

# Экспериментальная оценка магнитных характеристик низкочастотных магнитопроводов

Николай Лемешко (nlem83@mail.ru), Михаил Горелкин (Mikhail.Gorelkin@rohde-schwarz.com), Павел Струнин (Pavel.Strunin@rohde-schwarz.com)

В статье рассмотрена номенклатура параметров магнитопроводов, представляющих интерес в контексте их использования в составе обмоточных изделий. Выполнен анализ способов построения семейства петель гистерезиса для оценки магнитных свойств магнитопроводов. Показано, что наиболее применимым для этой цели в условиях радиолaborатории является способ трансформатора, при котором петли гистерезиса отображаются на экране осциллографа в XY-режиме. Выполнен анализ составляющих погрешности построения петель гистерезиса при использовании метода трансформатора. С применением осциллографа серии R&S RTO в качестве примера выполнены измерения магнитных характеристик для магнитопровода, предназначенного для использования в трансформаторах и индуктивностях.

## Введение

В настоящее время достигнут значительный прогресс в области разработки аналоговых устройств и узлов, который во многом обусловлен достижениями в области материаловедения. Требования по снижению массогабаритных показателей, стоимости электронных устройств, а также развитие новых способов преобразования сигналов привели к изменению номенклатуры широко применяемой компонентной базы, в частности обмоточных изделий: трансформаторов, дросселей, катушек индуктивности. Доля их применения в совокупной массе других компонентов снижается, но одновременно повышаются требования к качеству таких изделий, которое определяется свойствами магнитопроводов (МП).

Известно, что снижение геометрических размеров магнитопроводов для заданного применения всегда ограничено процессами насыщения [1]. Именно по этой причине транс-

форматоры, применяемые в энергетике, не могут иметь малые размеры при большой мощности. При этом МП рекомендуется эксплуатировать при максимальной индукции, не превосходящей 80% от индукции насыщения  $B_H$  [2]. Если речь идёт о миниатюрных трансформаторах, то эксплуатация их МП осуществляется при индукции до  $(0,9...0,95) B_H$  в зависимости от критичности линейности трансформации [3]. Известным способом повышения допустимой напряжённости магнитного поля в МП является использование зазоров, что позволяет снизить эффективную магнитную проницаемость  $\mu_{эфф}$  и значительно повысить индукцию насыщения магнитной цепи с зазором.

В практике разработки электронных устройств и обмоточных изделий существует задача оценки магнитных характеристик МП. Она актуальна не только в случае, когда марка МП неизвестна или для него отсутствует справочная информация. Технология производства, условия хранения, механические напряжения оказывают существенное влияние на основные магнитные характеристики МП. Так, например, известно [4], что любая рихтовка магнитомягких материалов приводит к появлению механических напряжений, увеличивающих потери на перемагничивание и, соответственно, площадь петли гистерезиса. Учитывая это, в критически важных

случаях, а также при исследовании образцов новых материалов для МП целесообразно выполнять измерения их магнитных параметров, ориентируясь на применение широко распространённых средств измерений радиоэлектронных лабораторий. Естественно, применение рассмотренных далее решений не заменяет специальные комплексы для измерений в области материаловедения магнитных материалов [5], предназначенные в первую очередь для проведения научных и высокоточных исследований.

## Номенклатура магнитных характеристик МП и подходы к их определению

Магнитные характеристики материалов весьма широко описаны в литературе и охватывают уровни от атомного, рассматриваемого, например, при разработке технологий получения материалов с заданными магнитными свойствами [6], до цельных образцов МП. Для задачи экспериментального определения магнитных характеристик МП следует ориентироваться на подходы, выработанные в материаловедении электронной техники [7, 8].

Магнитные свойства ферромагнетиков, в частности используемых для изготовления низкочастотных МП, обычно характеризуют зависимостью магнитной индукции  $B$  от напряжённости магнитного поля  $H$ . Наиболее простым в реализации способом построения кривой намагничивания (КН) как функции  $B(H)$  является получение семейства петель гистерезиса, построенных при воздействии намагничивающего поля разной интенсивности. При их получении путём измерений необходимо учитывать тот факт, что проявляемые МП текущие магнитные свойства зависят от предыдущей намагниченности. В классическом случае в качестве исходного принимают размагниченное состояние МП, при котором в отсутствие

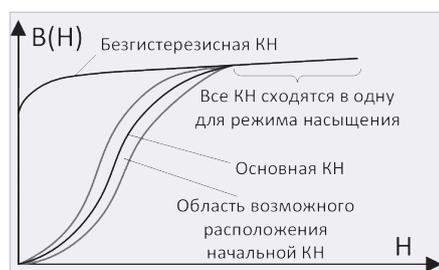


Рис. 1. Кривые намагничивания разных типов

внешнего поля  $B = 0$ , т.е. нет преимущественного направления намагниченности доменов, и сумма векторов их магнитных моментов близка к нулю.

В зависимости от характера воздействия магнитного поля обычно выделяют начальную, безгистерезисную и основную (коммутиационную) КН (см. рис. 1). Первая из них получается при постепенном увеличении  $H$  и по форме мало отличается от основной, но не имеет хорошей воспроизводимости и потому не используется для сравнения свойств магнитных материалов. Безгистерезисная КН, получаемая при одновременном воздействии постоянного и переменного полей с убывающей до нуля амплитудой, отражает способность материала сохранять остаточную индукцию, ход такой КН близок к верхней части петли гистерезиса в первом квадранте координатной плоскости  $H$ - $B$ .

Основная КН строится как геометрическое место вершин петель гистерезиса, получающихся при циклическом перемагничивании синусоидально изменяющимся полем, и отвечает требованию воспроизводимости. В дополнение к ней важнейшими характеристиками МП являются:

- зависимость относительной магнитной проницаемости  $\mu$  от  $H$  (кривая Столетова), её начальное и максимальное значения;
- зависимость дифференциальной магнитной проницаемости от  $H$ ;
- удельные потери на перемагничивание;
- потери на вихревые токи.

Кривая намагничивания строится непосредственно по данному ранее её определению и наряду с семейством петель гистерезиса необходима для определения перечисленных характеристик МП. Зависимость  $\mu(H)$  строится непосредственно по КН на основе соотношения  $\mu(H) = B(H)/(\mu_0 H)$ , где  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  Гн/м – абсолютная магнитная проницаемость. Сообразно этому, начальное  $\mu_n$  и максимальное  $\mu_{max}$  значения определяются по формулам:

$$\mu_n = \frac{1}{\mu_0} \lim_{H \rightarrow 0} \left( \frac{B(H)}{H} \right), \mu_{max} = \frac{1}{\mu_0} \frac{B(H_{\mu_{max}})}{H_{\mu_{max}}}, \quad (1)$$

где значение  $H_{\mu_{max}}$  соответствует  $\mu_{max}$ . КН используется в качестве исходных данных и для определения дифференциальной магнитной проницаемости, причём:

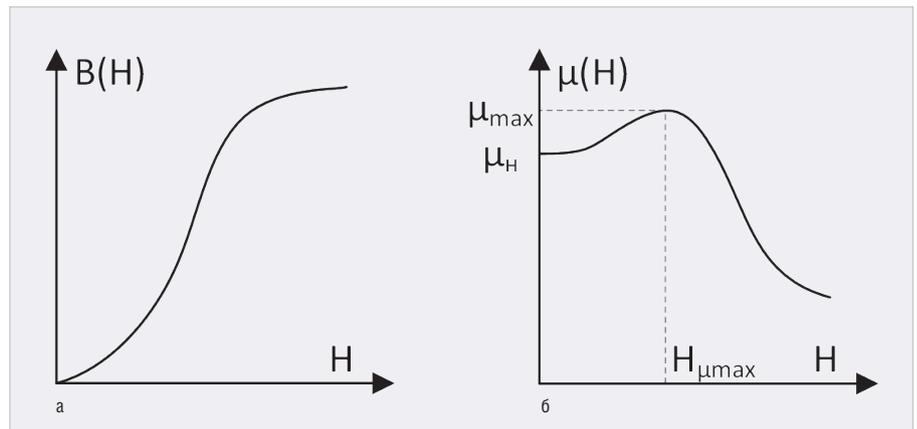


Рис. 2. Типовая форма зависимостей: а)  $B(H)$ ; б)  $\mu(H)$

$$\mu_{diff}(H) = \frac{1}{\mu_0} \frac{dB(H)}{dH}.$$

Типовая форма зависимостей  $B(H)$  и  $\mu(H)$ , получаемых экспериментально для магнитных материалов, представлена на рисунке 2.

Удельные потери на гистерезис за один цикл перемагничивания для магнитных веществ определяются формулой  $P [Джс / м^3] = \oint HdB$ , где интеграл берётся по петле гистерезиса, полученной для заданных условий измерений. Последняя формула может быть приведена к другому, более часто используемому виду, который отражает удельные потери в единицу времени и учитывает частоту перемагничивания  $f$ :

$$P_r [Вт / м^2] = \frac{f}{D} \oint HdB, \quad (2)$$

В формуле (2)  $D$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>. Потери на вихревые токи зависят не только от магнитных свойств МП, но и от проводимости материала. В зависимости от геометрической формы для МП применяют те или иные виды аппроксимации, позволяющей формально определить область протекания электрического тока. Например, для листового образца потери на вихревые токи составляют:

$$P_B [Вт / м^2] = 1,64d^2 f^2 B_{max}^2 / (D\rho), \quad (3)$$

где  $d$  – толщина листа, м;  $B_{max}$  – амплитуда магнитной индукции, Тл;  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление, Ом·м [7].

Итак, основные характеристики МП могут быть определены на основе экспериментально полученного семейства петель гистерезиса (ПГ), построенных для разных амплитудных значений напряжённости магнитного поля. Необходимо помнить, что форма КН и остальные характеристики МП проявляют зависимость от температуры и частоты, ввиду чего результаты измере-

ний будут справедливы лишь в некоторой ограниченной окрестности значений влияющих параметров. На основе КН при необходимости могут быть рассчитаны широко применяемые в физике показатели магнитной восприимчивости [9].

### Способы построения кривой гистерезиса для магнитных материалов

Исходным условием для экспериментального получения петель гистерезиса является размагниченное состояние МП. В наибольшей степени это состояние может быть достигнуто в результате нагрева МП выше точки Кюри [8]. Однако такой способ реализовать в условиях радиолaborатории трудно, а сам нагрев почти наверняка станет причиной коробления и расслаивания МП, выполненных из лент малой толщины с электрической изоляцией между ними. Поэтому для первичного размагничивания МП обычно используется переменное либо постоянное коммутируемое плавно убывающее магнитное поле. Этой же стратегии следует придерживаться при построении петель гистерезиса.

Петли гистерезиса для образцов магнитных материалов могут быть построены с применением способов, где текущее значение магнитной индукции трансформируется в другую физическую величину, которая может быть измерена тем или иным способом. Важно отметить, что такого рода преобразование должно быть линейным, а его коэффициент – известным, если требуется получить оценки перечисленных ранее магнитных характеристик.

Рассмотрим кратко три метода построения петель гистерезиса, оценивая удобство их применения в радиолaborатории.

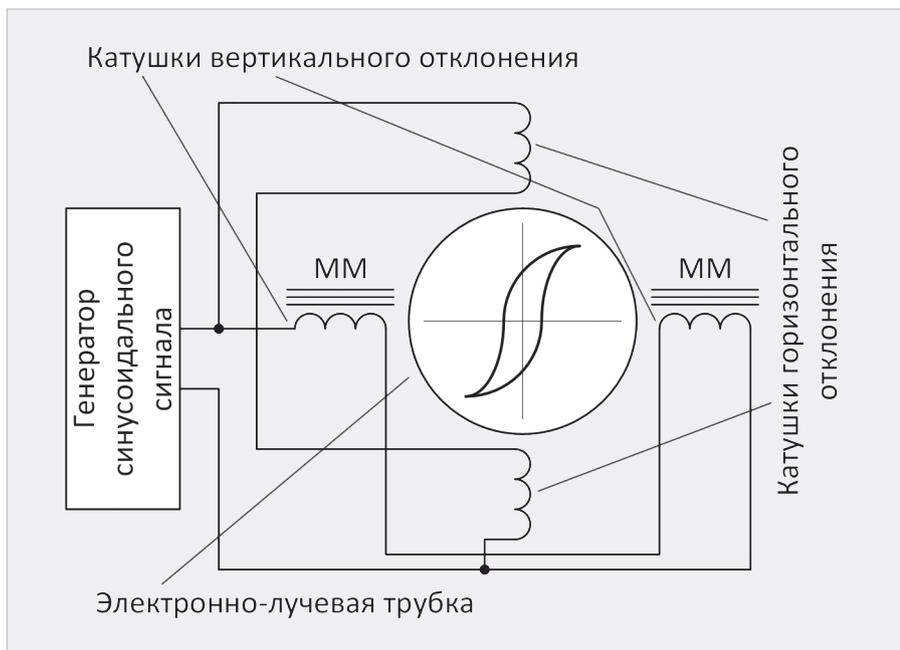


Рис. 3. Схема установки для построения ПГ методом ЭЛТ

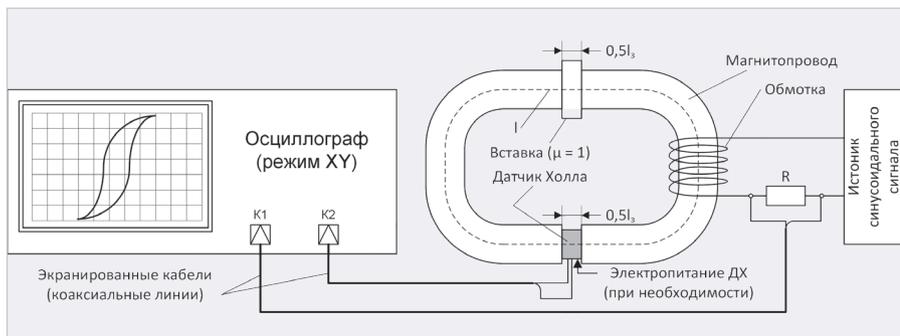


Рис. 4. Схема установки для построения ПГ методом прямого измерения магнитной индукции

**1. Метод электронно-лучевой трубки (ЭЛТ)** основан на зависимости угла отклонения потока электронов от текущего значения магнитной индукции. В схеме на рисунке 3 на вход катушек вертикального и горизонтального отклонения подаётся синусоидальный сигнал некоторой частоты. В отсутствие магнитного материала внутри катушек вертикального отклонения на экране ЭЛТ будет наблюдаться прямая линия с углом наклона в  $45^\circ$  относительно горизонтали, что соответствует отсутствию фазового сдвига между токами, протекающими в катушках вертикального и горизонтального отклонения. Если теперь внутри катушек вертикального отклонения поместить образцы магнитного материала (ММ), то на экране ЭЛТ будет прорисована ПГ, соответствующая текущему режиму его намагничивания.

Описанный метод получения ПГ является классическим, но имеет ряд недостатков, ограничивающих его

использование. Магнитная цепь, образованная катушками вертикального отклонения с помещённым внутрь ММ, является неоднородной, ввиду чего на основе полученной ПГ нельзя непосредственно определить форму кривой Столетова для исследуемого магнитного материала. С учётом того, что силовые линии магнитного поля проходят большей частью в среде с  $\mu = 1$ , расчёт эффективного значения магнитной проницаемости для упомянутой магнитной цепи является нетривиальной задачей, решение которой требует использования численных методов. Ещё одно ограничение в контексте задачи экспериментального определения магнитных характеристик МП обусловлено тем, что форма магнитопроводов, обычно предполагающая замкнутость силовых линий, мало приспособлена для помещения в катушки отклоняющей системы, а деформацию МП, например разгибание их П-образных секций, допустить нельзя.

Таким образом, рассмотренный способ построения ПГ малоприменим для определения магнитных свойств МП.

**2. Метод прямого измерения магнитной индукции** может быть реализован с использованием малогабаритных пассивных и активных датчиков Холла (ДХ) измерительного класса. Схема измерений приведена на рисунке 4. В ней МП обычно имеет два зазора, в один из которых вводится ДХ, ориентированный таким образом, чтобы его магнитная ось совпала с вектором индукции в магнитной цепи. Для намагничивания МП используется выполненная на нём обмотка, через которую пропускается синусоидальный ток, описываемый временной функцией  $i(t)$ . При этом в произвольный момент времени напряжённость магнитного поля  $H(t)$  и напряжение на выходе ДХ  $U_{ДХ}(t)$  пропорциональны  $i(t)$  и  $B(t)$  соответственно, причём функция  $B(t)$  описывает зависимость магнитной индукции от времени. В качестве средства визуализации процесса перемагничивания МП в схему измерений включён осциллограф, работающий в XY-режиме, на его каналы подаются напряжение  $U_R(t)$  с резистора  $R$ , включённого последовательно с обмоткой, и напряжение  $U_{ДХ}(t)$ . Для получения зависимости  $B'(H)$  применяют линейное масштабирование построенных ПГ, коэффициенты которого определяются элементами измерительной установки. Цепи подачи сигналов на каналы осциллографа должны быть выполнены экранированными проводами или коаксиальными кабелями для снижения аддитивных помех в выходном сигнале ДХ.

Важно подчеркнуть, что зависимость  $B'(H)$ , полученная экспериментально с использованием схемы на рисунке 3, будет отличаться от аналогичной для случая, когда МП не имеет зазоров. Наличие зазоров приводит к увеличению магнитного сопротивления и такому перераспределению поля в магнитной цепи, при котором насыщение достигается при значительно большей магнитодвижущей силе. Данный приём широко применяется при проектировании трансформаторов большой мощности [3], позволяя снизить значение  $\mu_{эфф}$ . Таким образом, зависимость  $B'(H)$  будет соответствовать функции  $\mu_{эфф}(H)$ , а не  $\mu(H)$  во введённых ранее обозначениях.

Для получения функции  $\mu(H)$  рассмотрим МП с зазором шириной  $l_3 \ll l$ , где

# Высокая производительность, решение большого круга задач, ТОЧНЫЙ ВЫБОР

Познакомьтесь с новым осциллографом R&S серии RTP (4, 6, 8, 13, 16 ГГц)

- Учет и компенсация цепи измерительного тракта в реальном масштабе времени
- Несколько инструментов в одном приборе
- Компактный размер и бесшумная работа

Осциллограф R&S RTP

Новый стандарт высокоточных измерений



Хотите узнать подробности?

[www.rohde-schwarz.com/ru/rtp](http://www.rohde-schwarz.com/ru/rtp)



**ROHDE & SCHWARZ**

Make ideas real



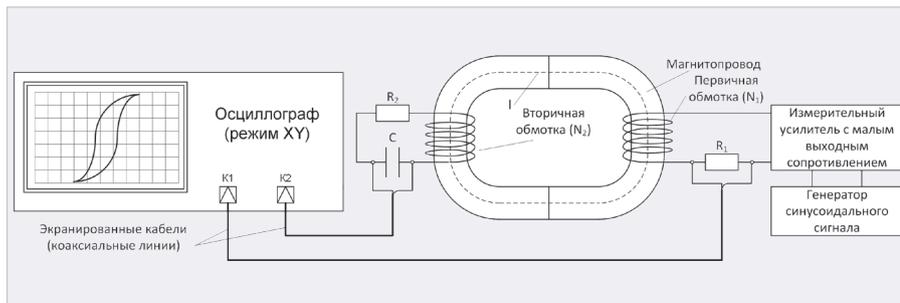


Рис. 5. Схема установки для построения ПГ методом трансформатора

$l$  — средняя длина магнитной цепи. В типовом случае  $l_3/l = 0,001...0,05$  [3], поэтому можно считать, что  $l_3 + l \approx l$ . Ввиду малости размеров зазора также можно считать, что площадь сечения  $S$  магнитной цепи одинакова во всех её точках. Магнитное сопротивление МП без зазора составляет  $R_m = l/(\mu\mu_0S)$ . При наличии зазора в магнитной цепи возникает дополнительное сопротивление  $R_{m,z} = l_3/(\mu_0S)$ , и полное её сопротивление составит:

$$R_{m,\Sigma} = R_m + R_{m,z} = \frac{l}{\mu\mu_0S} + \frac{l_3}{\mu_0S} = \frac{1}{\mu_0S} \left( \frac{l}{\mu} + l_3 \right) = \frac{l}{\mu_0S} \left( \frac{1}{\mu} + \frac{l_3}{l} \right).$$

Отсюда имеем:

$$\frac{1}{\mu_{эфф}} = \frac{1}{\mu} + \frac{l_3}{l},$$

и окончательно:

$$\mu_{эфф} = \frac{\mu}{1 + \mu \cdot (l_3/l)}. \quad (4)$$

Использование установок на основе ДХ в условиях радиолaborаторий более рационально, чем применение ЭЛТ, однако не лишено ряда недостатков помимо рассмотренной необходимости пересчёта. Большинство ДХ измерительного класса не предназначены для работы в магнитных полях с напряжённостью, достигаемой в зазоре МП. Если измерения проводятся для малогабаритных МП, то выполнение условия  $l_3 \ll l$  становится затруднительным. Наконец, введение ДХ в зазор МП требует дополнительной вставки из материала с  $\mu = 1$ , исключаяющей значимое изменение площади сечения магнитной цепи. Эти недостатки полностью устранены в следующем методе построения ПГ.

**3. Метод трансформатора** основан на использовании закона электромагнитной индукции, согласно которому электродвижущая сила, наведённая переменным магнитным полем во вторичной обмотке, пропорциональна производной магнитной индукции по времени [9]. Учитывая это, в схеме

измерений должна использоваться интегрирующая цепь, восстанавливающая зависимость индукции от времени  $B(t)$ . Схема установки представлена на рисунке 5. В ней исследуемый магнитопровод с площадью поперечного сечения  $S$  включён в состав трансформатора, у которого первичная и вторичная обмотки имеют соответственно  $N_1$  и  $N_2$  витков. В цепь первичной обмотки включено сопротивление  $R_1$ , к выходу вторичной обмотки подключена интегрирующая цепь, образованная резистором  $R_2$  и ёмкостью  $C$ .

Магнитодвижущая сила  $M(t)$ , создаваемая током в первичной обмотке, составляет  $M(t) = i_1(t)N_1$ . Учитывая, что магнитное сопротивление замкнутого МП намного меньше, чем свободного пространства, можно считать, что силовые линии магнитного поля полностью находятся внутри объёма МП. Отсюда следует, что:

$$H(t) = M(t)/l = i_1(t)N_1/l = U_{R1}(t)N_1/(lR_1). \quad (5)$$

Создаваемая во вторичной обмотке электродвижущая сила в соответствии с законом электромагнитной индукции с точностью до знака составляет:

$$E(t) = N_2S \frac{dB(t)}{dt}.$$

Номиналы элементов в схеме выбираются так, чтобы для амплитуд напряжений  $U_{C,m}$  и  $U_{R2,m}$  на ёмкости  $C$  и резисторе  $R_2$  выполнялось соотношение  $U_{C,m}/U_{R2,m} \ll 1$ , т.е. для выбранной частоты синусоидального сигнала  $f$  должно выполняться соотношение:  $R_2 \gg 1/(2\pi fC)$ . В этом случае ток во вторичной обмотке  $i_2(t) = E(t)/R_2$ .

В то же время ток  $i_2(t)$  определяет напряжение  $U_C(t)$  на конденсаторе  $C$ . Действительно,  $U_C(t) = q_C(t)/C$ , где  $q_C(t)$  — зависимость заряда на конденсаторе от времени. С другой стороны, по определению  $q_C(t) = \int i_2(t)dt$ . Учитывая изложенное ранее, имеем:

$$U_C(t) = \frac{N_2S}{CR_2} \int \frac{dB(t)}{dt} dt = \frac{N_2S}{CR_2} B(t),$$

откуда:

$$B(t) = \frac{CR_2}{N_2S} U_C(t). \quad (6)$$

Таким образом, функции  $H(t)$  и  $B(t)$ , необходимые для построения семейства ПГ, могут быть определены по результатам измерений с использованием схемы на рисунке 5 при известных характеристиках её элементов.

Метод трансформатора сравнительно легко реализуем в условиях радиолaborатории и не требует использования специализированных средств измерений и оснастки. К его недостаткам следует отнести повышенные требования к чувствительности осциллографа. Кроме того, обычные лабораторные источники сигналов оказываются малоприспособленными для применения в такой схеме из-за падения напряжения на внутреннем сопротивлении. Здесь целесообразно использовать измерительный усилитель с малым выходным сопротивлением для создания достаточно высокой магнитодвижущей силы. Наконец, ещё один недостаток состоит в необходимости намотки весьма большого количества витков, в особенности для испытаний МП значительных габаритов с большим значением  $l$ . Тем не менее среди известных методов построения ПГ последний является универсальным, простым в реализации и потому наиболее распространённым.

Как было показано ранее, характеристики МП определяются на основе семейства ПГ. Ввиду этого для схемы на рисунке 5 целесообразно оценить погрешность измерения  $B(t)$ , определяемую используемыми расчётными приближениями.

### Составляющие погрешности построения ПГ и необходимая чувствительность осциллографа при использовании метода трансформатора

Будем считать, что погрешности, связанные с измерением магнитной индукции по схеме на рисунке 5, обусловлены только принятыми для неё допущениями, позволившими получить расчётные формулы, а номиналы элементов являются достоверно известными. Исходя из этого, можно выделить погрешности расчёта амплитуды тока  $\Delta_r$ , фазового сдвига  $\Delta_\phi$  и интегрирующей цепи  $\Delta_s$ . Оценим их относительные значения, по-прежнему не учитывая явление самоиндукции.

С учётом того, что на ёмкости  $C$  в составе интегрирующей цепи падает некоторое напряжение, фактиче-

ский ток в интегрирующей цепи будет несколько меньше, чем получаемый по представленным до этого формулам. Учитывая, что на выходе вторичной обмотки формируется близкое к синусоидальному напряжению, целесообразно перейти к комплексным амплитудам, сохраняя введённые ранее обозначения. Тогда  $\dot{I}_2 = \dot{E} / R_2$ , а фактический ток  $\dot{I}_{2F} = \dot{E} / (R_2 - j / (2\pi fC))$ . Во всех элементах интегрирующей цепи и во вторичной обмотке протекает один и тот же ток, и для оценки погрешности можно использовать амплитудные значения этих токов. Имеем:

$$\Delta_I = \left| \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_{2F}} \right| - 1 = \left| \frac{\dot{E} R_2 - j / (2\pi fC)}{R_2} \right| - 1 = \sqrt{1 + \frac{1}{4\pi^2 f^2 C^2 R_2^2}} - 1 \approx \frac{1}{8\pi^2 f^2 C^2 R_2^2}.$$

Последнее приближённое равенство в уравнении (7) получено с учётом разложения подкоренного выражения в ряд Макларена в окрестности нуля [10].

Погрешность фазового сдвига обусловлена тем, что ток  $i_2(t)$  и электродвижущая сила  $E(t)$  не являются синхронными по фазе, как это было

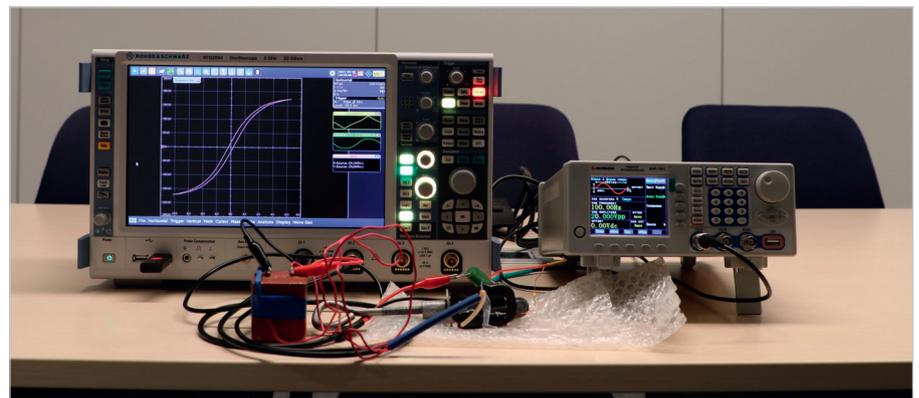


Рис. 6. Фотография измерительной установки для получения семейства ПГ

принято ранее. Разность фаз для них с точностью до знака составляет  $\varphi = \arctg(1 / (2\pi fCR_2))$ , а связанная с ней погрешность  $\Delta_\varphi$  оказывается наибольшей в моменты времени, когда  $E(t) = 0$ , и может быть, учитывая малость значения  $1 / (2\pi fCR_2)$ , определена в относительных единицах как:

$$\Delta_\varphi = \sin(\arctg(1 / (2\pi fCR_2))) \approx 1 / (2\pi fCR_2).$$

Погрешность интегрирующей цепи может быть оценена следующим образом. Если бы цепь  $R_2C$  являлась идеальным интегратором, то для неё

действовало бы строгое равенство, выполнение которого не зависит от напряжения  $U_C(t)$ . Для цепи на рисунке 4 справедливо уравнение:

$$U_C(t) = \frac{1}{C} \int E(t) dt.$$

Используя подход, аналогичный применённому для оценки  $\Delta_I$ , можно показать, что:

$$\Delta_S = 1 - \frac{U_{R,m}}{E_m} = 1 - \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + 1 / (4\pi^2 f^2 C^2)}} = 1 - \frac{\sqrt{4\pi^2 f^2 C^2 R_2^2}}{\sqrt{1 + 4\pi^2 f^2 C^2 R_2^2}} \approx \frac{1}{8\pi^2 f^2 C^2 R_2^2}, \quad (7)$$

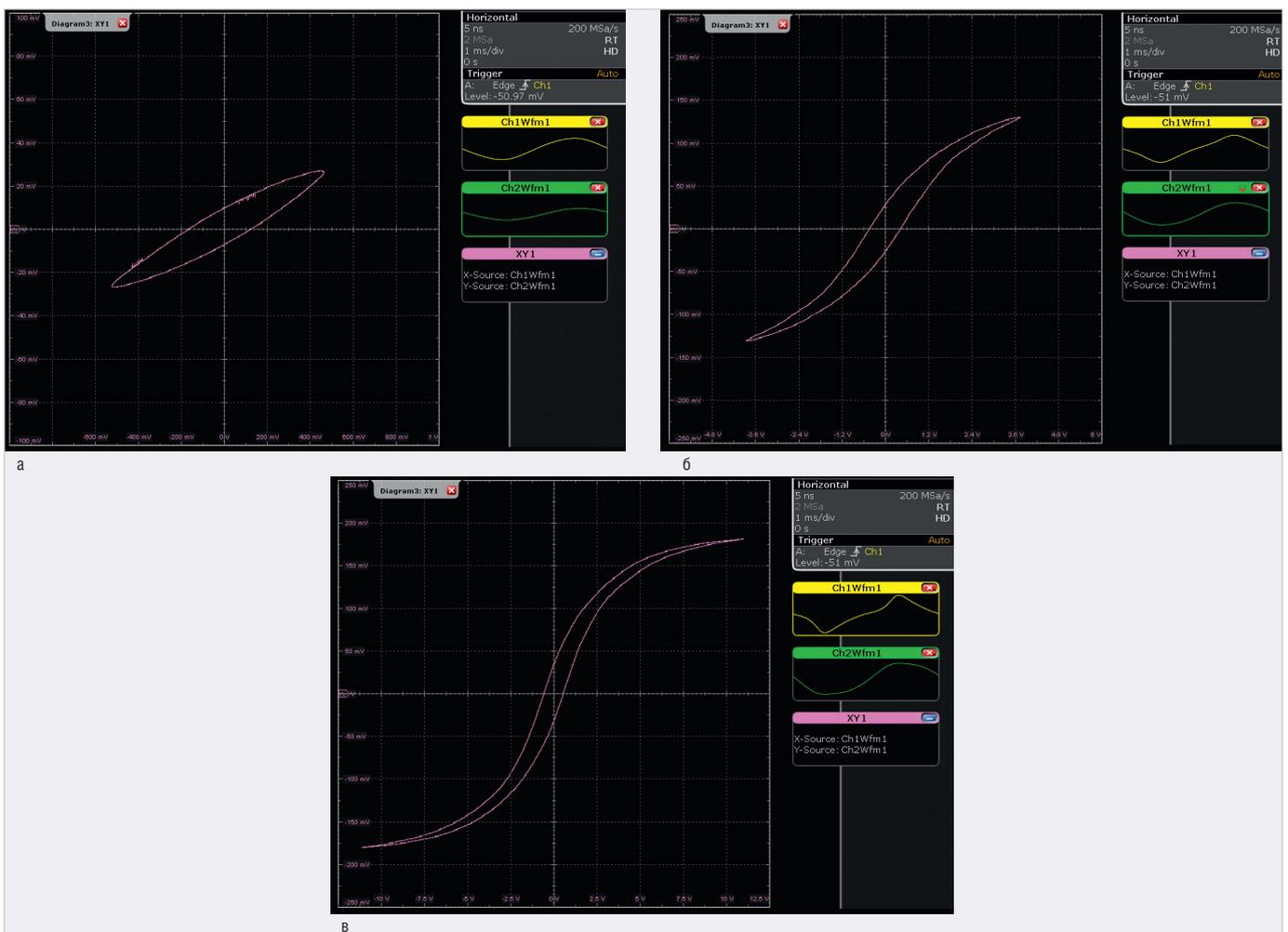


Рис. 7. Результаты измерений по схеме на рис. 5, полученные при выходном напряжении генератора: а) 2 В (п-п); б) 10 В (п-п); в) 17 В (п-п)

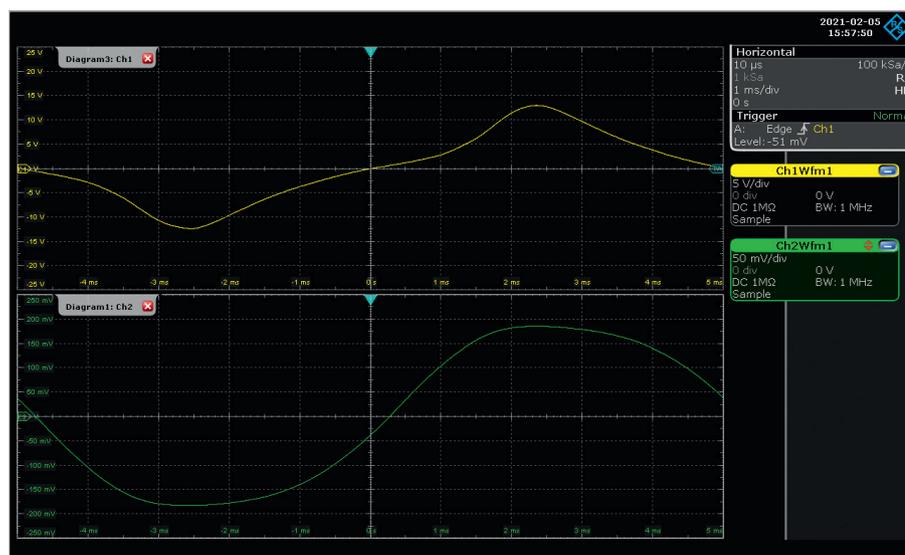


Рис. 8. Осциллограммы напряжений, полученные при выходном напряжении генератора, равном 20 В (п-п)

где  $E_m$  – амплитуда электродвижущей силы на вторичной обмотке.

Для используемой в экспериментальной части статьи установки при  $f = 100$  Гц  $\Delta_1 = \Delta_2 = 0,0124\%$ ,  $\Delta_0 = 0,8\%$ . Отсюда следует, что при известных с достаточной точностью номиналах элементов измерительной установки определяющей является погрешность фазового сдвига. Точность получаемых результатов измерений будет достаточно высокой при использовании качественных осциллографов.

С повышением частоты  $f$ , ёмкости  $C$  и сопротивления  $R_2$  рассмотренные составляющие погрешности уменьшаются, однако при прочих равных условиях повышаются требования к чувствительности используемого осциллографа, поскольку амплитуда напряжения на конденсаторе:

$$U_{C,m} = E_m / \sqrt{1 + 4\pi^2 C^2 R_2^2} \approx E_m / (2\pi f C R_2).$$

Лабораторные генераторы на холстом ходу способны формировать напряжение амплитудой до 10...20 В, но на частотах порядка 50 Гц большая его часть будет падать на выходном сопротивлении генератора. Это ещё один довод в пользу использования усилителей с низким выходным сопротивлением, в т.ч. при использовании метода датчика Холла (см. рис. 4). В типовом случае значение  $E_m \sim 1$  В, и при  $C = 10$  мкФ,  $R_2 = 10$  кОм получим  $U_{C,m} \sim 16$  мВ. Синусоидальный сигнал с такой амплитудой вполне можно наблюдать на современных осциллографах. Повысить напряжение на ёмкости можно и путём увеличения количества витков во вторичной обмотке, но это увеличивает объём и продолжительность подготовительных работ.

Таким образом, при выборе элементов измерительной установки необходимо соблюдать компромисс между точностью измерений и требованиями к чувствительности каналов осциллографа.

### Пример выполнения измерений магнитных характеристик МП

**Объект исследований, измерительное оборудование и оснастка**

В качестве объекта исследования был выбран МП, предназначенный для изготовления малогабаритных трансформаторов и дросселей и имеющий поперечное сечение прямоугольной формы с размерами  $16 \times 7$  мм, т.е.  $S = 1,12 \times 10^{-4}$  м<sup>2</sup>. Средняя длина образованной таким МП магнитной цепи составляла  $l = 0,138$  м. МП образован двумя П-образными половинами с полированными торцами, которые при проведении эксперимента сжимались с минимально необходимым усилием струбциной из дюралюминиевого сплава. На МП было сформировано две обмотки с количеством витков  $N_1 = N_2 = 100$  шт. Схема измерений соответствовала рисунку 5, в ней на основе предварительных оценок были выбраны номиналы элементов  $R_1 = 5$  Ом,  $R_2 = 10$  кОм,  $C = 10$  мкФ. Для формирования намагничивающего тока в первичной обмотке использовался усилитель мощности в составе генератора сигналов АНР-1041 с выходным сопротивлением 2,5 Ом и коэффициентом усиления 1,53. На его вход подавался синусоидальный сигнал с канала А того же генератора, имевший частоту  $f = 100$  Гц. В схеме измерений использовался осциллограф R&S RTO2064 с

четырьмя каналами и полосой рабочих частот до 6 ГГц, каналы 1 и 2 которого подключались в соответствии со схемой на рисунке 5. Фотография измерительной установки представлена на рисунке 6.

### Получение семейства петель гистерезиса

Как отмечалось до этого, ПГ, отражающие зависимость  $B(H)$  в цикле намагничивания, позволяют построить КН и определить функции  $\mu(H)$  и  $\mu_{диф}(H)$ , а также рассчитать удельные потери на перемагничивание.

На рисунке 7 показаны кривые, полученные для выходных напряжений генератора, равных 2; 10 и 17 В (п-п). Важно подчеркнуть, что это ещё не сами ПГ, а их прообраз. Для малой амплитуды намагничивающего поля (см. рис. 7а) ПГ имеет эллиптическую форму, характерную для отсутствия смещений границ доменов. На эюре напряжения в канале 1, показанной в правой части рисунка 7в, хорошо видно, что напряжение на резисторе  $R_1$ , характеризующее ток в первичной обмотке, имеет синусоидальную форму, но вблизи максимумов претерпевает искажения в виде сглаженных выбросов. Это означает, что с приближением тока к области максимальных значений полное сопротивление цепи намагничивания падает, что объясняется уменьшением индуктивности первичной обмотки за счёт снижения  $\mu$  с ростом напряжённости магнитного поля. Более наглядно это видно из осциллограмм на рисунке 8, построенных на периоде изменения выходного сигнала генератора при выходном напряжении 20 В (п-п).

Для получения семейства ПГ экспериментальные данные должны быть масштабированы в соответствии с уравнениями (5), (6). Для осуществления математической обработки результатов измерений выборки, полученные осциллографом, были сохранены на периоде  $T = 1/f = 10$  мс в объёме 1000 шт. на каждый канал. На рисунке 9а совместно показаны те же кривые, что и на рисунке 7, т.е. красная, синяя и чёрная петли построены по результатам измерений для выходных напряжений генератора, равных 2; 10 и 17 В (п-п). На рисунке 9б представлены ПГ в координатах  $H$ - $B$ . Коэффициенты масштабирования для  $H$  и  $B$  составили соответственно 144,93 А/(В·м) и 8,93 Тл/В.

Как видно, за счёт малой длины магнитной цепи максимальная напряжённость магнитного поля и индук-

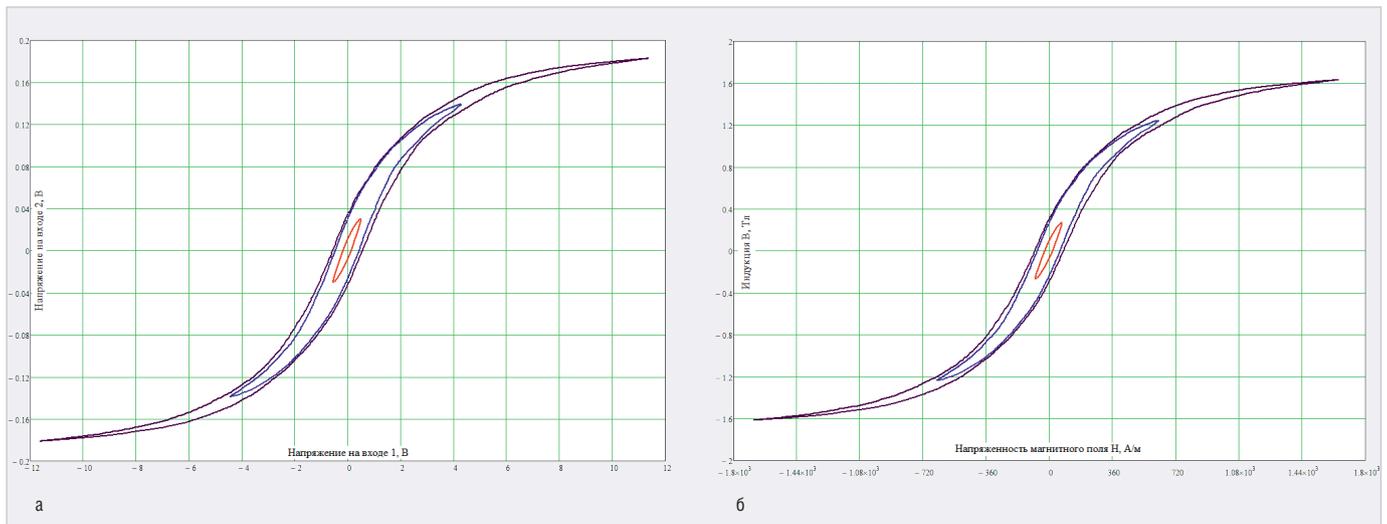


Рис. 9. Кривые, полученные при намагничивании МП полями с разной амплитудой: а) по записанным выборкам; б) по результатам масштабирования (ПГ)

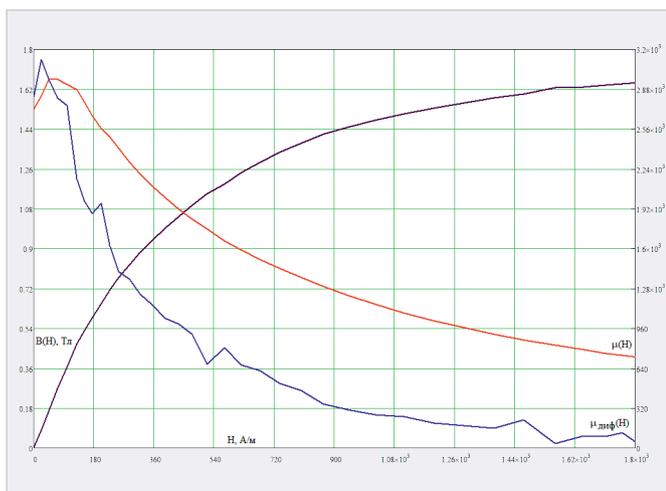


Рис. 10. Зависимости  $B(H)$ ,  $\mu(H)$  и  $\mu_{диф}(H)$ , полученные по результатам обработки экспериментальных данных

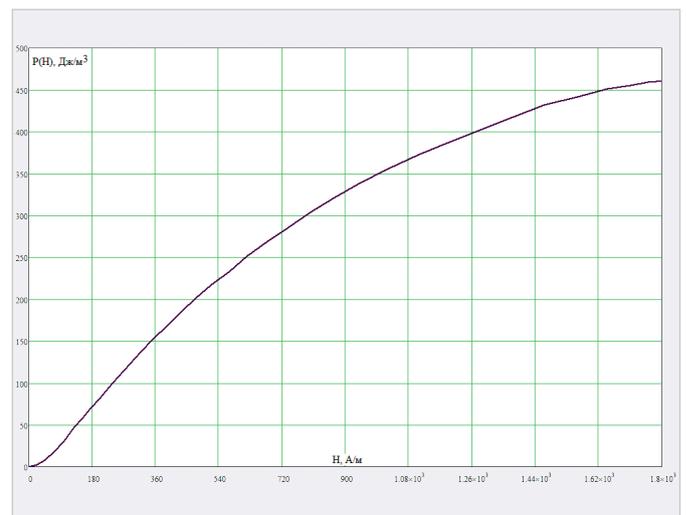


Рис. 11. Зависимость потерь на перемагничивание от напряжённости поля, полученная на основе интегрирования по петлям гистерезиса

ция превосходят 1500 А/м и 1,6 Тл, что достаточно для перехода МП в режим насыщения и исследования сопутствующего уменьшения магнитной проницаемости. При максимальном выходном напряжении генератора, равном 20 В (п-п), эти значения составляют чуть более 1800 А/м и 1,653 Тл.

Для выявления магнитных свойств исследуемого МП описанным образом было получено семейство петель гистерезиса, при этом выходное напряжение генератора изменялось в интервале от 0,7 до 20 В (п-п) с шагом от 0,3 до 0,7 В в зависимости от резкости изменения положения крайних точек петель. Всего было получено 38 массивов данных.

**Определение зависимостей  $B(H)$ ,  $\mu(H)$  и  $\mu_{диф}(H)$**

Определение зависимостей было осуществлено в соответствии с данным ранее формальным определением этих характеристик. В каждом массиве выбо-

рок находились максимальные значения, соответствующие крайней точке ПГ, осуществлялся пересчёт этих значений в индукцию и напряжённость магнитного поля, и затем рассчитывалась магнитная проницаемость  $\mu$ . Дифференциальная магнитная проницаемость определялась по приращениям значений  $H$  и  $B$  при заданных значениях напряжённости магнитного поля.

На рисунке 10 показаны полученные зависимости  $B(H)$ ,  $\mu(H)$  и  $\mu_{диф}(H)$ . Вид кН в целом соответствует её типовой форме, представленной на рисунке 2а. Зависимость  $\mu(H)$  отражает увеличение магнитной проницаемости в области слабых полей и дальнейший её спад при приближении к режиму насыщения, причём  $\mu_n = 2720$ ,  $H_{умax} = 50$  А/м,  $\mu_{max} = 2970$ , а соответствующее значение индукции равно 0,17 Тл. Зависимость  $\mu_{диф}(H)$  имеет локальный максимум  $\mu_{диф} = 3120$  при  $H = 30$  А/м. Полученный график зависимости дифференциаль-

ной магнитной проницаемости имеет изрезанность, которая может быть сглажена скользящим усреднением. В области значений  $H > 1500$  А/м значение  $\mu_{диф} < 130$ , т.е. с приближением к насыщению дифференциальная магнитная проницаемость снижается значительно сильнее, чем функция  $\mu(H)$ .

Зависимости  $\mu(H)$  и  $\mu_{диф}(H)$  в полной мере характеризует проблему так называемого ферромагнитного резонанса [11], которая состоит в следующем. При появлении перенапряжения на входе трансформатора ток в первичной обмотке возрастает, увеличивается напряжённость поля в магнитной цепи, в результате чего резко снижается магнитная проницаемость МП. Это ведёт к снижению индуктивного сопротивления и ещё большему увеличению тока в обмотке, что при неблагоприятной ситуации дополняется явлениями параллельного резонанса. Ферромагнитный резонанс способен за несколь-

ко секунд выводить трансформаторы из строя. Для его незамедлительной блокировки на электроподстанциях применяют специальные автоматические устройства.

Зависимость потерь на перемагничивание от напряжённости магнитного поля, как уже было отмечено, определяется интегралом  $P = \oint HdB$ , который берётся за единичный период цикла намагничивания. Для перехода к классическому интегрированию преобразуем дифференциал как:

$$dB = \frac{dB(t)}{dt} dt,$$

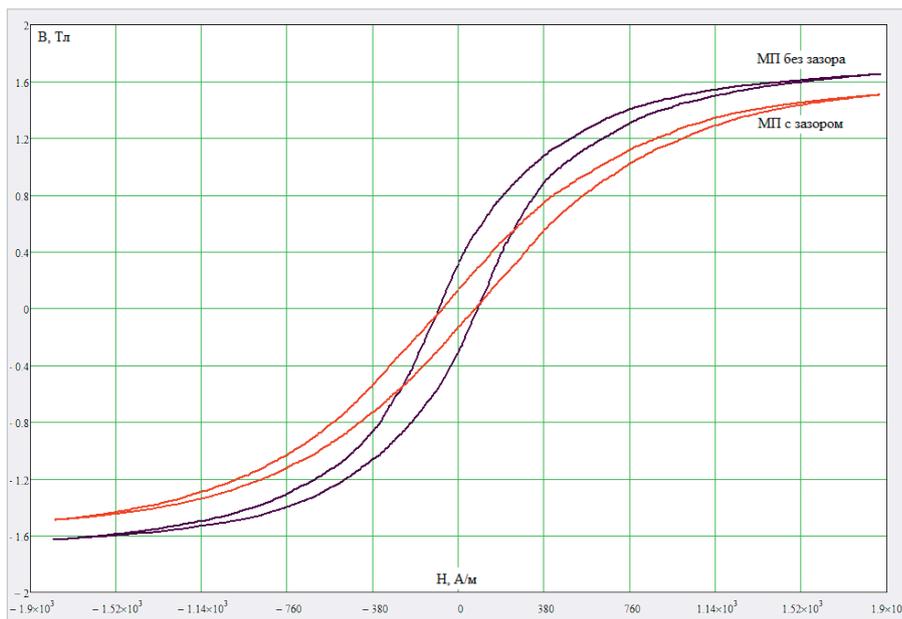
тогда:

$$P = \oint HdB = \int_{-0,5/f}^{0,5/f} H(t) \frac{dB(t)}{dt} dt.$$

По аналогии с рассмотренными зависимостями функция потерь  $P(H)$  была определена для значений  $H$  в интервале от 0 до 1800 А/м. График зависимости  $P(H)$  представлен на рисунке 11, его форма в целом сходна с кривой намагничивания, за исключением области слабых полей (менее 30 А/м), где нарастание потерь с увеличением  $H$  происходит более медленно за счёт отсутствия смещения границ магнитных доменов. С приближением к режиму насыщения возрастание потерь происходит всё медленнее, составляя около 460 Вт/м<sup>3</sup> при  $H = 1800$  А/м.

**Оценка влияния зазора в магнитной цепи на значение эффективной магнитной проницаемости**

Оценка может быть выполнена на основе сравнения петель гистерезиса, построенных для одной и той же амплитуды магнитного поля при наличии и в отсутствие зазора в магнитопроводе. Такие петли гистерезиса совместно приведены на рисунке 12. Для формирования малого зазора постоянного размера использовались прокладки из плёночного фторопласта толщиной 15 мкм, помещённые между П-образными половинами МП при минимально достаточном сжатии струбциной. Экспериментальное значение магнитной проницаемости МП без зазора составляет 701, а при  $l_3 = 30$  мкм – 635. В соответствии с формулой (4) при  $\mu = 701$ ,  $l_3 = 30$  мкм и  $l = 0,138$  м имеем  $\mu_{эфф} = 608$ . Как видим, теоретические и практические результаты вполне соотносятся друг с другом, а небольшое расхождение определяется деформацией прокладки, сопровождающейся уменьшением её толщины.



**Рис.12. Петли гистерезиса, построенные при амплитуде магнитного поля 1870 А/м для МП с зазором малого размера и без зазоров**

Применение МП с зазором широко применяется в силовых трансформаторах для снижения нелинейных искажений и увеличения индукции насыщения. Это позволяет изготавливать такие устройства более компактными и с меньшей массой магнитопровода.

**Заключение**

Таким образом, на основе сравнительно несложных измерений, вполне доступных в условиях радиолоборатории, может быть получена полная информация о характеристиках магнитопроводов, необходимая для проектирования и изготовления обмоточных изделий с их использованием. Измерительная установка не требует применения специфических средств измерений, и совершенно очевидно, что использованный в экспериментальной части работы осциллограф серии R&S RTO обладает несравненно более широкой применимостью.

Основная проблема, которая может сопровождать описанные измерения, состоит в том, что построение семейства ПГ для частот выше промышленной требует применения источников сигналов с большим выходным напряжением из-за роста индуктивности первичной обмотки в схеме на рисунке 4. В некоторых случаях она может быть решена применением в качестве источников питания частотных преобразователей, предназначенных для

управления скоростью вращения электродвигателей, если их выходной сигнал имеет низкий коэффициент гармоник.

**Литература**

1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. В трех частях. – М.: Высшая школа, 1964. 750 с.
2. Сидоров И. Н. Малогабаритные трансформаторы и дроссели. Справочник. – М.: Радио и связь, 1985. 413 с.
3. URL: <https://vpaуаем.ru/> (дата обращения 15.01.2021).
4. Кечиев Л. Н., Акбашиев Б. Б., Степанов П. В. Экранирование технических средств и экранирующие системы. – М.: ООО «Группа ИДТ», 2010. 470 с.
5. Интернет-ресурс <https://lsb-solutios.ru> (дата обращения 18.01.2021).
6. Крутичка С. Физика ферритов и родственных им магнитных окислов. Т. 1. М. Мир, 1976. 353 с.
7. Тареев Б. М., Короткова Н. В., Петров В. М. и др. Электрорадиоматериалы. – М. Высшая школа, 1978. 336 с.
8. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. Учебник. СПб. Лань. 2003. 368 с.
9. Трофимова Т. И. Курс физики. М. Высшая школа. 1990. 479 с.
10. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука. 1974. 832 с.
11. Жежеленко И. В., Короткевич М. А. Электромагнитная совместимость в электрических сетях. Минск. Вышэйшая школа. 2012. 197 с.





ТЕСТПРИБОР

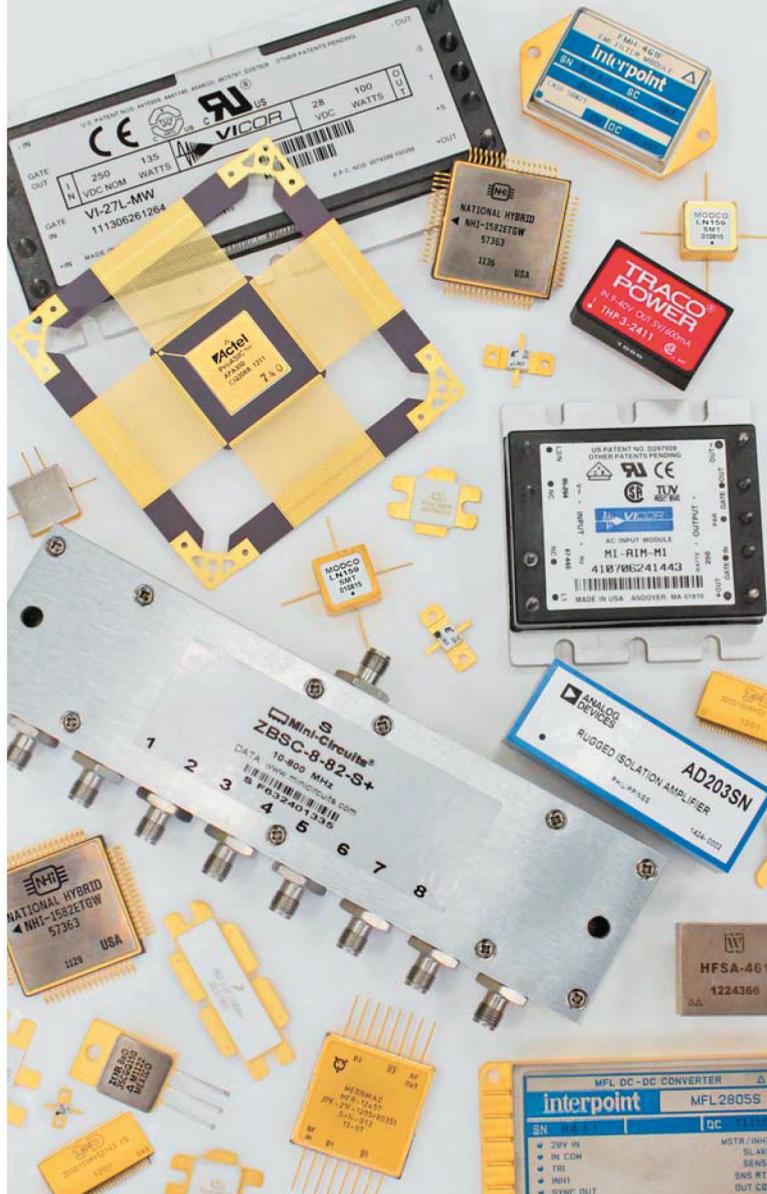


## КОМПЛЕКСНЫЕ ПОСТАВКИ ЭКБ

**ВСЯ ПОСТАВЛЯЕМАЯ  
ПРОДУКЦИЯ ПРОХОДИТ  
«ВХОДНОЙ КОНТРОЛЬ»  
И «ИДЕНТИФИКАЦИЮ»**

АО «ТЕСТПРИБОР» осуществляет комплексные поставки электронных компонентов отечественного и иностранного производства для различного применения классов:

- Industrial,
- Military,
- Space



### ПРОГРАММА ПОСТАВОК

- Микросхемы
- ПЛИС
- СБИС
- Источники питания
- Преобразователи
- Конденсаторы
- Резисторы
- Транзисторы
- Диоды
- Реле
- Переключатели
- Разъемы
- Фильтры
- Атенюаторы
- Ответвители