

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

96-388

Д13-96-388

А.Л.Беляев, Ю.А.Будагов, С.А.Ивашкевич, Г.Г.Казакова,
В.В.Калиниченко, А.В.Новиков, В.И.Снятков, С.Б.Федоренко

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ
ПРОНИЦАЕМОСТИ МАГНИТОМЯГКИХ СТАЛЕЙ

1996

Автоматизированная установка для измерения относительной магнитной проницаемости магнитомягких сталей

Описана автоматизированная установка для измерения относительной магнитной проницаемости (μ) магнитомягких сталей. Диапазон рабочих значений индукции в испытуемом образце составляет от 1,6 до 1,95 Тл, рабочий зазор — 50 мм, диаметр образца — 23 мм, длина образца — 230 мм. Погрешность измерения относительной магнитной проницаемости μ составляет $\pm 1,5\%$. Приведены блок-схема установки, принципиальные электрические схемы основных узлов, краткое описание схем. Все электронные узлы выполнены в стандарте КАМАК.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1996

Перевод авторов

Belyaev A.L. et al.

Д13-96-388

Automated Set-Up to Measure Relative Magnetic Permeability of Magnetically Soft Steels

Automated set-up to measure relative magnetic permeability (μ) of magnetically soft steels is described. The range of working induction values in the sample under investigation is from 1.6 to 1.95 T; working gap, 50 mm; sample diameter, 23 mm; sample length, 230 mm. The measurement error of the relative magnetic permeability, μ , is $\pm 1.5\%$. The block diagram of the set-up, the schematic diagrams of main units and their brief description are presented. All the electronic units are produced within the CAMAC.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

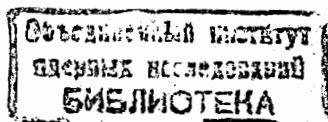
Автоматизированная установка для измерения относительной магнитной проницаемости (μ) магнитомягких сталей (в дальнейшем — установка) обсуждается в общих чертах в работе [1]. В настоящей работе будет обсуждаться конкретное техническое решение по установке, реализованное в ОИЯИ. Упрощённая блок-схема установки представлена на рис.1. Установка содержит следующие основные узлы: 1-двухполярный регулируемый стабилизатор постоянного тока, 2-коммутатор измерительных катушек, 3-электронный интегратор канала измерения магнитной индукции В (канала В), 4-электронный интегратор канала измерения напряжённости магнитного поля Н (канала Н), 5-первую измерительную катушку, 6-вторую измерительную катушку, 7-компьютер, 8-контроллер КАМАК, 9-коммутатор КАМАК, 10-интерфейс цифрового вольтметра, 11-цифровой вольтметр, 12-намагничивающее устройство. В состав устройства 12 входят: 13-яро электромагнита, 14-подкладки, 15-полюса и 16-обмотка возбуждения электромагнита. Образец 17 испытуемой стали вставляется в отверстия в полюсах и прижимается к полюсам специальными прижимами. Элементы 13-15 выполнены из стали марки СТ-08.

Узлы 1-6,11,12 образуют пермеаметр, остальные — обеспечивают его работу в автоматическом режиме измерения и обработки результатов измерения. Принцип работы пермеаметра, подобного используемому в данной установке, обсуждается в работах [1-6].

Поэтому вопросы, касающиеся принципа работы собственно пермеаметра в этом разделе не рассматриваются. Здесь будет рассмотрена работа установки в целом, описаны отдельные узлы установки, а также обсуждены вопросы, касающиеся измерения напряжённости магнитного поля в образце (эти вопросы обсуждаются также в работе [6], опубликованной на русском языке).

Все электронные узлы установки на рис.1 выполнены в стандарте КАМАК. Формирование временной диаграммы и организация алгоритмов работы возложены на программное обеспечение. Такое построение установки позволяет:

- полностью автоматизировать процесс измерения;
- оптимизировать алгоритм работы в процессе комплексной отладки;



-использовать серийно изготавливаемые блоки: аналоговый коммутатор типа КА004 [7], интерфейс цифрового вольтметра [8], контроллер крейта КАМАК типа ККО09 [9]. конструктивно узлы 1-4 выполнены в виде блока КАМАК шириной 3М и имеют общий магистральный интерфейс.

Узел 2 представляет собой набор герконовых реле К1-К4, управляемых с магистрали КАМАК путём записи двоичного кода в управляющий регистр. Схема соединений узла 2 с измерительными катушками 5,6 показана на рис. 2. Коммутатор измерительных катушек по командам с магистрали КАМАК подключает измерительные катушки 5,6 ко входам интеграторов 3 и 4. Контакты реле К2.1, К4.1 подключают входы интеграторов к общей шине, уменьшая наводку на входы в режиме хранения.

Интеграторы одинаковы по схемному и конструктивному решению и отличаются друг от друга лишь номиналами времязадающих цепей. Принципиальная схема интегратора изображена на рис.3. Интегратор состоит из прецизионного операционного усилителя (DA1) со схемой балансировки (R1,R2), времязадающей RC-цепи и схемы сброса (K5,R1). Применение в данном интеграторе прецизионного операционного усилителя типа AD707CQ, конденсатора с малыми токами утечки и коэффициентом абсорбции позволили повысить точность интегрирования за счёт снижения дрейфа выходного напряжения до 0,5 мВ/мин.

Конструктивно интеграторы выполнены на отдельных платах и находятся внутри экранирующих кожухов. Сброс интеграторов производится командой с магистрали КАМАК путём записи двоичного кода в управляющий регистр.

Двухполярный регулируемый стабилизатор постоянного тока, упрощённая принципиальная схема которого представлена на рис.4, построен по компенсационной схеме с усилителем напряжения в цепи обратной связи. Формирование опорного напряжения U_{ref} осуществляется 12-битовым цифроаналоговым преобразователем DAC со схемой реверса (DA1,DA2,K). Схема реверса и цифроаналоговый преобразователь управляются с магистрали КАМАК при помощи регистра RG.

Выходной каскад построен по двухплечевой схеме и состоит из комплементарной пары мощных составных транзисторов (VT1,VT2) и

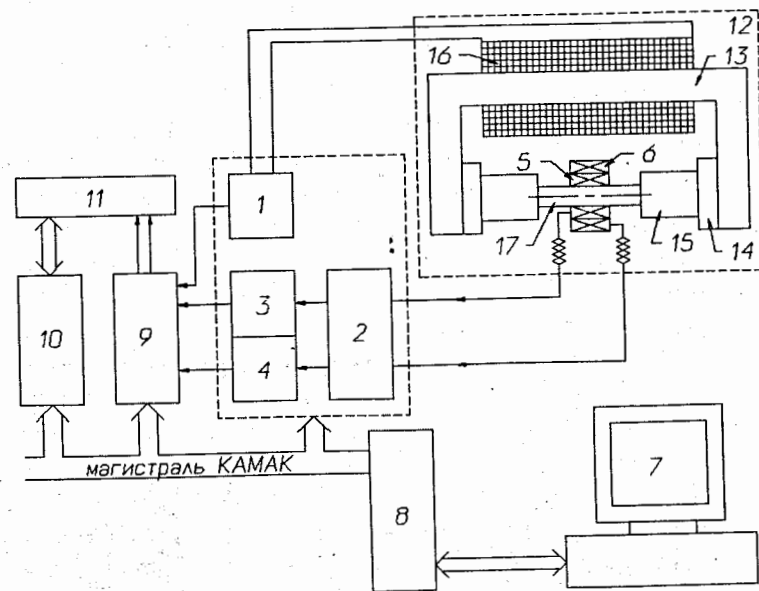


Рис.1. Упрощенная блок-схема автоматизированной установки для измерения относительной магнитной проницаемости магнитомягких сталей.

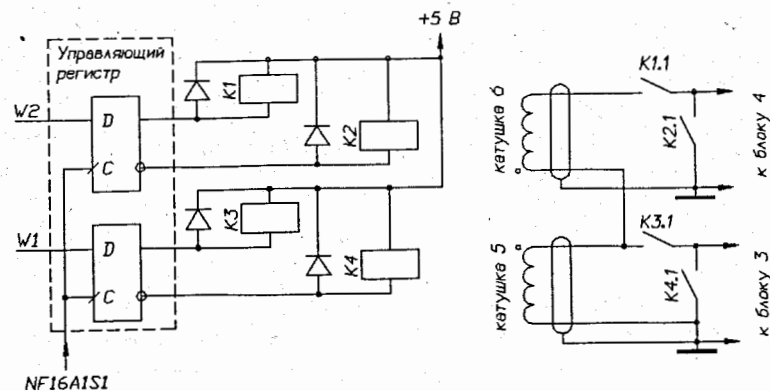


Рис.2. Схема соединений коммутатора измерительных катушек

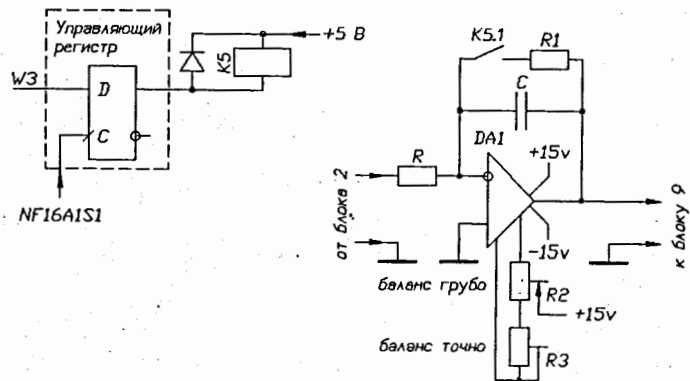


Рис. 3. Принципиальная схема интегратора

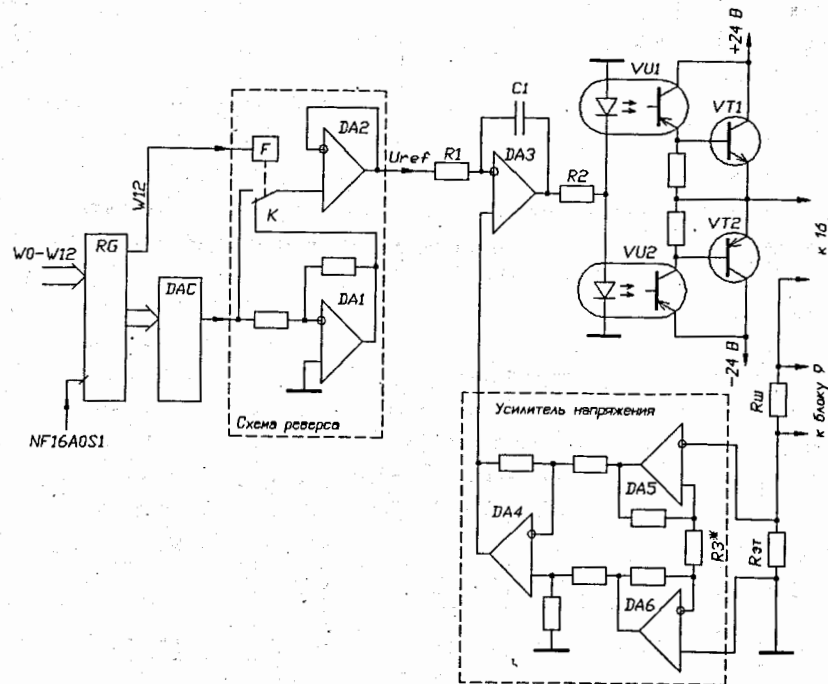


Рис. 4. Упрощенная принципиальная схема двухполярного регулируемого стабилизатора постоянного тока

управляющих транзисторных оптопар (VU1, VU2). Такое решение позволяет осуществить гальваническую развязку сильноточного источника питания (± 24 В) от слаботочного (± 15 В) и увеличить амплитуду выходного напряжения до ± 22 В. Нагрузкой выходного каскада являются последовательно соединенные обмотка электромагнита 16, измерительный шунт $R_{ш}$, эталонный резистор $R_{ЭТ}$. Выходной ток, протекая через $R_{ЭТ}$, преобразуется в напряжение, которое усиливается усилителем напряжения и поступает на неинвертирующий вход ОУ DA3. Усилитель напряжения выполнен по классической схеме инструментального усилителя на 3-х ОУ типа AD707CQ. Величина эталонного резистора выбрана из расчёта минимального выделения на нём тепловой энергии и равна 0,1 Ом.

Напряжение, выделяемое на шунте ($R_{ш}$), поступает на узел 9, что позволяет измерять величину тока в нагрузке цифровым вольтметром.

Настройка стабилизатора заключается в балансировке операционных усилителей и установке коэффициента преобразования напряжения в ток подбором резистора R_3 .

Напомним, что определение относительной магнитной проницаемости μ с помощью пермеаметров производится посредством измерения продольной составляющей магнитной индукции B в образце и продольной составляющей напряжённости магнитного поля H на поверхности (или вблизи поверхности) образца. При этом измеренные значения B и H должны соответствовать основной кривой индукции, что достигается применением метода коммутирования для измерения B и H . Рассматриваемая установка обеспечивает измерение B и H (соответственно каналы B и H) в режиме коммутирования, который осуществляется с помощью двухполярного регулируемого стабилизатора постоянного тока. Практически все методы определения индукции в образцах основаны на законе электромагнитной индукции. При этом индукция рассчитывается как отношение магнитного потока, возбуждаемого в образце (и проходящего через сечение измерительной катушки), к сечению образца, то есть определяется некоторое среднее значение индукции.

Определение напряжённости магнитного поля в исследуемом образце осуществляется с помощью измерительных катушек, датчиков (холловских, например), а также потенциалометров и основано на

неизменности тангенциальной составляющей напряжённости поля на границе двух сред [10]. Таким образом, напряжённость магнитного поля в образце может быть определена посредством измерения напряжённости поля на его поверхности.

В ЛЯП ОИЯИ было исследовано распределение магнитного поля вблизи поверхности цилиндрического образца [6]. Для выполнения измерений напряжённости поля вблизи поверхности образца была изготовлена специальная измерительная головка с датчиком Холла. Цилиндрический образец устанавливался в намагничивающее устройство пермеаметра, описанного в [5] (конструктивная схема намагничивающего устройства этого пермеаметра приведена на рис.1 в работе [3]). Измерения H производились следующим образом. Датчик Холла в процессе измерений перемещался в медианной плоскости (плоскости XZ , при $Y=0$) вокруг цилиндрического образца (по окружности) в пределах от 0° до 360° ($0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$). Диаметр образца - 23 мм, рабочая длина образца (расстояние между полюсами намагничивающего устройства) - 50 мм, расстояние между центром датчика Холла и поверхностью образца составляло $\sim 1,15$ мм, размер рабочей зоны датчика Холла - $0,45 \times 0,15$ мм. Датчик Холла ориентирован таким образом, чтобы обеспечить измерение продольной составляющей (то есть Y - составляющей) напряжённости поля в месте расположения датчика вблизи поверхности образца. Ввиду малых размеров рабочей зоны датчика Холла обеспечиваются практически точечные измерения $H(\alpha)$.

На рис.5 представлена зависимость $H(\alpha)/H_0$ от угла α при индукции в образце $B=1,8$ Тл; здесь H_0 - значение $H(\alpha)$ при $\alpha=0$.

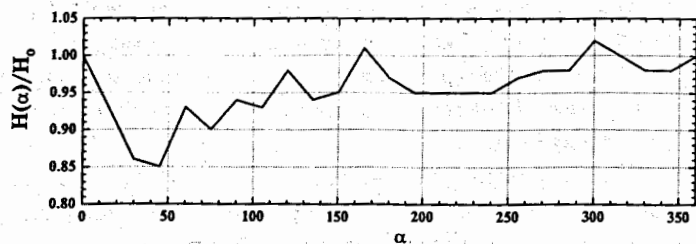


Рис. 5. Зависимость $H(\alpha)/H_0 = f(\alpha)$

Величина напряжённости магнитного поля вблизи поверхности образца изменяется от точки к точке. Поэтому измеренное среднее значение индукции в образце в общем случае не соответствует измеряемой в точке на поверхности (или вблизи поверхности) образца напряжённости магнитного поля, что приводит к появлению существенной ошибки при определении μ . Поэтому в пермеаметрах с целью снижения погрешности определения μ используемый метод измерения напряжённости магнитного поля H на поверхности (или вблизи поверхности) образца должен обеспечивать определение среднего значения напряжённости H (а не значение H в какой-либо точке). При этом указанные измерения средних значений B и H должны производиться на одном и том же участке образца.

С учётом отмеченных факторов представляется целесообразным испытание магнитных материалов в пермеаметрах производить на образцах, выполненных в виде прутков круглого сечения (цилиндров), а для измерения H в образцах использовать датчик, содержащий две цилиндрические катушки. Катушки располагаются коаксиально друг относительно друга на жестком каркасе, в который вставляется образец (коаксиально относительно катушек). При этом витки первой катушки должны как можно ближе примыкать к поверхности образца. Длина второй катушки должна быть равна длине первой катушки. Количество витков во второй катушке должно быть равно количеству витков в первой. Толщина намотки катушек должна быть как можно меньше. При выполнении этих условий можно считать, что вторая катушка в таком датчике охватывает первую.

Можно показать (в общем виде), что при последовательно-встречном соединении первой и второй катушек обеспечивается (с помощью интеграторов и других необходимых узлов) измерение напряжённости магнитного поля в объёме между двумя катушками, то есть такой датчик позволяет измерять напряжённость магнитного поля вблизи поверхности образца, причём обеспечивается измерение именно среднего значения напряжённости H на том участке испытываемого образца, который примыкает к этому датчику (охвачен этим датчиком). При использовании только первой катушки (вторая катушка отключена) датчик обеспечивает измерение индукции магнитного поля (его среднего значения) на том же участке испытываемого образца.

Режим измерения индукции B в образце осуществляется следующим образом. Ключи $K1.1$ и $K4.1$ размыкаются, а ключи $K2.1$ и $K3.1$ замыкаются (см. рис.1,2). При этом катушка 6 отключается от входа

интегратора 4, а катушка 5 подключается ко входу интегратора 3, то есть канал В вводится в работу.

Величина изменения $\Delta\Phi_1$ магнитного потока Φ_1 , проходящего через сечение первой катушки, определяется (на основании закона электромагнитной индукции: $e = -W \frac{d\Phi_1}{dt}$) как

$$\Delta\Phi_1 = -\frac{1}{W} \int_{t_1}^{t_2} e_1 dt, \quad (1)$$

где W - число витков первой измерительной катушки 5, e_1 - э.д.с., возбуждаемая в первой измерительной катушке, t_1 и t_2 - соответственно начальный и конечный временные пределы интегрирования.

Выходное напряжение U_B интегратора 3, на вход которого подаётся э.д.с. e_1 , равно:

$$U_B = -\frac{1}{\tau_B} \int e_1 dt, \quad (2)$$

где τ_B - постоянная времени интегратора 3. Из соотношений (1) и (2) получаем

$$\Delta\Phi_1 = \tau_B U_B / W. \quad (3)$$

Если принять, что площади сечения образца S_S и первой катушки S_1 пренебрежимо мало отличаются друг от друга ($S_S \approx S_1$), а также учесть, что при использовании метода коммутирования $\Delta\Phi_1 = 2\Phi_1$, из соотношения (3) получим

$$B = \tau_B U_B / 2WS_1 \quad (4)$$

или

$$B = 0,5 C_B U_B,$$

где C_B - постоянная канала измерения индукции, $C_B = \tau_B / WS_1$. Соотношение (4) подтверждает, что с помощью первой катушки 5 обеспечивается измерение индукции B в образце.

Рассмотрим режим измерения напряжённости магнитного поля H . В этом режиме соединённые последовательно встречно катушки 5 и 6 подключаются ко входу интегратора 4, а вход интегратора 3 отключается от катушки 5 (для этого ключи $K1.1$ и $K4.1$ замыкаются, а ключи $K2.1$ и $K3.1$ размыкаются). Через сечения S_1 катушки 5 и S_2 катушки 6 проходят соответственно магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , при этом количество витков в каждой из катушек равно W . При изменении потоков Φ_1 и Φ_2 в катушках возбуждаются соответственно э.д.с. e_1 и e_2 . В силу встречного включения обмоток на входе интегратора 4 действует их разность $e_1 - e_2$. Выходное напряжение U_H интегратора 4 равно:

$$U_H = -\frac{1}{\tau_H} \int (e_2 - e_1) dt, \quad (5)$$

где τ_H - постоянная времени интегратора 4.

Величины изменений $\Delta\Phi_1$ и $\Delta\Phi_2$ магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 определяются следующим образом:

$$\Delta\Phi_1 = -\frac{1}{W} \int_{t_1}^{t_2} e_1 dt$$

и

$$\Delta\Phi_2 = -\frac{1}{W} \int_{t_1}^{t_2} e_2 dt,$$

откуда

$$\Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_1 = -\frac{1}{W} \int_{t_1}^{t_2} (e_2 - e_1) dt. \quad (6)$$

Если считать, как и ранее, что площади сечения образца S_S и первой катушки S_1 пренебрежимо мало отличаются друг от друга, то

$$\Delta\Phi_1 = \mu\mu_0 \Delta H S_1$$

и

$$\Delta\Phi_2 = \mu\mu_0 \Delta H S_1 + \mu_0 \Delta H (S_2 - S_1), \quad (7)$$

где ΔH - изменение напряжённости магнитного поля, μ_0 - магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн), μ - относительная магнитная проницаемость материала образца. Здесь член $\mu_0 \Delta H (S_2 - S_1)$ представляет изменение магнитного потока в воздушном зазоре между катушками датчика 1. Из соотношений (5)-(7), а также с учётом того, что при использовании метода коммутирования $\Delta H = 2H$, получаем

$$H = \tau_H U_H / 2W(S_2 - S_1)\mu_0$$

или

$$H = 0,5 C_H U_H, \quad (8)$$

где C_H - постоянная канала измерения напряжённости магнитного поля, $C_H = \tau_H / \mu_0 W (S_2 - S_1)$. Соотношение (8) подтверждает, что с помощью датчика с двумя катушками обеспечивается измерение напряжённости магнитного поля (её среднего значения) вблизи поверхности образца.

Напомним, что для точного определения напряжённости магнитного поля в образце необходимо измерять напряжённость непосредственно на его поверхности. Использование для определения μ значений напряжённости магнитного поля, измеренных вблизи

поверхности образца, приведёт к появлению дополнительной погрешности в определении μ . Для уменьшения указанной дополнительной погрешности необходимо по измеренным вблизи поверхности образца значениям напряжённости магнитного поля определить соответствующие им значения напряжённости на самой поверхности. Поправочные коэффициенты, устанавливающие связь между величинами напряжённости поля на поверхности образца и вблизи его поверхности, могут быть найдены с помощью численных расчётов распределения поля в элементах намагничивающего устройства и в образце [2,3].

Приведём некоторые конструктивные параметры одного из вариантов датчика с двумя катушками. Первая и вторая катушки содержат по 460 витков провода ПЭВ-2 \varnothing 0,1 мм. Намотка выполнена в четыре слоя (в каждой катушке), длина намотки составляет 15 мм, толщина намотки каждой катушки - 0,6 мм. Средние диаметры первой и второй катушек составляют соответственно 24,8 и 27 мм (расчётные значения). Выводы первой катушки свиваются (начало и конец) и далее витой парой проводников подключаются к соответствующим входам коммутатора 2. Аналогично выполняется подключение второй катушки.

Определение C_B (постоянной канала измерения индукции В, см. соотношение (4)) производится с помощью образцовой катушки взаимной индуктивности по стандартной методике [10]. В ЛЯП ОИЯИ для этих испытаний используется мера взаимной индуктивности типа Р5009 ($M = 10 \times 10^{-3}$ Гн). Измерение выходного напряжения интегратора осуществляется при этом с помощью цифрового вольтметра типа В7-34.

Определение постоянной C_H (постоянная канала измерения напряжённости магнитного поля Н, см. соотношение (8)), может быть произведено по стандартной методике [10] в соленоиде с известной постоянной. В ЛЯП ОИЯИ имеются другие возможности для выполнения измерения C_H с высокой точностью. В частности, для этой цели датчик с двумя катушками помещается в зазор электромагнита (в зону с высокой однородностью поля). Путём регулирования величины постоянного тока возбуждения электромагнита индукция в зазоре изменяется от значения V_1 до значения V_2 (изменение индукции $\Delta V = V_1 - V_2$), при этом с помощью цифрового вольтметра измеряется напряжение $U_{нс}$ на выходе интегратора канала Н. По полученным данным определяется постоянная канала Н :

$$C_H = \Delta H / U_{нс},$$

где $\Delta H = \Delta V / \mu_0$. Значения индукций V_1 и V_2 измеряются с помощью ЯМР - магнитометра [11,12]. В процессе калибровки используется также магнитометр с датчиком Холла [13].

В заключение рассмотрим алгоритм измерения μ . Макроалгоритм измерения μ состоит в следующем:

1. Размагничивание образца;
2. N_1 циклов магнитной подготовки образца на выбранном токе;
3. N_2 циклов измерения U_B ;
4. N_3 циклов измерения U_H ;
5. Вычисление μ образца по следующим формулам:

$$\mu = V / \mu_0 H, \text{ где } V = 0,5 C_B (23/d)^2 \overline{U}_B,$$

$$H = 0,5 C_H k \overline{U}_H, \quad k = f(V),$$

$$C_B = 0,5189 \text{ Тл/в}, \quad C_H = 0,863 \times 10^6 \text{ (А/м)/в},$$

d - диаметр образца, мм;

6. Увеличение тока и повторение последовательности измерения, начиная с пункта 2, до получения результатов на конечном токе;
7. Размагничивание образца.

Значения N_1 , N_2 , N_3 , d , начальное и конечное значения тока, а также шаг по току задаются оператором в начале работы. После окончания измерений по полученным данным строится график зависимости μ материала образца от величины индукции В в образце.

Циклы магнитной подготовки, измерения U_B и U_H представляют собой следующую последовательность операций:

1. Выбор канала измерения (В или Н);
2. Открытие входа интегратора;
3. Перевод интегратора из режима "Сброс" в режим "Интегрирование";
4. Измерение U_{B1} (или U_{H1}) для начального состояния интегратора;
5. Реверс тока;
6. Интегрирование в течение 1,2 с;
7. Перевод интегратора из режима "Интегрирование" в режим "Хранение";

8. Измерение U_{B_2} (или U_{H_2}) в начале режима "Хранение";
9. Определение $U_B = U_{B_2} - U_{B_1}$ (или $U_H = U_{H_2} - U_{H_1}$);
10. Перевод интегратора из режима "Хранение" в режим "Сброс".
Общее время цикла равно $\sim 2,2$ с.

Литература

1. Budagov J. A. et al. - SDC-93-578, August 31, 1993.
2. Vorozhtsov S. V. et al. - SDC-93-485, April 2, 1993.
3. Vorozhtsov S. V. et al. - SDC-93-486, April 3, 1993.
4. Ворожцов С. В. и др. - Сообщение ОИЯИ Р13-93-149, Дубна, 1993.
5. Казакова Г. Г. и др. - Сообщение ОИЯИ Р13-93-268, Дубна, 1993.
6. Калининченко В. В. - Сообщение ОИЯИ Р13-93-423, Дубна, 1993.
7. Антюхов В. А. и др. - Сообщение ОИЯИ 10-11636, Дубна, 1978.
8. Аносов В. Н. и др. - Сообщение ОИЯИ Р10-89-363, Дубна, 1989.
9. Антюхов В. А. и др. - Сообщение ОИЯИ Р10-87-928, Дубна, 1987.
10. Кифер И. И. - Испытания ферромагнитных материалов, М., Энергия, 1969.
11. Ивашкевич С. А. - Сообщение ОИЯИ 13-80-130, Дубна, 1980.
12. Ивашкевич С. А. - Сообщение ОИЯИ Д13-93-222, Дубна, 1993.
13. Ивашкевич С. А., Казакова Г. Г. - Сообщение ОИЯИ, Р13-91-283, Дубна, 1991.

Рукопись поступила в издательский отдел
18 октября 1996 года.