

УДК 537.611.44

URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/phys/instph/1062.html>

ОБЗОР ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ ПО ФИЗИКЕ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ МЕТРОЛОГА

М.К. Кочетыгин

kochetygin.m@sch2009.net

О.М. Лаврушин

lavrushin.o@sch2009.net

Л.В. Щеблецов

schebletsov.l@sch2009.net

В.С. Норов

looking070@sch2009.net

*Инженерно-физическая метрологическая лаборатория ГБОУ «Школа № 2009»,
Москва, Российская Федерация*

Понятия экспериментальной физики и метрологии являются практически синонимами, поскольку вся экспериментальная физика неразрывно связана с измерением. Метрология как наука помимо правил, обеспечивающих количественную сторону процедуры измерения, имеет еще и аналитическую методологическую основу, построенную на фундаментальной науке и научной логике. Нарушение аналитических правил метрологического обеспечения физического эксперимента ведет к неверной оценке получаемых результатов. Пример такого непонимания методологии метрологического обеспечения показан на основе анализа типовой лабораторной работы по определению магнитной проницаемости ферромагнетика. Отсутствие точного определения для измеряемого физического параметра и условий, в которых этот параметр может быть определен, приводит к неопределенности полученных результатов.

Ключевые слова: измерение, метрологическое обеспечение, ферромагнетики, магнитная проницаемость, напряженность магнитного поля, магнитная индукция и намагниченность ферромагнетика, основная кривая намагниченности, устойчивое состояние, магнитные домены, междоменные стенки

Введение. Экспериментальная физика неразрывно связана с процедурами измерения, т. е. с метрологией. Метрологическое обеспечение физического эксперимента имеет две стороны: количественную и качественную.

Есть количественная сторона метрологии. К ней относится все, что влияет на точность измерения и на минимизацию возможной ошибки: от приборного обеспечения и технологии процедуры измерения и до статистических методов обработки результатов измерения включительно.

Существует также качественная сторона метрологии, которая позволяет ответить на вопрос о том, как соотносится физический параметр, измеряемый в эксперименте, с параметром, который указан в задании на эксперимент, как соотносятся возможности используемого в эксперименте оборудования, выбранного метода проведения эксперимента и метода обработки результата с целью эксперимента (рис. 1).

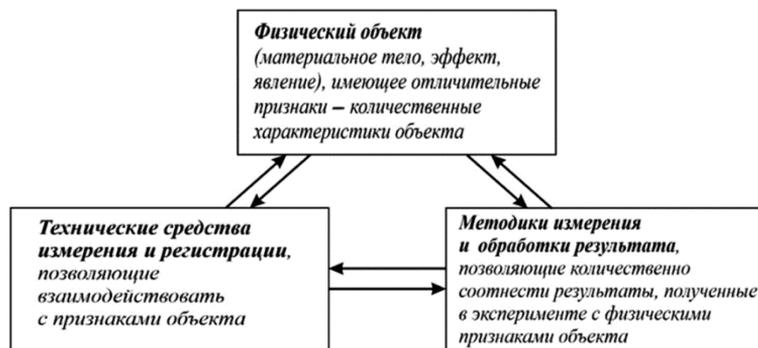


Рис. 1. Блок-схема метрологического аналитического обеспечения физического эксперимента

К сожалению, важности качественной, аналитической стороны метрологического обеспечения эксперимента часто не уделяют заслуженного внимания. Рассмотрим для примера лабораторную работу по определению магнитной проницаемости [1, 2] — одной из основных характеристик ферромагнетика. В работе используется тороидальный магнитопровод с двумя обмотками W_1 и W_2 , выполненный из магнитомягкого ферромагнетика. Обмотка W_1 подключается к источнику переменного тока $I(t) = I_m \sin \omega t$, создающего в кольцевом магнитопроводе переменное магнитное поле с напряженностью $H(t)$. Этому полю ставят в соответствие значение \bar{H} , определяемое через действующее значение, создающего его тока \bar{I} :

$$\bar{H} = w_1 \frac{\bar{I}}{l}, \quad (1)$$

где w_1 — число витков обмотки W_1 ; \bar{I} — действующее значение тока в обмотке W_1 ; l — длина обмотки W_1 ; $\bar{I} = I_m \sqrt{2}$, это справедливо только для гармонического тока или напряжения.

Во второй обмотке W_2 в соответствии с законом Фарадея наводится ЭДС

$$e(t) = -w_2 S \frac{dB(t)}{dt}, \quad (2)$$

где w_2 — число витков обмотки W_2 ; S — площадь сечения обмотки W_2 ; $B(t)$ — индукция магнитного поля в сердечнике. В контуре вторичной обмотки используется RC -цепочка, выполняющая функцию интегратора. Это дает возможность перейти от $dU(t)/dt$ к $U(t)$ или с точностью до коэффициентов перейти от $dB(t)/dt$ к $B(t)$. Поэтому, определив с помощью вольтметра

действующее значение \bar{U} , можно из формулы (2) определить и соответствующее ему значение \bar{B} :

$$\bar{B} = \frac{R_2 C \bar{U}}{W_2 S}. \quad (3)$$

Далее, вычислив по формулам (1), (3) \bar{H} и \bar{B} , определяют некоторое значение $\bar{\mu}$ по формуле

$$\bar{\mu} = \frac{\bar{B}}{\bar{H}}, \quad (4)$$

и уже эту величину авторы лабораторной работы называют магнитной проницаемостью ферромагнитного материала магнитопровода.

Разбор лабораторной работы. Что в этой работе вызывает недоумение у метролога? Здесь не были использованы принципы метрологического аналитического обеспечения, состоящие в следующем:

- *измеряемая физическая величина должна иметь в задании на эксперимент однозначное толкование, опирающееся на действующую систему мер и не допускающее неопределенности;*
- *должны быть определены физические условия, в которых это однозначное толкование достигается;*
- *должны быть указаны технические и методологические способы достижения физических условий, при которых измеряемая величина соответствует своему однозначному определению.*

Если исходить из указанных принципов метрологического обеспечения, то применительно к лабораторной работе по определению магнитной проницаемости ферромагнетика замечания будут следующими.

1. Нарушен первый принцип метрологического обеспечения: ***измеряемая физическая величина должна иметь в задании на эксперимент однозначное толкование, опирающееся на действующую систему мер и не допускающее неопределенности.*** Этого в описании нет.

Магнитная проницаемость (МП) не относится к базовым вещественным физическим величинам, тем не менее она считается важной комбинаторной характеристикой магнитных свойств ферромагнетика, часто используемой на практике. Определение МП (μ) ферромагнетика неотделимо от понятия основной кривой намагничивания (ОКН) [3, 4], на что в лабораторной работе четкого указания нет.

Для справки. На практике мы имеем дело с ферромагнетиками в виде поликристаллического массива. Поэтому наличием осей легкого, среднего и трудного намагничивания, имеющих в монокристалле ферромагнетика,

можно пренебречь. И для технического ферромагнетика, являющегося поликристаллом с произвольной, как правило, ориентацией, кристаллографических осей составляющих его монокристаллов, ОКН ферромагнетика имеет единственное статистическое усредненное по всему объему массива значение.

Графическое пояснение к общепринятым определениям МП и ОКН представлено на рис. 2. Здесь введены следующие обозначения: B — магнитная индукция; B_s — магнитная индукция насыщения; H — напряженность магнитного поля; J — намагниченность; H_s — напряженность магнитного поля, при которой достигается индукция B_s ; μ — магнитная проницаемость; μ_0 — магнитная проницаемость вакуума; μ_n — начальная магнитная проницаемость; μ_{\max} — наибольшая магнитная проницаемость; μ_d — дифференциальная магнитная проницаемость; α — угол секущей к графику магнитной проницаемости в некоторой точке A , тангенс которого равен магнитной проницаемости в этой точке; α_n — угол, тангенс которого соответствует начальной магнитной проницаемости; α_m — угол, тангенс которого соответствует максимальной магнитной проницаемости.

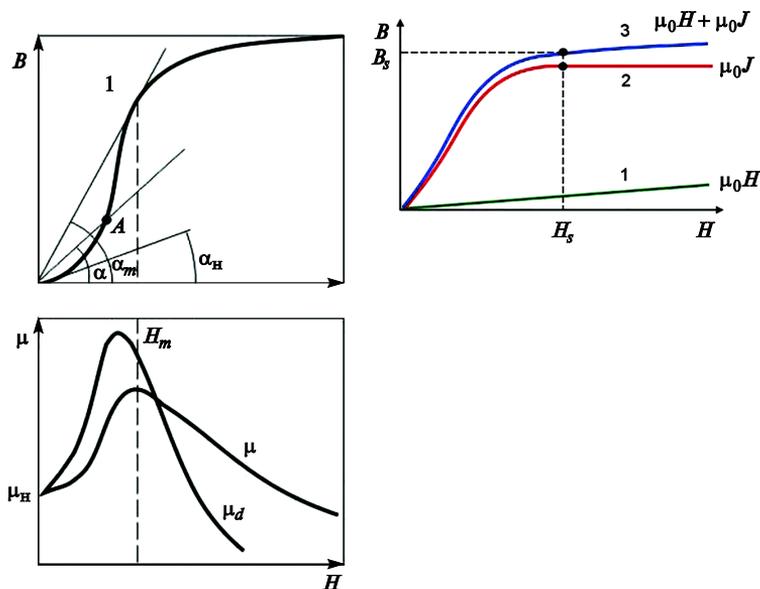


Рис. 2. Наиболее часто применяемые варианты определения МП

Начальная МП μ_n равна тангенсу угла наклона касательной к ОКН вблизи нулевого значения напряженности магнитного поля в пределах участка обратимого (упругого) намагничивания:

$$\mu_n = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H}.$$

Магнитная проницаемость μ равна тангенсу угла наклона линии, соединяющей начало координат и произвольную точку A на ОКН:

$$\mu = \frac{B_A}{H_A}.$$

Максимальная МП (μ_{\max}) равна наибольшему из возможных тангенсу угла наклона линии, соединяющей начало координат и точку на ОКН (касательную к ОКН):

$$\mu_{\max} = \max \frac{B_A}{H_A}.$$

Дифференциальная МП (μ_d) равна тангенсу угла наклона касательной к ОКН в любой выбранной на ОКН точке:

$$\mu_d = \frac{dB(H)}{dH}.$$

Эти определения магнитной проницаемости приняты в учебной и научной литературе [3–5]. По своему физическому смыслу магнитная проницаемость характеризует магнитный отклик среды, получаемый только для точек (H_i, B_i) , характеризующих магнитное состояние ферромагнетика, расположенных на ОКН, и при выполнении нескольких условий, о которых будет ниже. Но дело в том, что ферромагнетик может иметь любую комбинацию H_i, B_i в границах предельной петли гистерезиса. И, соответственно, если не привязываться к ОКН, выражение для МП (1) может иметь любое значение в широком диапазоне (рис. 3). Красным замкнутым контуром здесь показана петля гистерезиса технического насыщения. Внутри петли расположена область допустимых магнитных состояний (H, B) ферромагнетика. Для напряженности внешнего магнитного поля H_a допустимы значения магнитной индукции в диапазоне от B_{\min} до B_{\max} . Этим значениям магнитных состояний будут соответствовать величины магнитной проницаемости, лежащие в диапазонах значений тангенсов углов от $\text{tg}\alpha_{\max} \geq \text{tg}\alpha_a \geq \text{tg}\alpha_{\min}$.

Например, при напряженности внешнего магнитного поля H_a магнитная индукция ферромагнетика в зависимости от магнитной предыстории может иметь любое значение на интервале $B_{\min} - B_{\max}$. Соответственно, если МП, определенная по формуле (4), не привязана к ОКН, то она будет иметь достаточно широкий диапазон значений, а не единственное значение.

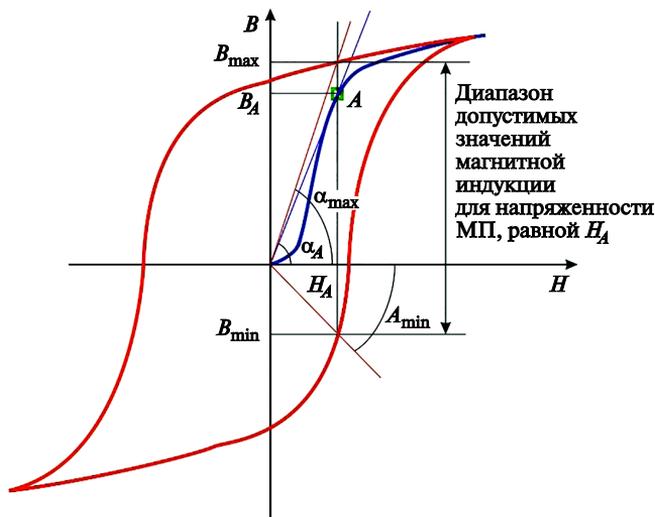


Рис. 3. Петля гистерезиса

В действующей нормативной документации ясности с определением физической величины, именуемой магнитной проницаемостью, очень мало. Есть ГОСТ 19693–74 «Материалы магнитные, термины и определения» [6]. Этот ГОСТ достаточно старый, но действующий. За прошедшее время базовые физические величины были переопределены. В настоящее время базовые физические величины определяются через физические константы, такие как скорость света в вакууме, постоянная Планка, постоянная Больцмана, значение элементарного заряда электрона или число Авогадро. Но помимо того что этот ГОСТ устарел, прямого определения *магнитной проницаемости* как таковой в ГОСТе нет, а есть разные частные варианты отношения величин, связанных с магнитной индукцией ферромагнетика, относящиеся к техническим прикладным свойствам ферромагнетика. Например:

– *начальная магнитная проницаемость* — значение магнитной проницаемости на начальной или основной кривой намагничивания по индукции при стремлении напряженности магнитного поля к нулю, деленное на магнитную постоянную;

– *комплексная магнитная проницаемость* — отношение комплекса магнитной индукции к комплексу напряженности магнитного поля в материале, деленное на магнитную постоянную. При этом напряженность магнитного поля изменяется во времени синусоидально, а для магнитной индукции берется составляющая, изменяющаяся во времени синусоидально с той же частотой, что и напряженность магнитного поля. Предполагается, что про-

странственные векторы, характеризующие напряженность магнитного поля и индукции, параллельны;

– *амплитудная магнитная проницаемость* — проницаемость, равная модулю комплексной магнитной проницаемости;

– *максимальная амплитудная магнитная проницаемость* — максимальное значение амплитудной магнитной проницаемости как функции амплитуды напряженности магнитного поля или индукции;

– *максимальная магнитная проницаемость* — максимальное значение магнитной проницаемости как функции напряженности магнитного поля на основной кривой намагничивания по индукции;

– *обратимая магнитная проницаемость* — предел отношения изменения магнитной индукции к удвоенной амплитуде изменения напряженности магнитного поля в данной точке начальной кривой намагничивания по индукции (петли магнитного гистерезиса), деленный на магнитную постоянную;

– *дифференциальная магнитная проницаемость* — производная от магнитной индукции по напряженности магнитного поля в данной точке начальной кривой намагничивания по индукции (петли магнитного гистерезиса), деленная на магнитную постоянную;

– *импульсная магнитная проницаемость* — отношение приращения индукции к приращению напряженности магнитного поля в материале при намагничивании импульсом тока определенной формы амплитуды и длительности, деленное на магнитную постоянную;

– *проницаемость возврата* — дифференциальная магнитная проницаемость на прямой возврата.

То есть термина «магнитная проницаемость» в ГОСТ 19693–74 нет. Единственные определения МП, привязанное к ОКН, это начальная и максимальная магнитная проницаемость как функции напряженности магнитного поля на основной кривой намагничивания по индукции. Это μ_n и μ_{max} из описания к рис. 2.

В этом же документе [6] дано определение ОКН: «Основная кривая намагничивания — это кривая, представляющая собой геометрическое место вершин симметричных петель магнитного гистерезиса, которые получаются при последовательно возрастающих максимальных значениях напряженности магнитного поля». Но это определение вообще не имеет отношения к физике, поскольку таких кривых может быть неопределенное количество в зависимости от способа получения петель магнитного гистерезиса: например, в зависимости от частоты тока в первичной обмотке.

В другом документе [7] ГОСТ Р 52002–2003 «Электротехника. Термины и определения основных понятий» есть определение МП. Это определение

звучит так: «Магнитная проницаемость — величина, характеризующая магнитные свойства вещества, скалярная для изотропного вещества и тензорная для анизотропного вещества, произведение которой на напряженность магнитного поля равно магнитной индукции». Но при этом определения ОКН в ГОСТ Р 52002–2003 не дается и в определении МП оно не участвует. То есть это определение точно так же, как и в [6], не указывает, на то, что МП может быть определена единственным образом через ОКН. А как ясно из рис. 3, если не привязывать МП к ОКН, то это определение МП теряет смысл и становится некоторым произвольным коэффициентом пропорциональности, а не базовой характеристикой материала.

2. Нарушен второй принцип: **должны быть определены физические условия, в которых это однозначное толкование достигается.**

При определении МП не указаны условия, для которых это определение справедливо. Получая значение МП с помощью переменного магнитного поля, обращают внимание только на проблему, создаваемую индукционными вихревыми токами в сердечнике, но при этом не учитываются другие эффекты, представленные на рис. 4.

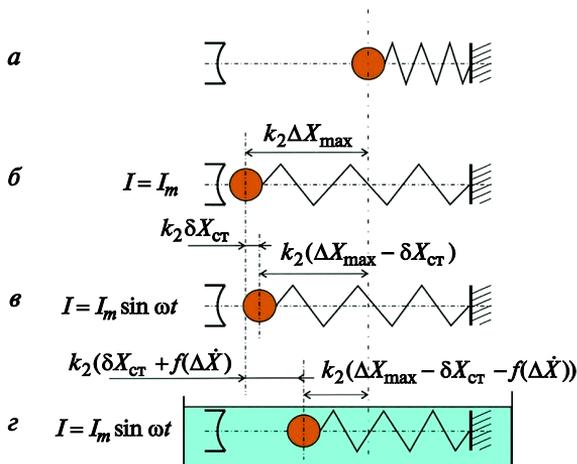


Рис. 4. Механистическая модель смещения междоменной стенки при перемагничивании:

а — нейтральное состояние; *б* — стационарное состояние (силы уравновешены, что соответствует случаю определения μ через статическое ОКН); *в* — динамическое состояние (движение упругое с минимальными потерями, соответствует случаю определения μ для узкой петли гистерезиса); *г* — динамическое состояние (движение в вязкой среде с большими потерями, соответствует случаю определения μ для широкой петли гистерезиса)

Рассмотрим условную механистическую модель смещения элемента междоменной стенки, которую в рассматриваемой нами модели замещает стальной шарик, при перемагничивании ферромагнетика внешним гармоническим полем. Положение элемента междоменной стенки в этой механистической модели определяется воздействием двух факторов. Слева расположен полюс электромагнита, создающий внешнее магнитное поле, вдоль оси X , напряженность которого H с точностью до постоянного коэффициента k_1 определяется значением тока в обмотке:

$$H = k_1 I.$$

Внешнее магнитное поле создает силу, заставляющую стальной шарик смещаться, в соответствии с законом изменения тока, на величину ΔX . Смещение шарика ΔX в рассматриваемой нами модели будет соответствовать увеличению объема доменов с благоприятным магнитным моментом, т. е. пропорциональна приращению намагниченности ферромагнетика ΔJ :

$$\Delta J = k_2 \Delta X.$$

Чем больше смещение шарика — элемента междоменной стенки — тем больше намагниченность ферромагнетика. Справа у шарика имеется упругая связь, создающая упругую силу, противостоящую магнитной и пропорциональную смещению шарика ΔX . Эта упругая сила имитирует силы упруго-кристаллического поля в ферромагнетике, направленные против магнитных сил.

Вернемся к рис. 4. На этом рисунке рассмотрены четыре основных состояния элементов междоменной стенки в зависимости от внешнего магнитного поля и характеристик самого ферромагнетика:

1) нейтральное состояние. Внешнее поле отсутствует, элемент междоменной стенки находится в равновесном состоянии, смещение $\Delta X = 0$;

2) при подаче в обмотку электромагнита постоянного тока $I(t) = I_m = \text{const}$ в ферромагнетике создается постоянное магнитное поле с напряженностью $H_m = k_1 I_m$. После окончания переходного процесса, когда система приходит в установившееся состояние, кинетическая энергия равна нулю, магнитная сила уравнивается упругой силой, смещение шарика $\Delta X = \Delta X_{\max}$, это соответствует наибольшему приращению намагниченности ферромагнетика $\Delta J_{\max} = k_2 \Delta X_{\max}$ для данного значения напряженности внешнего поля H_m . В этом случае аналог $\bar{\mu}_a$ в рассматриваемой нами модели с точностью до постоянного коэффициента k будет определяться по отношению

$$\bar{\mu}_a = \frac{\Delta J_{\max}}{H_m} = \frac{k_2 \Delta X_{\max}}{k_1 I_m};$$

3) при подаче в обмотку электромагнита переменного тока $I(t) = I_m \sin \omega t$ на шарик действует переменная магнитная сила, смещающая его вдоль оси X , и противостоящая ей сила упругой связи, пропорциональная ее деформации. Очевидно, что в динамике начинают проявляться диссипативные силы по типу «сухого трения» и амплитудное отклонение шарика от положения равновесия будет меньше $\Delta X_{\min 1} < \Delta X_{\max}$ за счет диссипативных потерь на величину $\delta X_{\text{ст}}$:

$$\Delta X_{\min 1} = \Delta X_{\max} - \delta X_{\text{ст}}.$$

Сухое трение, как известно, не зависит от скорости. Поэтому величина, соответствующая $\bar{\mu}_{a1}$, по пиковому значению гармоники уменьшится, для того же значения напряженности внешнего поля H :

$$\bar{\mu}_{a1} = \frac{k_2 \Delta X_{\max 1}}{k_1 I_m};$$

4) если теперь рассматриваемую нами конструкцию поместить в вязкую среду, то при подаче в обмотку электромагнита переменного тока $I(t) = I_m \sin \omega t$ на шарик по-прежнему будет действовать переменная магнитная сила, смещающая его вдоль оси X , и противостоящая ей сила упругой связи, пропорциональная ее деформации и сила сухого трения. Но дополнительно возникнет и сила вязкого трения при магнитострикции, которая, как и сила сухого трения, направлена против движения, но ее модуль прямо пропорционален скорости. Это значит, что общие диссипативные силы будут значительно больше, чем в случае 3), соответственно, больше будет значение работы и еще меньше амплитуда колебаний $X_{\min 2}$:

$$\Delta X_{\min 2} = \Delta X_{\max} - \delta X_{\text{ст}} - f(\Delta \dot{X}).$$

Соответственно, значение $\bar{\mu}$ будет еще меньше:

$$\bar{\mu}_{a2} = \frac{k_2 \Delta X_{\max 2}}{k_1 I_m}.$$

При этом из-за вязкого трения величина $\bar{\mu}_{a2}$ зависит от частоты тока подмагничивания, чем больше частота, тем меньше $\bar{\mu}_{a2}$. Это можно качественным образом проиллюстрировать с помощью рис. 5.

Таким образом, предложенный в лабораторной работе метод определения магнитной проницаемости не соответствует второму принципу метрологического обеспечения, поскольку при подмагничивании переменным током не создаются условия, когда магнитная проницаемость может быть однозначно определена.

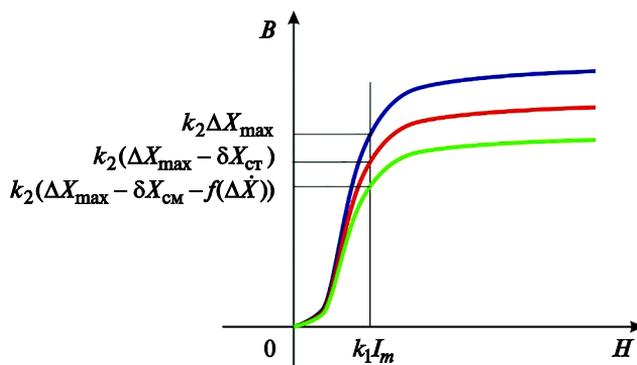


Рис. 5. Изменение ОКН при разных вариантах подмагничивания на примере механической модели междоменной стенки: синяя линия получена при подмагничивании постоянным током $I(t) = I_m = \text{const}$; красная — при подмагничивании переменным током $I(t) = I_m \sin \omega t$ в условиях сопротивления смещению стенки только по типу сухого трения; зеленая — при подмагничивании переменным током $I(t) = I_m \sin \omega t$ в условиях сопротивления смещению стенки одновременно по типу сухого и вязкого трения

Ровно по этой же причине нельзя определять ОКН так, как это сделано в ГОСТ 19693–74 [6]: «Основная кривая намагничивания — это кривая, представляющая собой геометрическое место вершин симметричных петель магнитного гистерезиса, которые получаются при последовательно возрастающих максимальных значениях напряженности магнитного поля», поскольку не указан метод получения частных симметричных петель гистерезиса, статический или динамический. Если это делать по методу, предложенному в рассматриваемой лабораторной работе, то результат будет ошибочен по аналогии с рис. 5.

3. Нарушен третий принцип метрологического обеспечения: **должны быть указаны технические и методологические способы достижения физических условий, при которых измеряемая величина соответствует своему однозначному определению.**

Эту ошибку рассмотрим на примере определения значений напряженности внешнего магнитного поля и магнитной индукции через их действующее значение. Как известно, действующее значение \bar{I} гармонического тока $I(t)$ равно значению постоянного тока, выделяющего одинаковую энергию с гармоническим за единицу времени.

Для гармонического тока $I(t) = I_m \sin \omega t$, подаваемого в обмотку подмагничивания W_1 , действующее значение составляет $\bar{I} = I_m / \sqrt{2}$. Таким же способом, по методике лабораторной работы определяется и действующее значение по напряжению выходного сигнала $\bar{U} = U_m / \sqrt{2}$, снимаемого с обмотки W_2 . Но, как видно из самого лабораторного эксперимента, во вторичной обмотке в результате эффекта самоиндукции генерируется не гармонический сигнал, а периодический (рис. 6).

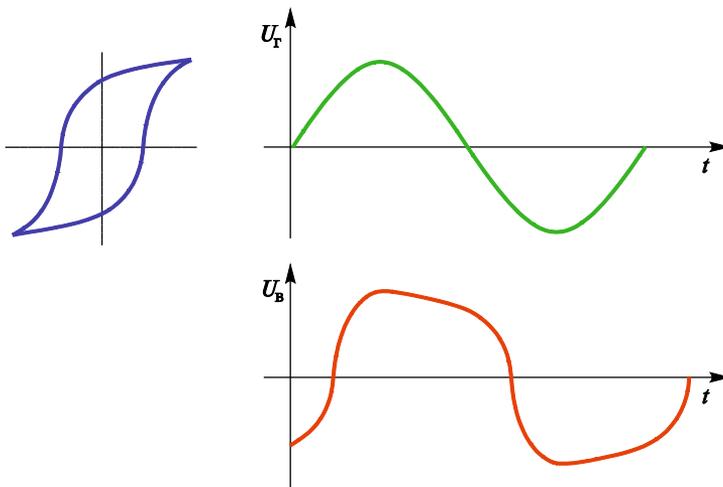


Рис. 6. Форма основных сигналов:

синим цветом показана петля магнитного гистерезиса на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ); *зеленым* — график гармонического электрического сигнала U_T на управляющих электродах ЭЛТ по горизонтали; *красным* — график периодического электрического сигнала U_B на управляющих электродах ЭЛТ по вертикали

Теперь сравним формы различных периодических сигналов (рис. 7).

Очевидно, что периодический электрический сигнал, снимаемый с вторичной обмотки W_2 (см. рис. 6), должен иметь коэффициент эффективности больше, чем $1/\sqrt{2}$, но меньше 1. И это отличие от предложенного в лабораторной работе значения коэффициента пересчета, равного $1/\sqrt{2}$, может быть очень большим. Поэтому использование в лабораторной работе одинаковых коэффициентов пересчета для действующих значений к гармоническому сигналу и периодическому сигналу неверно.

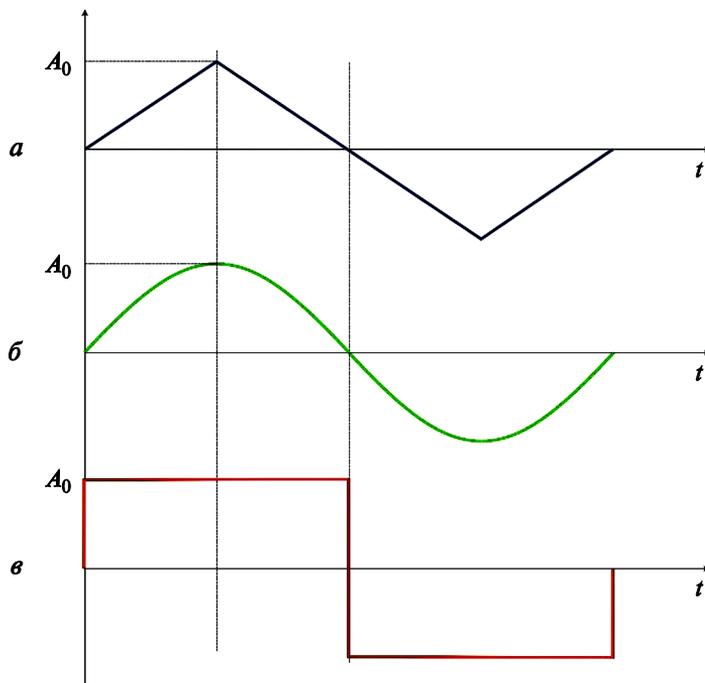


Рис. 7. Сравнение разных периодических электрических сигналов по их эффективной мощности:

- a* — коэффициент эффективности по постоянному току 0,5;
- б* — коэффициент эффективности по постоянному току $1/\sqrt{2}$;
- в* — коэффициент эффективности по постоянному току 1,0

Заключение. Вопросы метрологического обеспечения физических экспериментов являются неотъемлемой частью всей экспериментальной физики. В исследуемой лабораторной работе не определены следующие важные с точки зрения метрологии условия:

- нет однозначного определения измеряемой физической величины «магнитная проницаемость» по ГОСТ;
- не сформулированы условия, в которых должна определяться МП, соответственно, нет однозначной процедуры определения МП, привязанной к ее определению по ГОСТ;
- при обосновании перехода к действующему значению тока безосновательно считается, что если справедливо соотношение $U_1/I_1 = (\sqrt{2}U_1)/(\sqrt{2}I_1)$, то должно быть справедливо соотношение $B_1/H_1 = (\sqrt{2}B_1)/(\sqrt{2}H_1)$.

Класс точности используемых для измерения и регистрации приборов, чистота проведения экспериментов и методы статистической обработки экспериментальных результатов важны. Но неточно сформулированные определения цели эксперимента, методика проведения и обработки результатов эксперимента не позволяют установить четкие однозначные связи между изучаемым физическим объектом, его физическими признаками и свойствами, техническими возможностями экспериментального оборудования, методиками проведения эксперимента и обработки полученных экспериментальных результатов обнуляют всю работу. В свою очередь, неопределенность с основными магнитными характеристиками не позволяет в действующих физических конструкциях создать приемлемую модель для перспективного датчика ударной силы магнитоупругого типа [8, 9].

В статье показано, что даже рутинные давно известные учебные лабораторные работы [1, 2] не избавлены от недостатка — в них отсутствует метрологическая экспертиза.

Вероятно, пришла пора переопределить некоторые физические характеристики и внести соответствующие изменения в нормативные документы. Например, определение ОКН вместо геометрического: «Основная кривая намагничивания — это кривая, представляющая собой геометрическое место вершин симметричных петель магнитного гистерезиса, которые получаются при последовательно возрастающих максимальных значениях напряженности магнитного поля» следует сделать физическим, с привязкой к другим параметрам магнитного состояния ферромагнетика, например, основанным на его термодинамике в устойчивом состоянии. Тогда и определение магнитной проницаемости будут опираться на нормальную физическую основу и станет однозначной.

Литература

- [1] Стогней О.В., Бабкина И.В., сост. *Методические указания к лабораторным работам. Основы магнетизма*. Воронеж, ВГТУ, 2022, 46 с.
- [2] Цаплин А.И., ред. *Лабораторный практикум. Электромагнетизм*. Пермь, Перм. гос. техн. ун-т, 2004, 74 с.
- [3] Вонсовский С.В., Шур Я.С. *Ферромагнетизм*. Москва-Ленинград, ОГИЗ, 1948, 816 с.
- [4] Бауманн Э. *Измерение сил электрическими методами*. Москва, Мир, 1978, 430 с.
- [5] Шишкинский В.И. *Магнитоанизотропные монолитные силоизмерители*. Москва, Машиностроение, 1981, 80 с.

- [6] ГОСТ 19693–74. *Материалы магнитные. Термины и определения*. Москва, Государственный комитет СССР по стандартам, 1975, 34 с.
- [7] ГОСТ Р 52002–2003. *Электротехника. Термины и определения основных понятий*. Москва, ГОССТАНДАРТ России, 2003, 31 с.
- [8] Лаврушин М.Ю. Датчики измерений на основе генераторного эффекта в ферромагнетиках. *Приборы*, 2020, № 5 (239), с. 21–27.
- [9] Лаврушин М.Ю. Исследование поведения ферромагнетика при динамической деформации на примере инвара 44НХТЮ. *Приборы*, 2022, № 10 (268), с. 54–62.

Поступила в редакцию 03.03.2025

Кочетыгин Михаил Каримович — ученик 10-го В класса ГБОУ «Школа № 2009», Москва, Российская Федерация.

Лаврушин Олег Михайлович — ученик 10-го В класса ГБОУ «Школа № 2009», Москва, Российская Федерация.

Щеблецов Лев Викторович — ученик 11-го А класса ГБОУ «Школа № 2009», Москва, Российская Федерация.

Норов Виталий Сергеевич — ученик 10-го В класса ГБОУ «Школа № 2009», Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Лаврушин Михаил Юрьевич, научный руководитель Инженерно-физической метрологической лаборатории ГБОУ «Школа № 2009», Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кочетыгин М.К., Лаврушин О.М., Щеблецов Л.В., Норов В.С. Обзор лабораторной работы по физике с точки зрения метролога. *Политехнический молодежный журнал*, 2025, № 04 (99). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/phys/instph/1062.html>

REVIEW OF LABORATORY WORK IN PHYSICS FROM THE POINT OF VIEW OF A METROLOGIST

M.K. Kochetygin

kochetygin.m@sch2009.net

O.M. Lavrushin

lavrushin.o@sch2009.net

L.V. Shchebletsov

schebletsov.l@sch2009.net

V.S. Norov

looking070@sch2009.net

Engineering Physics Metrology Laboratory, SBEI School No. 2009, Moscow, Russian Federation

Experimental physics and metrology are synonymous words, since all experimental physics is inextricably linked with measurement. Metrology, as a science, in addition to the rules that ensure the quantitative side of the measurement procedure, also has an analytical methodological basis based on fundamental science and scientific logic. Violation of these analytical rules of metrological support for a physical experiment leads to an incorrect assessment of the results obtained. An example of such a misunderstanding of the methodology of metrological support is given on the basis of an analysis of a typical laboratory work on determining the magnetic permeability of a ferromagnet. The lack of an accurate definition for the measured physical parameter and the conditions under which this parameter can be determined leads to uncertainty of the results obtained.

Keywords: measurement, metrological support, ferromagnets, magnetic permeability, magnetic field strength, magnetic induction and magnetization of a ferromagnet, basic magnetization curve, steady state, magnetic domains, inter-domain walls

Received 03.03.2025

Kochetygin M.K. — Student, 10th grade B, State Budgetary Educational Institution “School no. 2009”, Moscow, Russian Federation.

Lavrushin O.M. — Student, 10th grade B, State Budgetary Educational Institution “School no. 2009”, Moscow, Russian Federation.

Shchebletsov L.V. — Student, 11th grade A State Budgetary Educational Institution “School no. 2009”, Moscow, Russian Federation.

Norov V.S. — Student, 9th grade B, State Budgetary Educational Institution “School no. 2009”, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Lavrushin M.Yu., Scientific Director, Engineering and Physical Metrology Laboratory, State Budgetary Educational Institution “School no. 2009”, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Kochetygin M.K., Lavrushin O.M., Shchebletsov L.V., Norov V.S. Review of laboratory work in physics from the point of view of a metrologist. *Politekhnikheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2025, no. 04 (99). (In Russ.). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/phys/instph/1062.html>