

ГРАДУИРОВКА УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПЛОСКИХ СЛАБОМАГНИТНЫХ ОБРАЗЦОВ

Себко В.П., Беззапонная В.М.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Приборы и методы неразрушающего контроля"
тел. (057) 70-76-380, факс (057) 70-76-602, e-mail: sebko@kpi.kharkov.ua.

Розглянуто методику градування приладу для контролю слабомагнітних листових матеріалів. Показано як треба відградувати прилад у слабкому й середнім магнітним полях. Використовуються схеми для градування на змінному й постійному струмі.

Рассмотрена методика градуировки прибора для контроля слабомагнитных листовых материалов. Показано как надо отградуировать прибор в слабых и средних магнитных полях. Используются схемы для градуировки на переменном и постоянном токе.

Изделия, выполненные из слабомагнитных материалов, таких как нержавеющие стали марок (X18H9T, HН-3, 45Г17ЮТ, сплавы титановые марок ВТ и ВТЗ, латуни и др.) нашли широкое применение в вакуумной технике при создании крупных физических установок и в установках при изготовлении кинескопов, надёжных трубопроводов, в приборостроении и в медицинском оборудовании.

Однако слабомагнитные материалы обладают слабой магнитностью. При этом относительная магнитная проницаемость таких материалов колеблется от 1,005 до 5. Последнее создаёт ряд неудобств особенно в тех случаях, когда необходимо иметь "чистые" магнитные поля заданной конфигурации (например, в ускорителях заряженных частиц, в термоядерных установках, в некоторых физических приборах, в медицинском оборудовании и в др.). А слабомагнитные изделия и узлы, находясь в магнитном поле, могут при магнитной проницаемости, равной 1,1-3 могут существенно исказить это поле и нарушить работу установки, прибора. Кроме того, в корпусах электродвигателей, катушек, в трубах с внутренним кабелем, подшипниках погруженных электродвигателей, выполненных из слабомагнитных материалов, которые пронизываются переменным магнитным полем рассеяния или основным, могут из-за указанных значений магнитной проницаемости возникать вихревые токи, вызывающие дополнительные потери мощности, что, в свою очередь снижает КПД того или иного устройства. Отметим, что до настоящего времени магнитные испытания слабомагнитных материалов осуществлялись, как правило, на образцах [1-6]. Магнитные методы и приборы для контроля готовых изделий из слабомагнитных материалов ещё недостаточно изучены в существующей литературе.

Всё это приводит к мысли о том, что необходимо тщательно отбирать слабомагнитные материалы, изделия и узлы по допустимым значениям относительной магнитной проницаемости.

В настоящей работе рассмотрен дифференциальный прибор для контроля магнитных параметров плоских изделий (листов, пластин, лент и деталей, имеющих плоские участки).

В основу работы прибора для измерения магнит-

ных характеристик слабомагнитных материалов положен дифференциальный импульсно-индукционный метод магнитных испытаний в постоянных во времени магнитных полях. В отличие от существующих измерительных устройств данный прибор позволяет определить относительную магнитную проницаемость μ_r и магнитную восприимчивость K непосредственно листовых слабомагнитных изделий, выполненных из нержавеющих сталей типа X18H10T, латуней ЛС-59, парамагнитных чугунов и др. Диапазон измерения магнитной проницаемости этих материалов составляет $1 \leq \mu_r \leq 3$.

Измерительная схема прибора представлена на рис. 1. Основными элементами прибора является два идентичных Ш - образных магнитопровода M_1 и M_2 с разомкнутыми магнитными цепями, системы регулировки и коммутации намагничивающего тока в первичных обмотках w_1 и w_2 , намотанных на средних стержнях M_1 и M_2 и вебметр РВБ, измеряющий изменение потокосцепления во вторичных обмотках W_1 и W_2 , расположенных также на средних стержнях магнитопроводов.

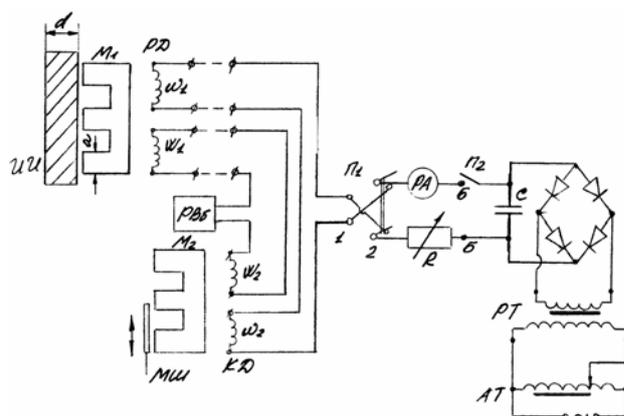


Рис. 1. Схема прибора для контроля магнитной проницаемости слабомагнитных изделий

Магнитопроводы M_1 и M_2 вместе с первичными и вторичными обмотками представляют собой соответственно рабочий РД и компенсационный КД датчики. РД присоединяется к прибору кабелем длиной, как правило, несколько метров и устанавливается на ис-

пытуемую плоскость изделия ИИ (или лист стали), так чтобы магнитные силовые линии потока пересекали изделие по толщине. Рабочий датчик является датчиком накладного типа. В компенсационном датчике (с магнитопроводом M_2) магнитный поток замыкается через воздушный зазор. Этот датчик снабжён магнитным шунтом МШ для выравнивания потоков магнитопроводов M_1 и M_2 в процессе предварительной балансировки измерительной цепи прибора при отсутствии испытуемого изделия в РП. Определённое положение МШ, зафиксированное при балансировке сохраняется в течение всей дальнейшей работы прибора.

В первичных обмотках РД и КД, включённых последовательно-согласно коммутируется переключением Π_1 (положение 1 и 2, см. рис. 1) постоянный ток, величина которого в зависимости от пределов измерения устанавливается реостатом R по показаниям амперметра PA . Переключатель Π_2 служит для подключения источника питания, который содержит выпрямительный мостик, ёмкость C , сглаживающую пульсации, разделительный трансформатор PT и автотрансформатор AT .

Данный прибор может иметь и независимый от сети источник питания. В этом случае к клеммам B подключается 10 батарей типа КБС-Л-05, помещаемые внутри корпуса прибора.

Вторичные обмотки датчиков включены последовательно-встречно. При этом эдс, подведенная к веберметру, при отсутствии изделия в РП должна равняться нулю (точное равенство или балансировка, как уже указывалось, достигается выравниваем магнитным шунтом магнитных потоков в РП и КП).

В качестве магнитопроводов в приборе используется набор Ш-образных пластин типа Ш-30 (рис. 2).

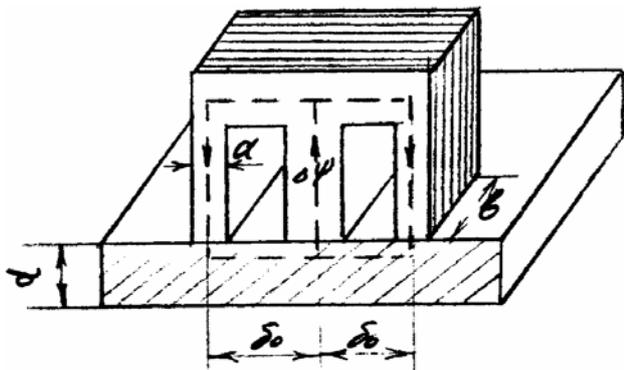


Рис. 2. Ш-образный магнитопровод на листе

При измерении рабочий датчик размещают на листовом образце таким образом, чтобы полюсные наконечники магнитопровода M_1 контактировали с поверхностью изделия (см. рис. 2).

Величина относительной проницаемости μ_r слабомагнитного листового изделия определяется по формуле:

$$\mu_r = 1 + \frac{\Delta\psi}{2 \cdot \mu_0 \cdot W_1 \cdot S_{\text{эф}} \cdot H_0}, \quad (1)$$

где $\Delta\psi$ - разность потокосцепления вторичной обмотки РД, измеряемая веберметром при коммутации то-

ка; μ_0 - магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $S_{\text{эф}}$ - эффективная площадь поперечного сечения изделия, которое пронизывается магнитным потоком; H_0 - средняя напряжённость магнитного поля.

Эффективную площадь $S_{\text{эф}}$ можно найти по формуле

$$S_{\text{эф}} \approx a \cdot b, \quad (2)$$

где a - ширина крайних полюсов магнитопровода; b - толщина набора пластин.

В формуле (1) второе слагаемое является магнитной восприимчивостью K .

Средняя напряжённость магнитного поля в зазоре магнитопровода рассчитывается из выражения:

$$H_0 \approx \frac{I \cdot W_1}{\delta_0}, \quad (3)$$

где I - намагничивающий ток в первичной обмотке РП; δ_0 - средняя длина воздушного зазора между полюсами магнитопровода (см. рис. 2).

Вычисление магнитной проницаемости по формуле (1)-(3) является только оценочным. Это связано с большими ошибками расчёта величин $S_{\text{эф}}$ и H_0 по (2), (3), связанными с неопределённостью растекания магнитного потока внутри изделия и резкой неоднородностью напряжённости поля в изделии. Условием, при котором можно использовать для оценок μ_r и K формулу (1), является $d > a$ (где d - толщина изделия). При этом $\delta_0 \geq d$.

Для более точного измерения прибором величин μ_r и K слабомагнитного изделия, необходимо провести градуировку прибора. Эта градуировка проводится следующим образом. Сначала экспериментально определяют средние величины напряжённости магнитного поля при различных токах в первичной обмотке РД. Затем при этих значениях напряжённости (или токах) измеряют веберметром величины $\Delta\psi$ при помещении РП на стандартные образцы, значение μ_r которых известны. Таким образом находят градуировочные зависимости $\mu_r = f(\Delta\psi)$ и $K = f(\Delta\psi)$ при различных фиксированных значениях H_0 . Рассмотрим подробнее все операции, связанные с градуировкой прибора.

Зависимость средней напряжённости магнитного поля в воздушном зазоре датчика от намагничивающего тока определяют для различных значений намагничивающего тока с использованием обоймы из оргстекла с двумя образцовыми катушками, включёнными таким образом, чтобы получить на выходе ИК удвоенную эдс, обусловленную двумя магнитными потоками в двух воздушных зазорах магнитопровода РД.

На рис. 3 представлена схема для измерения зависимости $H_0 = f(I)$. В этой схеме две измерительные катушки обоймы с равными числами витков $W_1 = W_2$, размещённые между полюсами магнитопровода, подсоединяется к веберметру.

Зависимость $H_0 = f(I)$ определяют следующим образом.

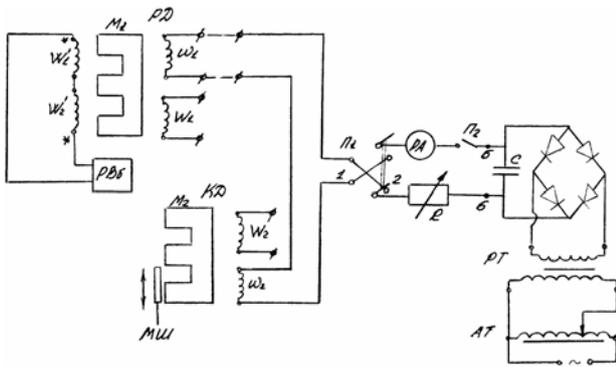


Рис. 3. Схема устройства для определения зависимости H_0 от постоянного тока I

Собирают схему, показанную на рис. 3. С помощью переключателя Π_1 подсоединяют к схеме питания. Накладывают обойму с двумя образцовыми катушками на рабочий датчик так, чтобы магнитные потоки в зазорах датчика пересекали обмотки образцовых катушек. Подсоединяют катушки обоймы к веберметру. Реостатом R устанавливают заданный ряд значений намагничивающего тока I . С помощью переключателя Π_1 проводят коммутацию тока I и наблюдают показания веберметра.

Среднюю напряжённость магнитного поля в воздушных зазорах рабочего датчика рассчитывают по формулам:

при использовании стрелочного веберметра (например, типа М119)

$$H_0 = \frac{c \cdot \alpha}{4 \cdot \mu_0 \cdot S_0 \cdot W_1'} \quad (4)$$

где S_0 – площадь сечения образцовой катушки; c – постоянная веберметра; α – отброс указателя при коммутации тока;

при включении в измерительную цепь цифрового веберметра типа Ф5050

$$H_0 = \frac{\Delta \psi}{4 \cdot \mu_0 \cdot S_0 \cdot W_1'} \quad (5)$$

где $\Delta \psi$ – показания веберметра.

С целью улучшения результатов измерений напряжённости магнитного поля в зазорах магнитопровода рабочего датчика, такую же зависимость $H_0=f(I)$ снимают на переменном намагничивающем токе. Только в данном случае нужно выполнить условие:

$$H_0=H_m, I=I_m \quad (6)$$

где H_m и I_m – амплитудные значения напряжённости магнитного поля и намагничивающего тока.

Этот опыт заключается в следующем.

Собирают схем, показанную на рис. 4.

В схеме намагничивающие обмотки РД и КД подключают к автотрансформатору, который запитывается от сети (частота $f=50$ Гц и напряжение 220 В). В качестве амперметра РА здесь используют прибор для измерения эффективных значений тока. Переключатель Π_2 оставляют на протяжении всего опыта в одном из положений (1 или 2). Соединённые между собой обмотки образцовых катушек свободными концами подсоединяют к вольтметру РВ эффективных значений.

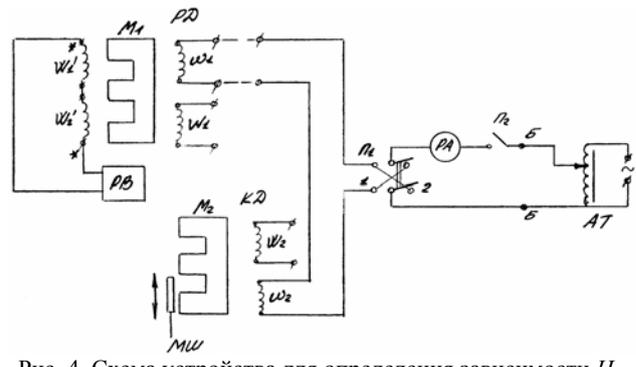


Рис. 4. Схема устройства для определения зависимости H_m от переменного тока I_m

Далее рассчитывают эффективные значения токов $I_{эф}$, которые нужно будет установить в данном опыте. Используя условие (6) нужно для каждого значения тока I определить величину $I_{эф}$ по формуле:

$$I_{эф} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

После этого, при размещённой на рабочем датчике обоймы с образцовыми катушками устанавливают с помощью автотрансформатора и амперметра рассчитанные величины $I_{эф}$ и измеряют вольтметром РВ при каждом фиксированном значении $I_{эф}$ соответствующую ему величину эффективной эдс $E_{эф}$.

Амплитудные значения напряжённости магнитного поля рассчитывают по данным эксперимента, используя формулу:

$$H_m = \frac{E_{эф}}{2 \cdot 4,44 \cdot W_1' \cdot S_0 \cdot \mu_0 \cdot f} \quad (8)$$

Значение $H_{ср}$ находят для соответствующих значений токов по формуле:

$$H_{ср} = \frac{H_m + H_0}{2} \quad (9)$$

Перед градуировкой прибора по магнитной проницаемости и восприимчивости проводят эксперимент, связанный с определением магнитных параметров образцовых пластин, выполненных из слабомагнитных материалов таких, как нержавеющие стали, латуни, парамагнитных чугунов и др. Образцовые пластины изготавливаются из листов, имеющих различные значения магнитной проницаемости и магнитной восприимчивости.

На рис. 5а показан внешний вид образцовой пластины и даны обозначения размеров её: d – толщина; l – длина и h – ширина. Характерные численные значения размеров пластин составляют: $l=h \geq 10$ см; $d \geq 1,5$ см. Из таких пластин изготавливают образцы, имеющие в сечении квадратную либо круглую форму (см. рис. 5б, в). Характерные размеры образцов: $p \approx g \approx 1$ см, $h \geq 10$ см. Каждую образцовую пластину с вырезанной частью металла (рис. 5б) и каждый образец (рис. 5в) маркируют одинаковым образом, например, цифрой "1" на одной паре пластин – образец, цифрой "2" на другой паре и т.д.

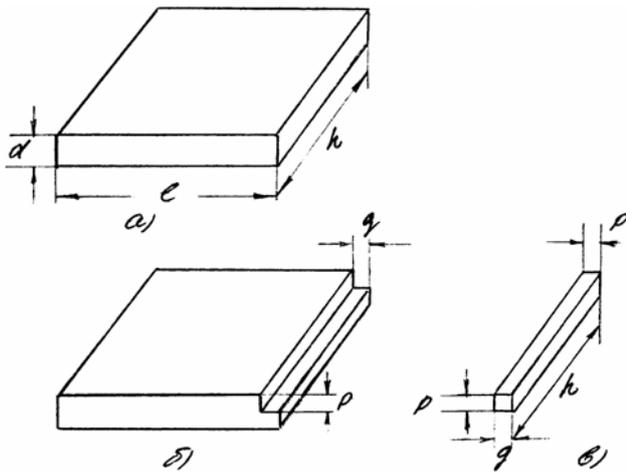


Рис. 5. Образцовые пластины, из которых изготавливаются образцы

Затем определяют магнитную восприимчивость K слабомагнитных образцов. Относительная магнитная проницаемость μ_r и магнитная восприимчивость K связаны соотношением:

$$\mu_r = 1 + K. \quad (10)$$

Таким образом, определив величину K и μ_r образцов при фиксированных значениях напряжённости магнитного поля, присваивают эти величины K и μ_r образцовым пластинам, соответствующим своим образцам.

Поскольку прибор (см. рис. 1) позволяет определить магнитные параметры изделий в постоянных магнитных полях, то и значения K и μ_r образцов и пластин нужно измерять в таких же полях. Однако, учитывая то, что образцы имеют небольшие поперечные размеры и малые для металлов величины удельной электрической проводимости σ и магнитной проницаемости μ_r материалов, можно осуществить измерение величин K и μ_r образцов в переменных (синусоидальных во времени) магнитных полях низких частот. Для этого необходимо выполнить основное условие:

$$\delta \geq \frac{p}{2}, \quad (11)$$

где δ - глубина проникновения переменного поля в образец:

$$\delta = \sqrt{2 / (2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma \cdot f)}. \quad (12)$$

Подставляя в формулы (11) и (12) численные значения величин $p=1$ см; $\mu_r=(1 \div 3)$; $\sigma=(0,1 \div 0,14) \cdot 10^7$ См/м (такие цифры характерны для слабомагнитных материалов), можно показать, что при использовании частоты изменения напряжённости сети ($f=50$ Гц) условие (11) всегда будет выполняться. Определение K и μ_r образцов и пластин в переменных полях позволяет в существенной мере упростить измерения, повысить чувствительность и точность.

Измерительная схема для определения K и μ_r образцов представлена на рис. 6.

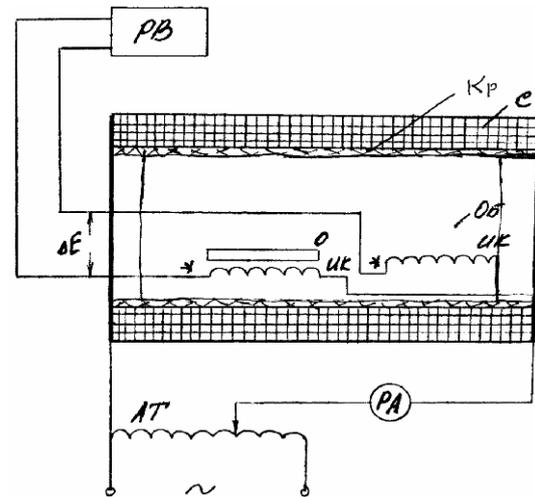


Рис. 6. Схема устройства для измерения параметра K образца на переменном токе

Схема содержит соленоид S , цилиндрическую обойму $Об$ с двумя измерительными катушками $ИК$, образец O , каркас соленоида $Кр$, амперметр $РА$, вольтметр $РВ$ и автотрансформатор $АТ$. Последний подключают к сети 220 В и $f=50$ Гц. Измерительные катушки располагаются вдоль оси обоймы и имеют одинаковые числа витков W_0 и площади поперечного сечения. Катушки включены последовательно-встречно. В одну из измерительных катушек помещают образец O . Затем обойму размещают вблизи центра соленоида. При этом соблюдают параллельность осей обоймы, катушек и соленоида. Разностный сигнал ΔE , снимаемый с двух встречновключенных измерительных катушек, поступает на вольтметр $РВ$ эффективных значений.

Амплитудное значение напряжённости магнитного поля в соленоиде определяют по формуле:

$$H_m = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{\text{эф}} \cdot W_n}{l_c}, \quad (13)$$

где $I_{\text{эф}}$ - эффективное значение тока в соленоиде, регистрируемое амперметром; W_n - число витков намагничивающей обмотки соленоида; l_c - длина соленоида.

Величину магнитной восприимчивости образца пластины находят по формуле:

$$K = \frac{\Delta E}{4,44 \cdot f \cdot W_0 \cdot \mu_0 \cdot H_m \cdot S_{\text{обр}}}, \quad (14)$$

где $S_{\text{обр}}$ - площадь поперечного сечения образца; $S_{\text{обр}}=p \cdot g$.

Сначала по формуле (13) рассчитывают значения $I_{\text{эф}}$, которые обеспечивают получение в соленоиде величин напряжённости поля $H_{\text{ср}}$. При этом принимают $W_n=1158$; $l_c=1$ м. Затем собирают схему, показанную на рис. 6. Помещают последовательно каждую катушку цилиндрической обоймы, которую, в свою очередь, располагают в центральной части соленоида (т.е. в области однородного магнитного поля). Далее устанавливают с помощью автотрансформатора и амперметра рассчитанное значение $I_{\text{эф}}$, соответствующее величине $H_{\text{ср}}$, и снимают при этих значениях показаний вольтметра,

т.е. величины $\Delta E_{эф}$. По формулам (10) и (14) рассчитывают значения K и μ_r исследуемых им пластин. Число витков ИК $W_0=1700$.

Градуировка прибора по магнитным параметрам образцовых пластин осуществляется следующим образом.

Сущность градуировки прибора (см. рис. 1) состоит в том, что рабочий датчик последовательно помещается на каждую образцовую пластину с известными значениями магнитной восприимчивости и магнитной проницаемости, соответствующими заданной напряжённости магнитного поля и снимаются показания веберметра. После этого строят зависимости $\Delta\psi=f(K)$ и $\Delta\psi=f(\mu_r)$ при постоянных значениях напряжённости поля в зазоре, между полюсами магнитопровода РД. В качестве веберметра в схеме рис. 1 используется при градуировке прибора микровеберметр типа Ф5050. Это электронный переносной с цифровым отсчётом прибор, предназначенный для измерения разности потокоцеплений $\Delta\psi$ при испытаниях изделий и образцов в постоянных магнитных полях.

Микровеберметр имеет 4 предела измерения магнитного потокоцепления с конечными значениями 10; 100 мкВб; 1 мкВб, 10 мВб.

Предел допускаемой абсолютной погрешности микровеберметра в диапазоне температур от 10 до 35°C, выраженный в мкВб, не должен превышать значений, определяемых по формуле:

$$\Delta = \pm (0,003\Delta\psi + 0,002\Delta\psi_k), \quad (15)$$

где $\Delta\psi$ - показание микровеберметра, мкВб; $\Delta\psi_k$ - конечное значение предела измерения микровеберметра, мкВб.

Отсчёт измеряемого магнитного потокоцепления производится по цифровому табло, содержащему три основных отсчётных разряда, единицу переполнения и индексацию полярности входного сигнала ("+", "-"). Микровеберметр обеспечивает измерение вольт-секундной площади входного импульса напряжения длительностью от 1 мс до 1 с.

Входное сопротивление $R_{вх}$ микровеберметра и наибольшее допустимое сопротивление $R_{внешн}$ источника сигнала на различных пределах измерения соответствует значениям, указанным в таблице.

Для обеспечения непосредственного отсчёта в пределах 1 и 10 мВб входное сопротивление микровеберметра регулируется в зависимости от сопротивления источника сигнала в диапазоне от 0 до 60 Ом.

Принцип действия микровеберметра основан на интегрировании эдс, индуцированной в измерительной обмотке датчика, операционным усилителем и преобразование его выходного напряжения в пропорциональный интервал времени путём раздела интегрирующей ёмкости нормированным по амплитуде импульсом тока.

Таблица

Предел измерения	$R_{вх}$, Ом	$R_{внешн}$, Ом
мкВб	10	не нормируется
	100	то же
мВб	1	940-1000
	10	9940-10000

Для автоматической установки нулевого уровня операционного усилителя в микровеберметре используется корректирующий усилитель. Фиксация исходного уровня выходного напряжения операционного усилителя осуществляется компенсационным компаратором.

Таким образом, в работе рассмотрено дифференциальное устройство для локального контроля относительной магнитной проницаемости и магнитной восприимчивости плоских изделий. Предложена методика градуировки прибора, состоящая в определении зависимости напряжённости магнитного поля в зазоре накладного датчика от намагничивающего тока и зависимости магнитных параметров от показаний веберметра при фиксированных значениях напряжённости магнитного поля.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Антонов В.Г., Петров Л.М. Щёлкин А.П. Средства измерения магнитных параметров материалов. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 216 с.
- [2] Испытание магнитных материалов и систем / Под ред. А.Я. Шихина. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 376 с.
- [3] Чечерников В.И. Магнитные измерения. – М.: изд-во Московского университета, 1969, – 387 с.
- [4] Кифер И.И., Испытания ферромагнитных материалов. – М.: Энергия, 1969, - 360 с.
- [5] Каплан Л.М., Чечурина Е.Н. Современные методы определения характеристик магнитомягких материалов. – Заводская лаборатория, 1977. Т. 43, № 10. – С. 1222-1227.
- [6] Чечурина Е.Н. Приборы для измерения магнитных величин. – М.: Энергия, 1969. – 168 с.

Поступила 9.03.2006