сравнительные данные о поведении во внешнем постоянном поле намагниченного после сборки магнита,

Остаточные изменения плотности потока в зазоре магнита, %	Напряженности постоянного внешнего поля в эрстедах после стабилизации сборкой и переменными полями (H_{\max})					
	Сборка	$H_{\max} = 14 \text{ э}$	$H_{\max} = 19 \text{ э}$	$H_{\max} = 21 \text{ э}$	$H_{\max} = 25 \text{ э}$	$H_{\max} = 32 \text{ э}$
0,2	60	60	86	104	110	125
0,5	80	73	98	114	124	137
1,0	94	86	108	125	136	150
2,0	111	103	126	140	155	168
3,0	126	118	140	163	170	180
4,0	138	130	152	165	182	193

стабилизированного переменными полями различной напряженности и сборкой (рис. 13).

На основании этих данных можно составить представление о поведении магнитов в различных постоянных магнитных полях, если к ним предъявлены определенные требования в отношении стабильности плотности потока в зазоре.

Заключение

В настоящей работе изучались как обратимые, так и необратимые влияния постоянных и переменных внешних магнитных полей на магнитоэлектрические приборы.

Рассмотрение влияния полей, с учетом требования ГОСТ, приводит к выводу, что приборы с любыми магнитами не будут иметь в момент отсчета погрешностей больших, чем основная погрешность, соответствующая классу точности, в полях, напряженность которых не превосходит значений, указанных в табл. 17.

При конструировании магнитной системы можно заранее учесть величину возможных обратимых изменений плотности потока в зазоре, если провести расчет по формуле (1).

При необратимых влияниях существенно, намагничен ли магнит до или после сборки. Если магнит был намагничен до сборки, то пределом напряженности внешнего поля, после которого изменение плотности потока в зазоре подковообразного вольфрамового

Таблица 17

Класс точности прибора	Допустимая напряженность внешнего магнитного поля, э
0,1	0,2
0,2	0,5
0,5	1,2
1,0	2,0
1,5	3,7

магнита становится необратимым, является напряженность в 50—60 э. При такой величине напряженности поля остаточные изменения плотности потока в зазоре имеют порядок 0,2%. В случае же магнитов, намагниченных после сборки (без магнитной стабилизации), такое остаточное изменение плотности потока в зазоре наблюдается в поле напряженностью 4—5 э.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конструкция электронизмерительных приборов, под ред. Н. Н. Пономарева, 1935.
2. Теория, расчет и конструирование электронизмерительных приборов, под ред. Н. Н. Пономарева, 1943.
3. Энциклопедия технических измерений, вып. 3, 1935.
4. Р. Пикку. Постоянные магниты, расчет и техника их применения, 1931.
5. Н. Н. Разумовский. Расчет магнитов. Бюллетень ВЭО, № 11—14, 1930. Вестник электропромышленности, № 12, 1930.
6. R. C. Gray. The magnetic stability of permanent magnets. *Philosophical Magazine*, 7 series, 2, 1926, p. 521.
7. Б. М. Яновский. Методы получения устойчивых магнитов. Журнал геофизики и метеорологии, т. 6, 1929.
8. R. L. Sanford. Permanent Magnets. Circular of the National Bureau of Standards, C. 448, 1944.
9. Н. Н. Разумовский. Расчет методом постепенного интегрирования магнитов, собранных после намагничивания. Известия электропромышленности слабого тока, № 12, 1940.
10. Н. Н. Разумовский. Применение метода постепенного интегрирования к магнитным системам, подвергнутым магнитной стабилизации частичным размагничиванием. Известия электропромышленности слабого тока, № 11, 1940.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ ВОСПРИИМЧИВОСТИ ЗОЛОТА, СЕРЕБРА И МЕДИ

Е. А. СОКОЛОВА

Одной из задач Магнитной лаборатории ВНИИМ является установление значений магнитной восприимчивости пара- и диамагнитных материалов.

Определение этой величины необходимо как для создания нормальных образцов пара- и диамагнитных материалов, которыми снабжаются заводские лаборатории, так и для изучения магнитных характеристик материалов, используемых при изготовлении образцовых приборов и эталонов.

В этом последнем случае особый интерес представляют химически чистые металлы, являющиеся исходными элементами или реперами в ряде эталонных работ.

Первая часть работы по созданию нормальных образцов пара- и диамагнитных материалов была начата в 1938 г. и тогда же дала определенные положительные результаты в виде установленных значений магнитной восприимчивости ряда химически чистых соединений, которые опубликованы в трудах ВНИИМ за 1940 и 1947 гг. [Л. 1 и 2]. В послевоенные годы работа по созданию нормальных образцов была продолжена в 1948 г., в результате чего лаборатория восстановила снабжение заинтересованных организаций нормальными образцами парамагнитных материалов. В настоящее время лаборатория располагает набором химически чистых веществ, служащих для изготовления нормальных образцов, в число которых входят химически чистые соединения с вновь определенными значениями удельной магнитной восприимчивости, такие, как $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; $\text{FeSO}_4 \cdot (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; MnF_2 ; CoF_2 ; $\text{Mn}_2\text{P}_2\text{O}_7$; NiO ; Cr_2O_3 .

Работа по химически чистым металлам является комплексной проблемой для ряда лабораторий ВНИИМ и включает, кроме задачи получения химически чистых металлов, также определение целого ряда их свойств.

В настоящей работе приводятся первые данные, полученные ВНИИМ для магнитной восприимчивости химически чистых золота, серебра и меди.

Разработанная технология изготовления образцов обеспечила сохранение чистоты полученных от Химической лаборатории чистых металлов.

Имея конечной целью получение точных значений магнитной восприимчивости чистых металлов, лаборатория вела исследование образцов в процессе химической очистки от исходного материала до конечного продукта.

Измерения магнитной восприимчивости чистых металлов производились абсолютным методом, сущность которого сводится к следующему. Испытуемый образец в форме цилиндрического стержня подвешивается к одной из чашек чувствительных аналитических весов, расположенных над электромагнитом так, что одно из оснований образца помещается на горизонтальной оси симметрии в центре между полюсами электромагнита, где градиент поля равен нулю, а второе основание образца оказывается вне полюсов.

Производится взвешивание образца. Затем, при наличии поля в междуполюсном пространстве, уравнивается действующая на образец сила притяжения или отталкивания, в зависимости от того пара- или диамагнитен образец. Величина этой силы определяется по изменению массы гирь, уравнивающих образец.

Значение удельной магнитной восприимчивости образца вычисляется по формуле:

$$\chi = \frac{2mg}{sD(H^2 - H_0^2)},$$

где

m — изменение массы уравнивающих образец гирь при включенном токе в обмотке электромагнита,

s — сечение образца,

D — плотность образца,

H — напряженность поля у основания образца в центре между полюсами,

H_0 — напряженность поля у основания образца, находящегося вне полюсов,

g — ускорение силы тяжести.

Измерение H и H_0 производилось баллистическим методом при помощи измерительной катушки, удаляемой из поля.

С учетом поправки на восприимчивость окружающей среды, формула для вычисления удельной магнитной восприимчивости принимает вид:

$$\chi = \chi_0 \frac{D_0}{D} + \frac{2mg}{sD(H^2 - H_0^2)},$$

где χ_0 и D_0 — соответственно удельная магнитная восприимчивость и плотность окружающей среды.

Подробное изложение теории метода и описание схемы установки даны в статье Б. М. Яновского и Н. И. Спиридовича [Л. 1].

В настоящей работе применявшиеся ранее микровесы были заменены аналитическими весами с пределом измерения 20 г и чувствительностью 0,015 мг на одно деление микрошкалы. Весы были специально переделаны для измерений магнитной восприимчивости пара- и диамагнитных материалов. Все подвижные части весов изготовлены из немагнитного материала и затем позолочены с целью предохранения от коррозии.

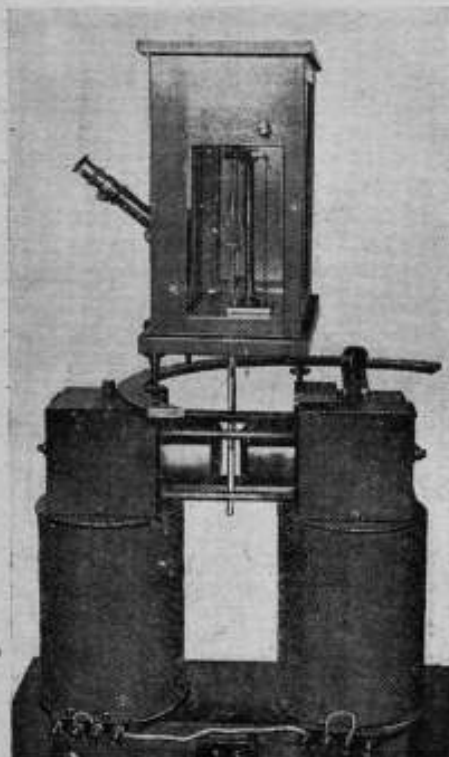


Рис. 1

В работе использован электромагнит, дающий возможность получать поля напряженностью порядка 10 000 э при силе тока в обмотке электромагнита порядка 14—15 а. На рис. 1 показан общий вид установки.

Экспериментальное исследование установки, проведенное с целью изучения источников погрешностей и определения точности измерения магнитной восприимчивости, позволило установить оптимальные условия использования данного метода и предельные (наибольшие) относительные погрешности измерения.

Основными факторами, обеспечивающими наибольшую точность измерения, являются: наименьшая вариация весов, большое номинальное значение напряженности поля, постоянство температуры и величины напряженности поля во время измерения,

высокая точность измерения напряженности поля, размеров (сечения) и плотности образца, а также однородность образца.

С точки зрения однородности все материалы можно разделить на однородные твердые сплошные материалы, однородные жидкости, сыпучие тела и неоднородные твердые материалы.

Неоднородность образца может быть вызвана неравномерной плотностью по длине образца, состоящего из одного вещества, и наличием инородных включений в различных участках по длине образца. Может иметь место сочетание того и другого.

В случае твердых сплошных однородных материалов погрешность определения плотности может быть доведена до $\pm 0,1\%$.

В случае сыпучих материалов экспериментально определено, что неравномерность наполнения трубки испытуемым порошком различна для различных материалов и может достигнуть величины порядка 0,8—3,0%.

При определении восприимчивости одного и того же сыпучего материала в одном и том же объеме, но при различных плотностях наполнения имеет место прямолинейная зависимость объемной магнитной восприимчивости $\chi_i = \chi_i' D_i$ от плотности D_i .

При нанесении на график прямая должна проходить через начало координат (плотность равна нулю) и значение восприимчивости $\chi_i' = \chi_i' D_i'$, соответствующее плотности, постоянной по объему данного вещества в однородном твердом сплошном состоянии.

Удельная магнитная восприимчивость сыпучих материалов имеет вполне определенное и постоянное значение только при той плотности, при которой она определена. Поэтому, давая значение удельной магнитной восприимчивости сыпучих материалов, необходимо указывать плотность, при которой она определена.

В результате исследований, проведенных в работе, установлено, что

1) наиболее точным для испытаний пара- и диамагнитных материалов со значением удельной магнитной восприимчивости, лежащей в пределах от $0,1 \cdot 10^{-6}$ до $100 \cdot 10^{-6}$ ед. CGS μ_0 , является описанный выше весовой метод определения восприимчивости;

2) достигнутая точность для различных значений восприимчивости характеризуется следующими наибольшими относительными погрешностями:

- 6,0—5,0% — при значениях восприимчивости, лежащих в пределах от $0,1 \cdot 10^{-6}$ до $1,0 \cdot 10^{-6}$ ед. CGS μ_0 ;
- 5,0—3,0% — при значениях восприимчивости, лежащих в пределах от $1,0 \cdot 10^{-6}$ до $10 \cdot 10^{-6}$ ед. CGS μ_0 ;
- 3,0—2,0% — при значениях восприимчивости, лежащих в пределах от $10 \cdot 10^{-6}$ до $100 \cdot 10^{-6}$ ед. CGS μ_0 ;
- 2,0—1,0% — при значениях восприимчивости, больших $100 \cdot 10^{-6}$ ед. CGS μ_0 .

Медь

Исследованию подвергались как образцы, служившие исходным материалом, так и образцы очищенной меди. В качестве исходного материала была взята торговая электролитическая медь чистоты 99,98%.

По данным качественного спектрального анализа в ней обнаружены примеси: висмута, железа, кальция, кремния, алюминия, никеля, олова, свинца и сурьмы.

Испытание меди проводилось на образце № 1 длиной 10 см и сечением $0,4 \times 0,5$ см². Изготовленный образец испытывался сна-

чала в том виде, в каком он поступил после механической обработки, а затем после травления, имевшего целью удаление случайных железных включений при обработке. Результаты измерений в первом случае дали значение удельной магнитной восприимчивости

$$\chi = -0,069 \cdot 10^{-6} \text{ ед. CGS } \mu_0,$$

а после травления

$$-0,082 \cdot 10^{-6} \text{ ед. CGS } \mu_0.$$

Как показывают результаты испытания, травление несколько изменило значение восприимчивости образца, что должно быть объяснено растворением примесей, загрязнявших поверхность.

Для проведения дальнейших исследований из той же меди, из которой вытачивался образец № 1, путем двукратного электролиза из раствора медного купороса, содержащего 125 г/л $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и 50 г/л свободной серной кислоты, была получена медь более высокой очистки. Плотность тока при электролизе составляла $0,005 \text{ а/см}^2$.

Полученные в результате электролиза медные катоды имели размеры: длина 5 см, ширина 4 см, толщина 1,5—2 мм и в этом виде не могли быть использованы. Для изготовления образцов катод разрезали на полбски и укладывали в горизонтальный графитовый сосуд в форме желобка с размерами $5 \times 5 \times 100 \text{ мм}$. После этого медь в графитовом сосуде помещалась в электрическую горизонтальную водородную печь.

Водород получался с помощью аппаратов Киппа и до поступления в печь подвергался многократной очистке путем пропускания его через марганцовокислый калий, медные стружки, нагретые до 600°C , стеклянный фильтр, платинированную керамику, нагретую до 750°C , и, наконец, через хлористый кальций. Сосуд с медью нагревался до 1200°C и после медленного охлаждения до нормальной температуры извлекался из печи.

После предварительного травления в смеси серной и азотной кислот полученный слиток подвергался проковке, сначала вручную с промежуточным травлением, а затем в ковочной ротационной машине до диаметра 5—6 мм.

После травления, последующей проточки поверхности образца алмазным режком на станке, имеющих агатовые держатели, и окончательного травления можно было считать, что внесенные при обработке примеси будут пренебрегаемо малы. Обработанный таким способом образец (№ 2) послужил объектом дальнейших испытаний.

Материал образца № 2, по данным Химической лаборатории, имел чистоту 99,998%. Спектральным анализом обнаружено присутствие висмута, кальция, кремния, алюминия, никеля, олова, свинца в количестве примерно равном 0,0002—0,0003% каждого элемента.

Образец, используемый для определения удельной магнитной восприимчивости, имел следующие размеры: длина 102,10 мм,

диаметры: у одного конца 4,58 мм, в середине 4,60 мм, у другого конца 4,57 мм. Плотность образца принята равной 8,903 г/см³. Площадь сечения образца принята равной 0,158 см².

Среднее арифметическое значение удельной магнитной восприимчивости образца № 2, из 33 отдельных измерений, оказалось равным — $(0,076 \pm 0,001) \cdot 10^{-6}$ ед. CGS μ_e .

Кроме образца № 2, был изготовлен еще образец № 3, очистка которого велась Химической лабораторией аналогично очистке образца № 2. Дальнейшая обработка проводилась так же, как и образца № 2, однако, вместо плавления в атмосфере водорода, катодная медь плавилась в электрической печи в горизонтальном графитовом сосуде в атмосфере воздуха.

Так как при плавке меди электрическая печь плотно закрывалась во избежание притока воздуха из внешнего пространства, то в печи в результате горения графитового желобка создавалась восстановительная атмосфера и сильного окисления расплавленной меди не наблюдалось.

После затвердевания слитка он подвергался травлению и прокатке в таком же порядке, как описано выше для образца № 2.

Материал изготовленного образца № 3 имел чистоту 99,999%.

По данным спектрального анализа обнаружено присутствие висмута, кальция, алюминия, олова, сурьмы в количестве 0,0002—

Таблица 1

Номер образца	Химический состав	Технология изготовления образца	Удельная магнитная восприимчивость $\chi \cdot 10^6$ ед. CGS μ_e
1	Исходный материал: 99,98% Cu. Примеси: Bi, Fe, Ca, Si, Ni, Al, Sn, Pb, Sb	Образец после механической обработки	— 0,069
2	Исходный материал: 99,98% Cu. Примеси: Bi, Fe, Ca, Si, Ni, Al, Sn, Pb, Sb	Образец после механической обработки и после травления	— 0,082
2	Медь после очистки: 99,998% Cu. Примеси: Bi, Ca, Al, Ni, Sn, Pb (0,0002—0,0003%) каждого элемента	Расплавлен в атмосфере водорода с последующей проковкой и обточкой алмазным резцом	— 0,076
3	Медь после очистки: 99,999% Cu. Примеси: Bi, Ca, Al, Sn, Sb (0,0002—0,0003%) каждого элемента	Расплавлен в атмосфере воздуха с последующей проковкой и обточкой алмазным резцом	— 0,087

0,0003% каждого элемента. Размеры образца: длина 99,18 мм; диаметры: у одного конца 3,42 мм, в середине 3,46 мм, у другого конца 3,41 мм.

Плотность образца принята равной 8,926 г/см³.

Площадь сечения образца принята равной 0,088 см².

Среднее арифметическое значение удельной магнитной восприимчивости образца № 3 из 14 отдельных измерений оказалось равным

$$\chi = -(0,087 \pm 0,001) \cdot 10^{-6} \text{ ед. CGS } \mu_0.$$

Подводя итоги по измерению восприимчивости меди, приведем сводную таблицу результатов (см. табл. 1).

Серебро

Чистое серебро приготавливалось из исходного продукта в форме зерен, имевших содержание серебра 99,92%. Из этого серебра путем электролиза с слабым раствором азотнокислого серебра, содержащим 0,5% свободной азотной кислоты, при плотности тока 0,01—0,02 а/см², получался кристаллический порошок (матовый и блестящий).

Из полученного порошка после расплавления было отлито в графитовую изложницу два образца в форме стержней примерно цилиндрической формы.

Серебро в кристаллическом виде и в стержнях, по данным Химической лаборатории, имело чистоту 99,999%.

Спектральный анализ этого серебра показал присутствие примесей: меди, железа, кальция, магния, кремния в количестве примерно (0,0002—0,0003)% каждого элемента.

Исследование магнитной восприимчивости серебра было начато с измерения восприимчивости серебра в зернах, имеющего чистоту 99,92%.

Зерна имели примерно сферическую форму размером около 1 мм в диаметре. Измерения восприимчивости производились относительным методом сравнения с магнитной восприимчивостью NiSO₄·7H₂O, являвшегося нормальным образцом, восприимчивость которого принималась равной

$$\chi = + 16,3 \cdot 10^{-6} \text{ ед. CGS } \mu_0.$$

В результате измерений было получено значение удельной магнитной восприимчивости, равное

$$\chi = - 0,136 \cdot 10^{-6} \text{ ед. CGS } \mu_0.$$

Измерение восприимчивости кристаллического серебра

Кристаллическое серебро было изготовлено в двух разновидностях: матовое и блестящее, причем матовое имело более крупные кристаллы.

Та и другая разновидность серебра по данным Химической лаборатории характеризовалась чистотой 99,999% и отличалась лишь тем, что в матовом серебре оставался немного больший осадок маточного раствора. Восприимчивость кристаллического серебра измерялась отдельно для обеих его разновидностей абсолютным методом.

Измерения производились в стеклянной трубке с известным сечением у отметки, соответствующей верхнему основанию образца, помещенного в центре междуполусного пространства электромагнита. При измерениях учитывалась поправка на магнитную восприимчивость стекла трубки.

Плотность наполнения трубки порошком, насыпанным до отметки, определялась из отношения массы порошка к массе дистиллированной воды в том же объеме.

Результаты определения удельной восприимчивости серебряного кристаллического порошка характеризуются следующими данными.

Для матового порошка среднее арифметическое значение удельной магнитной восприимчивости из 42 отдельных измерений равно:

$$\chi = - (0,152 \pm 0,002) \cdot 10^{-6} \text{ ед. CGS } \mu_0$$

при плотности наполнения $4,536 \text{ г/см}^3$.

Для блестящего порошка среднее арифметическое значение удельной магнитной восприимчивости из 50 отдельных измерений равно:

$$\chi = - (0,184 \pm 0,002) \cdot 10^{-6} \text{ ед. CGS } \mu_0$$

при плотности наполнения $4,012 \text{ г/см}^3$.

Измерение восприимчивости серебра в виде цилиндрических образцов

Как указывалось выше, из кристаллического серебра Химической лабораторией были отлиты в графит два образца в виде стержней, имеющих примерно цилиндрическую форму.

Из этих стержней были изготовлены два образца правильной цилиндрической формы путем проточки на станке так же, как и для медных образцов. После проточки образцы подвергались травлению путем трехкратного кипячения в 15% соляной кислоте с последующим промыванием водой. Затем образцы были помещены в спирт, выдерживались в нем трое суток, после чего были высушены при комнатной температуре.

Измерения магнитной восприимчивости образцов после промывания в спирте показали постепенное уменьшение с течением времени значения магнитной восприимчивости. Для получения устойчивых результатов измерения образцы после промывки спиртом просушивались в сушильном шкафу при температуре около

30—40° С. После такой просушки образцы выдерживались в течение суток в эксикаторе с хлористым кальцием и уже затем измерялась их восприимчивость.

В результате всех этих операций удалось добиться стабильного значения восприимчивости.

Измерение удельной магнитной восприимчивости литых образцов производилось абсолютным методом.

Результаты измерения восприимчивости образцов литого серебра в форме цилиндров приведены ниже.

Образец № 1

Размеры: длина 66,63 мм; диаметры: у одного конца 3,56 мм, в середине 3,52 мм, у другого конца 3,56 мм.

Плотность принята равной 9,548 г/см³. Сечение образца принято равным 0,0996 см².

Среднее арифметическое значение удельной магнитной восприимчивости образца № 1 из 15 отдельных измерений оказалось равным

$$\chi = -(0,167 \pm 0,001) \cdot 10^{-6} \text{ ед. CGS } \rho_0.$$

Образец № 2

Размеры: длина 62,68 мм; диаметры: у одного конца 4,11 мм, в середине 4,09 мм, у другого конца 4,08 мм.

Плотность принята равной 9,830 г/см³. Сечение образца принято равным 0,132 см².

Среднее арифметическое значение удельной магнитной восприимчивости образца № 2 из 13 отдельных измерений равно

$$\chi = -(0,167 \pm 0,001) \cdot 10^{-6} \text{ ед. CGS } \rho_0.$$

Золото

Определение магнитной восприимчивости золота производилось на образцах, изготовленных в Химической лаборатории ВНИИМ. Золото имело чистоту 99,999% и форму плоского слитка весом 47,15 г. Спектральный анализ показал наличие следующих примесей:

Серебро	0,0002%	Медь	0,0003%
Железо	0,0002%	Кальций	0,0001%

Изготовление образцов из чистого золота

Для изготовления образцов из чистого золота королек весом 47,15 г был расплавлен в графитовом тигле, изготовленном из чистого графита. Непосредственно перед плавкой тигель был прокален при температуре 1000° С. Плавка производилась в тигельной печи сопротивления. После расплавления золота тигель быстро вынимался из печи и расплавленный металл выливался в разъемную графитовую изложницу. Были отлиты два образца. Изложница имела цилиндрическую форму с диаметром отверстия для первого образца 4 мм, для второго — 5 мм и длиной около 70 мм. После застывания изложница разнималась, слиток вынимался. Верхняя

расширенная часть отливки отрезалась, а боковая поверхность протачивалась для получения правильной цилиндрической поверхности.

Вся механическая обработка производилась немагнитными инструментами, а именно вольфрамовыми резцами, изготовленными из кованых вольфрамовых стержней путем заточки их на абразивных кругах. После механической обработки образцы для удаления случайных магнитных загрязнений подвергались травлению в царской водке, после чего тщательно промывались в проточной воде.

Изготовленные таким путем образцы были использованы для измерения удельной магнитной восприимчивости абсолютным методом.

Измерение восприимчивости чистого золота

Образец № 1

Размеры: длина 66,63 мм; диаметры: у одного конца 3,48 мм, в середине 3,41 мм, у другого конца 3,46 мм.

Плотность принята равной 19,088 г/см³. Сечение образца принято равным 0,0968 см².

Среднее арифметическое значение удельной магнитной восприимчивости из 12 отдельных измерений оказалось равным

$$\chi = -(0,141 \pm 0,0004) \cdot 10^{-6} \text{ ед. CGS } \mu_0$$

Образец № 2

Размеры: длина 62,85 мм; диаметры: у одного конца 3,84 мм, в середине 3,88 мм, у другого конца 3,94 мм.

Плотность принята равной 19,232 г/см³. Сечение образца принято равным 0,117 см².

Среднее арифметическое значение удельной магнитной восприимчивости из 15 отдельных измерений равно:

$$\chi = -(0,135 \pm 0,002) \cdot 10^{-6} \text{ ед. CGS } \mu_0$$

В качестве новых значений удельной магнитной восприимчивости химически чистых металлов предлагаются:

1. Медь

$$\chi = -(0,087 \pm 0,001) \cdot 10^{-6} \text{ ед. CGS } \mu_0 \text{ при плотности } 8,926 \text{ г/см}^3$$

2. Серебро

$$\chi = -(0,152 \pm 0,002) \cdot 10^{-6} \text{ ед. CGS } \mu_0 \text{ при плотности наполнения } 4,536 \text{ г/см}^3$$

$$\chi = -(0,184 \pm 0,002) \cdot 10^{-6} \text{ ед. CGS } \mu_0 \text{ при плотности наполнения } 4,012 \text{ г/см}^3$$

$$\chi = -(0,167 \pm 0,001) \cdot 10^{-6} \text{ ед. CGS } \mu_0 \text{ при плотности } 9,548 \text{ г/см}^3$$

$$\chi = -(0,167 \pm 0,001) \cdot 10^{-6} \text{ ед. CGS } \mu_0 \text{ при плотности } 9,830 \text{ г/см}^3$$

1. Золото

$$\chi = -(0,141 \pm 0,0004) \cdot 10^{-6} \text{ ед. CGS } \mu_0 \text{ при плотности } 19,088 \text{ г/см}^3$$

$$\chi = -(0,135 \pm 0,002) \cdot 10^{-6} \text{ ед. CGS } \mu_0 \text{ при плотности } 19,232 \text{ г/см}^3$$

Выводы

Определение магнитной восприимчивости чистых металлов проводилось рядом исследователей на протяжении нескольких десятков лет. Почти все исследователи определяли магнитную восприимчивость металлов методами, основанными на измерении механической силы, действующей на образец, помещенный в магнитное поле, чаще всего абсолютными методами. Необходимо отметить, что не все авторы дают сведения о чистоте и технологии изготовления исследуемых образцов. Поэтому, естественно, не всегда можно оценить, насколько идентичными являются исследуемые образцы, а следовательно, и полученные результаты, не учитывая, конечно, расхождения, определяемые точностью выбранного метода измерения.

Ознакомление с этими данными показывает, что имеющий место разброс результатов, полученных разными авторами, настолько велик, что значения восприимчивости сходятся лишь в пределах от 20 до 60% и получение собственных данных советскими исследователями является совершенно необходимым.

В результате проведенной работы ВНИИМ не только создал набор веществ с известным значением магнитной восприимчивости, позволяющий удовлетворять основные требования промышленности на нормальные образцы слабомагнитных материалов, но и получил первые в СССР значения удельной магнитной восприимчивости химически чистых металлов меди, серебра, золота.

* * *

Изготовление исследованных нами химически чистых металлов проводилось в Химической лаборатории ВНИИМ. Технология изготовления образцов для испытания разрабатывалась совместно с лабораторией Сплавов, а измерения размеров образцов, определения плотности и спектральный анализ проводились соответственно в лабораториях измерения длины в машиностроении, ареометрической и оптической.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. М. Яновский и Н. И. Спиридович. Об установлении нормальных образцов магнитной восприимчивости парамагнитных тел. Сб. трудов ВНИИМ, вып. 1 (43), 1940.
2. Б. М. Яновский. Об установлении нормальных образцов магнитной восприимчивости пара- и диамагнитных материалов, Труды ВНИИМ, вып. 1 (56), 1947.

ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть	По чьей вине
33	11 сверху, формула (14)	$+ \frac{(\mu + 3\beta)^2}{4} (\Delta\tau)^2 +$ $+ \frac{H^2}{4}$	$+ \frac{(\mu + 3\beta)^2}{4} (\Delta\tau)^2 +$ $+ \frac{(t - \tau)^2}{4} (\Delta\mu)^2 +$ $+ \frac{H^2}{4}$	Автора
38	1 снизу	меньше	составляет	»
91	4 »	потока	поля	Техн. ред.
91	3 »	поля	потока	» »
94	Рис. 3	Точку пересечения вертикальной пунктирной линии осью абсцисс следует обозначить M'		Автора
113	8 сверху	$\gamma_i = \gamma_i D_i$	$\gamma_i = \gamma_i D_i$	»
113	11 »	$\gamma'_i = \gamma'_i D'_i$	$\gamma'_i = \gamma'_i D'_i$	»

Труды ВНИИМ.

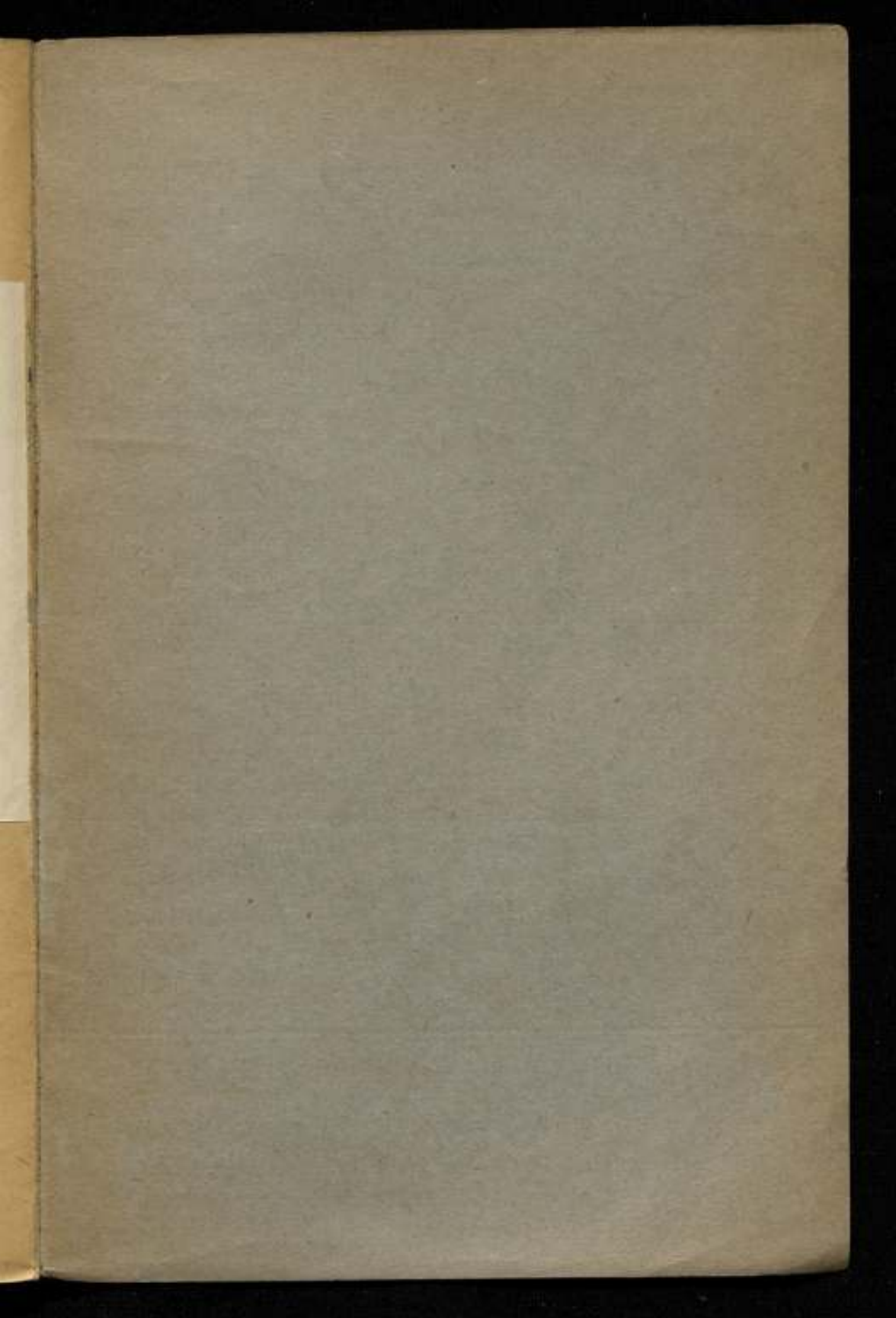
Выводы

Определение магнитной восприимчивости чистых металлов проводилось рядом исследователей на протяжении нескольких десятков лет. Почти все исследователи определяли магнитную восприимчивость металлов методами, основанными на измерении механической силы, действующей на образец, помещенный в магнитное поле, чаще всего абсолютными методами. Необходимо отметить

метрической и оптической.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. М. Яновский и Н. И. Спиридонич. Об установлении нормальных образцов магнитной восприимчивости парамагнитных тел. Сб. трудов ВНИИМ, вып. 1 (43), 1940.
2. Б. М. Яновский. Об установлении нормальных образцов магнитной восприимчивости пара- и диамагнитных материалов, Труды ВНИИМ, вып. 1 (56), 1947.



Цена 6 р.