

КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
ИМ. Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ

ТРУДЫ ВНИИМ
ВЫПУСК 29 (89)

МАШГИЗ 1956

Handwritten signature or name in cursive script, possibly "C. J. ..."



КОМИТЕТ СТАНДАРТОВ, МЕР И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ
ПРИ СОВЕТЕ МИНИСТРОВ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
МЕТРОЛОГИИ имени Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

44 11308

МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ

ТРУДЫ ВНИИМ
ВЫПУСК 29 (89)

*Под редакцией
доктора технических наук профессора Е. Г. ШРАМКОВА*

БИБЛИОТЕКА
Всесоюзного научно-исследова-
тельского института метрологии
имени Д. И. Менделеева



ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
Москва 1956 Ленинград

Сборник содержит ряд статей по методике магнитных измерений. Большая часть работ относится к вопросам измерения магнитных характеристик ферромагнитных материалов в переменных магнитных полях. Сборник рассчитан на работников заводских, научно-исследовательских и вузовских лабораторий, занимающихся физикой магнитных процессов и вопросами, связанными с производством и применением магнитных материалов.

Ответственный редактор директор ВНИИМ
доктор технических наук профессор *В. О. АРУТЮНОВ*

ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ МАШГИЗА

Редакция литературы по конструированию
и эксплуатации машин

Заведующий редакцией инж. *Ф. И. ФЕТИСОВ*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Помещенные в настоящем сборнике статьи содержат результаты работ магнитной лаборатории ВНИИМ и Свердловского филиала ВНИИМ в области магнитных измерений.

В одном из предыдущих сборников трудов ВНИИМ «Магнитные измерения и исследования» вып. 10 (70), 1952 г. помещена статья Е. Г. Шрамкова «Создание магнитного эталона в абсолютных единицах», посвященная работам магнитной лаборатории ВНИИМ по созданию первичного эталона, воспроизводящего единицу напряженности магнитного поля и магнитного потока, в абсолютной мере. Эти работы имели своим результатом создание метрологической основы в области магнитных измерений.

Назначением любого эталона является передача значений единиц образцовым мерам и далее рабочим мерам и приборам, используемым в широкой практике. Таким образом, дальнейшим этапом метрологических работ в этом направлении должна являться разработка научно обоснованной поверочной схемы, устанавливающей порядок передачи верных значений единиц от эталона рабочим мерам и приборам, включающей разработку соответствующих методики и аппаратуры, обеспечивающих требуемую практикой точность передачи значений единиц. Печатаемая в настоящем сборнике статья Е. Г. Шрамкова и Е. Т. Чернышева «Передача значений магнитных единиц от эталонов рабочим мерам» посвящена рассмотрению вопросов, касающихся методов сличения мер напряженности магнитного поля и магнитного потока и измерительных катушек, как образцовых, так и рабочих, а также анализу погрешностей передачи значений магнитных единиц, начиная от верхнего звена поверочной схемы — первичного эталона — до рабочих мер.

В статье Е. Г. Шрамкова и Е. А. Соколовой «Образцовая установка для сличения мер магнитного потока, напряженности магнитного поля и измерительных катушек» содержится описание образцовой установки, разработанной магнитной лабораторией ВНИИМ и изготовленной ленинградским заводом «Эталон», позволяющей производить сличение всех вышеуказанных магнитных мер, используя принятые лабораторией нулевой и разностный баллистические методы измерения. Данная установка, помимо своего основного назначения для метрологических и поверочных учреждений, представляет интерес для широкой практики при текущих поверках магнитных мер.

Статья А. С. Румянцева «Индукционные методы измерения напряженности сильных постоянных магнитных полей» посвящена описанию установки для измерения сильных постоянных магнитных полей (порядка тысяч эрстед), основанной на нулевом индукционном методе и обеспечивающей повышенную точность измерения по сравнению с методом непосредственной оценки.

При оценке магнитных свойств материалов, применяемых в электромагнитных механизмах, работающих на переменном токе, а также при одновременном намагничивании постоянным и переменным токами существенное практическое значение имеет установление определенных характеристик этих материалов. В настоящее время общепринятой точки зрения в этом

отношении нет. Статья Е. Т. Чернышева «Выбор магнитных характеристик при намагничивании ферромагнитных материалов в переменных магнитных полях» и статья Е. Т. Чернышева и Е. Н. Чечуриной «О выборе магнитных характеристик ферромагнитных материалов при одновременном намагничивании постоянным и переменным магнитными полями» посвящены этому вопросу.

Существенным вопросом при испытании ферромагнитных материалов на переменном токе является искажение кривых магнитной индукции и напряженности поля. Анализ этого вопроса посвящена статья Н. Г. Чернышевой «Искажение кривых магнитной индукции и э. д. с.».

Листовые ферромагнитные материалы, как известно, находят весьма широкое применение в электромагнитных механизмах, работающих в условиях переменного намагничивания токами повышенной частоты, в частности звуковой частоты, а также при одновременном намагничивании переменным и постоянным токами.

Метрологические организации должны обеспечивать снабжение заинтересованных лабораторий и учреждений нормальными образцами ферромагнитных материалов с известными магнитными характеристиками при указанных выше условиях намагничивания. Для исследования таких образцов необходимо создание соответствующих образцовых установок, обеспечивающих измерение с требуемой точностью.

Печатаемые в настоящем сборнике статьи Е. Т. Чернышева и Н. Г. Чернышевой «Исследование методики магнитных измерений в области звуковых частот», Е. Н. Чечуриной «Методика определения магнитных характеристик ферромагнитных материалов при одновременном намагничивании постоянным и переменным полями», А. И. Буланова, А. З. Векслера и Н. М. Рудного «Исследование ваттметрового метода измерения потерь при одновременном намагничивании электротехнической стали постоянным и переменным полями» и Н. М. Рудного «Ваттметровый метод измерения потерь на гистерезис и вихревые токи при повышенных частотах» — являются результатом работ по созданию методики и аппаратуры, предназначенных для указанной выше цели.

Результаты этих работ представляют интерес для широкой практики, так как рекомендуемые методика и аппаратура с успехом могут быть использованы и при текущих испытаниях образцов ферромагнитных материалов.

До последнего времени наша промышленность не выпускала низкосинусных ваттметров, необходимых при измерении потерь в образцах листовых магнитных материалов. В связи с проводимыми работами по созданию методики и аппаратуры для измерения потерь потребовалось создать такой ваттметр. Статья Г. К. Яголы и Н. М. Рудного «Высококочувствительный ваттметр для измерения потерь в листовых магнитных материалах» и посвящена вопросам, связанным с разработкой такого ваттметра.

ПЕРЕДАЧА ЗНАЧЕНИЙ МАГНИТНЫХ ЕДИНИЦ ОТ ЭТАЛОНА РАБОЧИМ МЕРАМ

Разработанная магнитной лабораторией ВНИИМ поверочная схема для магнитных мер имеет в своей основе эталонный метод воспроизведения единицы напряженности магнитного поля при помощи прибора, которому присвоено название электромагнитного эталона [1]. С электромагнитным эталоном сличаются рабочие эталоны напряженности магнитного поля, которые, в свою очередь, используются для сличения с ними образцовых катушек напряженности поля.

Электромагнитный эталон, снабженный дополнительно вторичной катушкой, служит рабочим эталоном магнитного потока. Значение магнитного потока сцепления с вторичной катушкой определяется расчетным путем на основании установленной величины напряженности поля катушки электромагнитного эталона, геометрических размеров вторичной катушки и числа ее витков. С рабочим эталоном магнитного потока сличаются образцовые катушки магнитного потока.

Рабочими эталонами напряженности магнитного поля в магнитной лаборатории ВНИИМ служат катушка Н-1 в виде пустотелого цилиндрического соленоида и катушка типа Гельмгольца № 1. В качестве образцовых катушек напряженности поля применяются различные соленоиды. Образцовыми катушками магнитного потока служат катушки Ф-1 и Ф-2 в виде прямолинейного цилиндрического соленоида с вторичной обмоткой и катушки плоской формы с двумя обмотками.

Для мер напряженности магнитного поля требуется определение их постоянной, т. е. величины напряженности магнитного поля при силе тока в обмотке катушки, равной 1 а. Так же и для мер магнитного потока определяется постоянная, представляющая величину полного магнитного потока при силе тока в первичной обмотке, равной 1 а.

В поверочной практике приходится часто иметь дело также с проверкой различных измерительных катушек, т. е. определением их постоянной, равной сумме площадей всех витков. Так как катушки магнитного потока могут рассматриваться и как катушки взаимной индуктивности, то постоянная таких катушек (взаимная индуктивность) может определяться как на постоянном, так и на переменном токах. Однако, имея в виду практическое использование таких катушек при магнитных измерениях и систему передачи значений магнитных единиц от эталонов к рабочим мерам, основанную на использовании постоянных магнитных полей, сличение и поверку этих катушек, так же, как и катушек напряженности поля и измерительных катушек, следует, естественно, производить на постоянном токе.

Применительно к вышеуказанным магнитным мерам, наиболее надежным методом, обеспечивающим наибольшую точность сличений, следует признать индукционный метод с баллистическим гальванометром (баллистический метод) для измерения постоянного во времени магнитного потока.

В этом случае все вышеуказанные сличения основываются на одних и тех же закономерностях.

Положим, что некоторый контур помещен в магнитное поле. Тогда магнитный поток Φ , сцепляющийся с контуром, и напряженность магнитного поля H , при условии однородности поля по всей площади контура, связаны между собой соотношением

$$\Phi = S \mu_0 H,$$

где S — площадь проекции контура на плоскость, перпендикулярную направлению вектора H ;

μ_0 — магнитная постоянная.

Основываясь на этом выражении, мы можем в общем виде написать равенство

$$K_\Phi = K_{изм} \cdot \mu_0 \cdot K_H, \quad (1)$$

где K_Φ и K_H — постоянные катушек магнитного потока и напряженности поля;

$K_{изм}$ — постоянная измерительной катушки.

МЕТОДЫ СЛИЧЕНИЯ МАГНИТНЫХ МЕР

С метрологической точки зрения наиболее точных результатов при сличении следует ожидать в том случае, когда сличаются однородные меры. Применительно к нашей задаче меры магнитного потока должны сличаться

с мерами магнитного потока, а меры напряженности поля с мерами напряженности поля. Проверку измерительных катушек также можно осуществить путем сличения с образцовыми измерительными катушками.

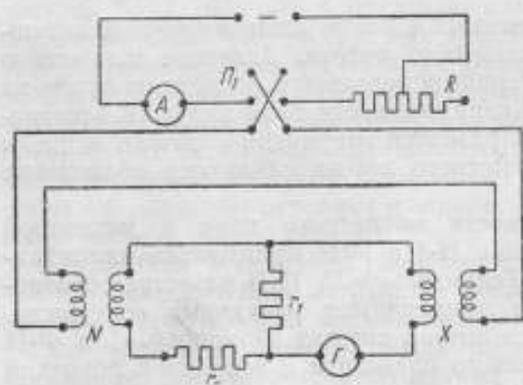


Рис. 1. Принципиальная схема для сличения магнитных мер нулевым баллистическим методом с включением вторичных обмоток в мостовую цепь.

Принятый нами баллистический метод может быть осуществлен в разных вариантах. Имея в виду, в первую очередь, получение наиболее точных результатов, следует применить нулевой или разностный метод. Включение вторичных обмоток сличаемых катушек может быть осуществлено в этих случаях или по одной из мостовых цепей или же навстречу друг другу и последовательно с баллистическим гальванометром.

На рис. 1 изображена одна из возможных мостовых цепей.

Первичные обмотки катушек N и X включаются последовательно в цепь постоянного тока через переключатель P_1 , регулировочный реостат R и амперметр. Вторичные обмотки включаются навстречу друг другу в мостовую цепь с магазинами сопротивления r_1 и r_2 и баллистическим гальванометром G .

При измерении регулируют сопротивления r_1 и r_2 , добиваясь нулевого отклонения гальванометра в момент переключения тока в первичных обмотках катушек. В этом случае количества электричества в цепи гальванометра со стороны катушек N и X равны и мы имеем

$$\frac{K_{\Phi X} l_1 (r_1 + r_2 + r_{\Phi N})}{(r_{\Phi X} + r_1) (r_1 + r_2 + r_{\Phi N}) + r_1 (r_{\Phi N} + r_1)} = \frac{K_{\Phi N} l_1 r_1}{(r_1 + r_{\Phi X} + r_1) (r_{\Phi N} + r_2) + r_1 (r_{\Phi X} + r_1)}, \quad (2)$$

где $K_{\phi N}$ и $K_{\phi X}$ — постоянные сличаемых катушек;
 $r_{\phi N}$ и $r_{\phi X}$ — сопротивления вторичных обмоток этих катушек;
 r_r — сопротивление гальванометра;
 I_1 — сила тока в первичных обмотках катушек.

Из этого уравнения находим

$$K_{\phi X} = K_{\phi N} \frac{r_1}{r_1 + r_2 + r_{\phi N}} \quad (3)$$

Естественно, что равновесие цепи возможно лишь при условии, что $K_{\phi N} > K_{\phi X}$. Хотя в формулу (3) сила тока в первичных обмотках катушек и не входит, однако чувствительность данной цепи, как и любой мостовой цепи, при прочих равных условиях, пропорциональна этой силе тока. Поэтому измерения следует производить при наибольшей допустимой для катушек силе тока.

Одним из недостатков рассмотренного метода является то обстоятельство, что вследствие различия постоянных времени цепей для индуктированных токов, проходящих через гальванометр, вблизи равновесия цепи наблюдается двусторонний импульс. Это приводит к тому, что не удается получить отчетливо нулевого отклонения гальванометра, а следовательно, затрудняются измерения и понижается точность. Как показывает опыт, вследствие указанного явления удается достигнуть равновесия цепи в пределах не меньше 0,2 — 0,3 деления отклонения по шкале гальванометра, имеющего постоянную порядка 500 мкс/мм.

Чтобы избежать неопределенности в результатах измерений вследствие вышеуказанного неполного уравнивания цепи, предлагается измерения производить в два приема. Сначала уравнивают цепь в пределах возможного минимального отклонения гальванометра и по формуле (3) вычисляют величину $K_{\phi X}$. Затем изменить сопротивление r_1 или r_2 , нарушая тем самым равновесие в такой степени, чтобы при выключении или переключении тока в первичных обмотках катушек гальванометр отклонялся на несколько десятков делений по шкале. Вместе с этим величина магнитного потока, соответствующая полученному отклонению, должна быть малой по сравнению с полным потоком сравниваемой катушки (в пределах 1 — 3%).

Далее отсоединяют первичную обмотку катушки N , оставляя в цепи только первичную обмотку катушки X , и при помощи этой катушки обычным путем определяют постоянную гальванометра в единицах магнитного потока. Сопротивления всей вторичной цепи при этом должны оставаться такими же, как и при наблюдении отклонения гальванометра. При вычислении постоянной гальванометра пользуются значением $K_{\phi X}$, найденным при уравниваемой цепи. Окончательно значение $K_{\phi X}$ вычисляют по формуле

$$K_{\phi X} = K_{\phi N} \frac{r_1}{r_1 + r_2 + r_{\phi N}} \pm \frac{C_{\phi} \alpha}{2I_1} \quad (4)$$

где C_{ϕ} — постоянная гальванометра в единицах магнитного потока;

α — отклонение гальванометра при переключении тока I_1 ;

r_1 и r_2 — значения сопротивлений магазинов при неуравновешенной цепи.

Знак плюс или минус в формуле (4) берется в зависимости от того, в каком направлении нарушено равновесие цепи.

В первый член уравнения (4) входит, помимо сопротивлений магазинов, сопротивление $r_{\phi N}$ вторичной обмотки катушки N , а также сопротивления соединительных проводников. Последние могут иметь заметную величину, имея в виду, что по условиям эксперимента сличаемые катушки должны быть достаточно удалены друг от друга. Так как проводники и сопротивление $r_{\phi N}$ медные, то при колебаниях температуры в процессе эксперимента это обстоятельство может вызвать дополнительные погрешности.

Для исключения этих погрешностей предусматривается в процессе эксперимента измерение как сопротивления r_1 , так и суммы сопротивлений $(r_1 + r_2 + r_{\Phi N})$, включая и соединительные проводники.

Сличение катушек магнитного потока нулевым или разностным баллистическим методом может быть осуществлено также и по схеме, изображенной на рис. 2. Вторичные обмотки катушек N и X соединяются между собой навстречу и последовательно с баллистическим гальванометром G . Сопротивления R'_N и R''_N — образцовые; на их зажимах при помощи компенсатора измеряется падение напряжения и вычисляется сила тока в соответствующей цепи. Реостаты R_1 и R_2 служат для регулировки силы тока.

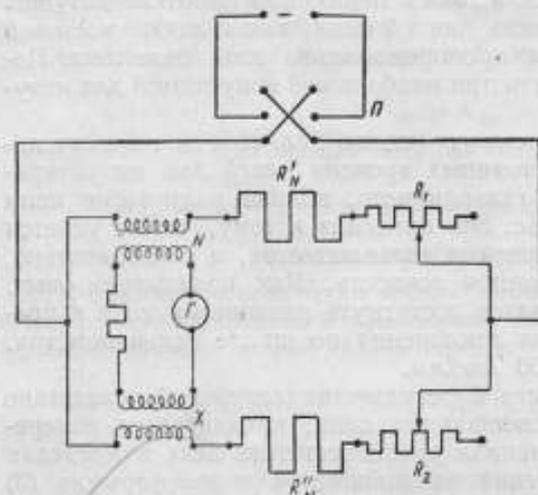


Рис. 2. Принципиальная схема для сличения магнитных мер нулевым баллистическим методом с встречным включением вторичных обмоток.

ное выше явление двустороннего импульса наблюдается в общем случае еще в большей степени.

Описанная цепь может быть использована и при измерениях разностным методом.

Тогда

$$K_{\Phi X} = K_{\Phi N} \frac{\Delta I_N}{\Delta I_X} + \frac{C_{\Phi 2}}{\Delta I_X}. \quad (6)$$

Анализ погрешностей показывает, что обе рассмотренные цепи в отношении точности практически равноценны, однако измерения по последней, как показывает опыт, менее надежны. В процессе измерения требуется непрерывно изменять токи, а по достижении равновесия токи должны поддерживаться строго неизменными, чтобы можно было их измерить компенсатором с требуемой точностью. Практически это отнимает много времени и трудно осуществимо. Кроме того, требуются обязательно два наблюдателя. Эти соображения послужили основанием к тому, чтобы предпочесть цепь, изображенную на рис. 1.

При сличении магнитных мер, у которых номинальные значения постоянных одинаковы или весьма мало отличаются (в пределах $1 \div 3\%$), баллистический разностный метод с включением первичных обмоток последовательно, а вторичных обмоток — навстречу и последовательно с баллистическим гальванометром (рис. 3) является более простым и обеспечивает не меньшую, а в некоторых случаях и большую точность, чем при использовании схемы рис. 1.

Устанавливая соответствующие значения токов в первичных цепях катушек, добиваются нулевого отклонения гальванометра в момент переключения или выключения токов переключателем Π . При сличении двух катушек магнитного потока имеем

$$K_{\Phi X} = K_{\Phi N} \frac{\Delta I_N}{\Delta I_X}, \quad (5)$$

где ΔI_X и ΔI_N — изменения силы тока в первичных обмотках катушек X и N .

Следует учесть, что при измерениях и по этой схеме вблизи равновесия цепи отмеченное выше явление двустороннего импульса наблюдается в общем случае еще в большей степени.

Переключая направление тока или выключая его, наблюдают отклонение гальванометра G . В этом случае

$$K_{\Phi X} = K_{\Phi N} \pm \frac{C_{\Phi^2}}{\Delta I_1}, \quad (7)$$

где ΔI_1 — изменение силы тока в первичных обмотках катушек.

Как уже указывалось [см. формулу (1)], баллистический метод позволяет осуществлять сличения также и катушек напряженности поля. Это касается как сличения рабочего эталона напряженности поля с первичным эталоном, так и образцовых катушек напряженности поля с рабочим эталоном и рабочих катушек с образцовыми. При этом каждая из сличаемых катушек должна снабжаться измерительной катушкой.

Сопоставляя формулы (1) и (3), получим следующее выражение, связывающее постоянные сличаемых катушек,

$$K_{HX} = K_{HN} \frac{K_{swN}}{K_{swX}} \cdot \frac{r_1}{r_1 + r_2 + r_N}, \quad (8)$$

при условии, что

$$K_{HN} \cdot K_{swN} > K_{HX} \cdot K_{swX}$$

где K_{swX} и K_{swN} — постоянные измерительных катушек;

r_N — сопротивление измерительной катушки, имеющей постоянную K_{swN} .

Из формулы (8) видно, что погрешность определения K_{HX} будет больше, чем погрешность определения постоянной катушки магнитного потока [формула (3)], так как в данном случае добавляются погрешности значений K_{swN} и K_{swX} .

Чтобы исключить погрешности, связанные с постоянными измерительных катушек, можно применить метод двойного уравнивания цепи, меняя местами измерительные катушки в сличаемых катушках напряженности поля. На основании результатов этих двух измерений можем написать соотношение

$$K_{HX} = K_{HN} \cdot \sqrt{\frac{r_1 \cdot r'_1}{(r_1 + r_2 + r_N)(r'_1 + r'_2 + r_X)}}, \quad (9)$$

где r'_1 и r'_2 — значения сопротивлений магазинов при втором уравнивании цепи;

r_X — сопротивление измерительной катушки, имеющей постоянную K_{swX} .

Возможен также и другой вариант экспериментов при сличении катушек напряженности поля, заключающийся в следующем. В каждую из сличаемых катушек помещают поочередно одну и ту же измерительную катушку, постоянная и геометрические размеры которой должны находиться в соответствии с параметрами сличаемых катушек. В таком сочетании катушки напряженности поля с измерительной катушкой по схеме рис. 1 производятся сличения с некоторой мерой магнитного потока. Проведя таким образом два уравнивания цепи, будем иметь

$$K_{HX} = K_{HN} \frac{r'_1}{r'_1 + r'_2 + r_{swN}} \cdot \frac{r_1 + r_2 + r_{swN}}{r_1}, \quad (10)$$

где r_{swN} — сопротивление измерительной катушки.

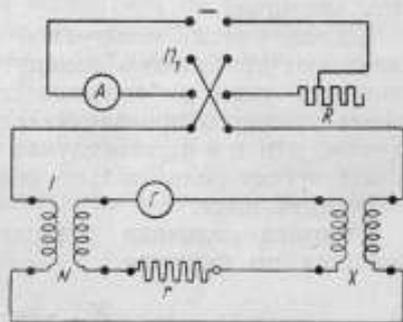


Рис. 3. Принципиальная схема для сличения магнитных мер разностным баллистическим методом.

Сравнивая формулы (9) и (10), видим, что в последнем случае погрешность будет в два раза больше, если не учитывать погрешность постоянной $K_{\text{ИИИ}}$.

При определении постоянной измерительных катушек наиболее надежным методом в смысле точности получаемых результатов следует считать также нулевой баллистический метод, осуществляемый следующим образом. Испытуемая измерительная катушка, соединенная последовательно с образцовой измерительной катушкой и баллистическим гальванометром, помещается в однородное поле некоторой катушки напряженности поля и в таком сочетании сличается с мерой магнитного потока по схеме рис. 1. В данном случае обозначение N относится к мере магнитного потока, а X — к катушке напряженности поля с помещенной в нее испытуемой измерительной катушкой.

Далее, вместо испытуемой катушки, в катушку напряженности поля помещают образцовую измерительную катушку, которая в первом опыте являлась лишь добавочным сопротивлением в цепи гальванометра, и в таком сочетании производят сличение с той же самой мерой магнитного потока, что и в первом случае. Испытуемая измерительная катушка в этом опыте играет роль только сопротивления, находясь вне сферы действия магнитного поля.

Искомая величина постоянной измерительной катушки $K_{\text{ИИИ}X}$ определяется по формуле

$$K_{\text{ИИИ}X} = \frac{r_1(r_1' + r_2' + r_N)}{r_1'(r_1 + r_2 + r_N)} K_{\text{ИИИ}N}, \quad (11)$$

где r_1 , r_2 и r_1' , r_2' — сопротивления, согласно рис. 1, при двух уравновешиваниях цепи;

r_N — сопротивление вторичной обмотки меры магнитного потока.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ

Сличение образцовых мер магнитного потока

Сличение образцовых мер магнитного потока с рабочим эталоном магнитного потока производится во ВНИИМ с использованием вышеописанной мостовой измерительной цепи (рис. 1). Как это отмечалось выше, полного уравновешивания цепи в общем случае не удается получить, и поэтому для оценки погрешности определения постоянной $K_{\text{Ф}X}$ образцовой меры можно воспользоваться формулой (4), в которой α — остаточное отклонение, соответствующее неполной компенсации. Тогда для наибольшей относительной погрешности будем иметь

$$\frac{\Delta K_{\text{Ф}X}}{K_{\text{Ф}X}} = \frac{\Delta K_{\text{Ф}N}}{K_{\text{Ф}N}} + \frac{\Delta r_1}{r_1} + \frac{\Delta(r_1 + r_2 + r_{\text{Ф}N})}{r_1 + r_2 + r_{\text{Ф}N}} + \frac{\partial \Delta C_{\text{Ф}}}{2I_1 K_{\text{Ф}X}} + \frac{C_{\text{Ф}} \Delta \alpha}{2I_1 K_{\text{Ф}X}} + \frac{C_{\text{Ф}} \Delta I_1}{2I_1^2 K_{\text{Ф}X}} + \partial S_{\text{Ф}}, \quad (12)$$

где $\partial S_{\text{Ф}}$ — погрешность, обусловленная ограниченной чувствительностью измерительной цепи.

Имеется в виду, что в процессе сличения измеряется как сопротивление r_1 , так и суммарное сопротивление ($r_1 + r_2 + r_{\text{Ф}N}$). Относительная погрешность измерения сопротивления оценивается нами в 0,02%.

Постоянная гальванометра $C_{\text{Ф}}$, определяемая в данном случае с помощью рабочего эталона, вычисляется по известной формуле

$$C_{\text{Ф}} = \frac{K_{\text{Ф}N} I_0}{\alpha_0},$$

где I_0 — ток в первичной обмотке эталона;
 α_0 — отклонение гальванометра.

Полагая погрешность в измерении силы тока равной 0,4% (амперметром класса 0,2), погрешность в определении $\alpha_0 = 0,2\%$ (0,2 деления при 100 делениях) и пренебрегая погрешностью в $K_{\phi N}$, как незначительной по сравнению с остальными погрешностями, получим $\frac{\Delta C_{\phi}}{C_{\phi}} = 0,6\%$, а абсолютную погрешность $-\Delta C_{\phi} = 3 \text{ мкс/дел}$ (для гальванометра с постоянной $C_{\phi} = 500 \text{ мкс/дел}$).

Погрешность в измерении силы тока I_1 оценивается той же величиной, что и при определении постоянной гальванометра, т. е. $\frac{\Delta I_1}{I_1} = 0,4\%$, а $\Delta I_1 = 0,004a$ при $I_1 = 1a$.

Относительные погрешности, выражаемые четвертым, пятым и шестым членами уравнения (12), при $K_{\phi X} = 10^6 \text{ мкс/а}$, оцениваются соответственно величинами 0,0008, 0,005 и 0,0005%, принимая остаточное отклонение $\alpha = 5$ делениям и $\Delta \alpha = 0,2$ деления.

Погрешность δS_{ϕ} , зависящая от чувствительности измерительной цепи и величин сличаемых потоков, в нашем случае оценивается в 0,01—0,02%.

Суммируя все составляющие погрешности, получим для наибольшей относительной погрешности определения постоянной образцовой меры магнитного потока

$$\frac{\Delta K_{\phi X}}{K_{\phi X}} = 0,06\%$$

и для вероятной относительной¹ порядка 0,04%, если не учитывать погрешность воспроизведения единицы магнитного потока эталоном.

Сличение рабочих мер магнитного потока

В тех случаях, когда сличение рабочих мер с образцовой мерой магнитного потока производится тем же баллистическим методом и с такой же аппаратурой, что и сличение образцовых мер, наибольшая погрешность определения постоянной поверяемой рабочей меры будет оцениваться величиной 0,12%, а вероятная относительная — порядка 0,07%.

При сличении же мер по схеме рис. 3 выражение для наибольшей относительной погрешности, основываясь на уравнении (7), будет иметь вид

$$\frac{\Delta K_{\phi X}}{K_{\phi X}} = \frac{\Delta K_{\phi N}}{K_{\phi N}} + \frac{\alpha \Delta C_{\phi}}{K_{\phi X} 2I_1} + \frac{C_{\phi} \Delta I_1}{K_{\phi X} 2I_1} + \frac{C_{\phi} \Delta I_1}{2K_{\phi X} I_1^2}$$

Предполагается, что наблюдения производятся при переключении тока I_1 .

В табл. 1 приведены значения наибольших относительных погрешностей, рассчитанных применительно к сличению мер, имеющих номинальную

Таблица 1

Расхождение действительных значений постоянных сличаемых мер, %	Наибольшая погрешность при переходе от образцовой меры к рабочей, %	Вероятная относительная погрешность при переходе от образцовой меры к рабочей, %	Наибольшая погрешность рабочей меры с учетом погрешности образцовой меры, %	Вероятная относительная погрешность рабочей меры с учетом погрешности образцовой меры, %
0,01	0,010	0,01	0,070	0,05
0,1	0,015	0,01	0,075	0,05
1,0	0,056	0,04	0,116	0,08
10,0	0,470	0,40	0,530	0,44

¹ Здесь и в дальнейшем имеется в виду погрешность, определяемая по правилам, относящимся к косвенным измерениям.

Таблица 2

№ сличений	Значение постоянной образцовой меры, $\frac{мкс}{а}$	Примечание
1	1 000 340	Наибольшее отклонение от среднего значения 0,022%, Среднее квадратичное 0,006%.
2	1 000 180	
3	1 000 244	
4	1 000 275	
5	1 000 265	
6	1 000 283	
7	1 000 400	
8	1 000 274	
9	1 000 323	
10	1 000 274	
Среднее	1 000 300	

Таблица 3

№ сличений	Месяц и год сличения	Наблюдатель	Максимальный разброс значений постоянной рабочей меры потока при данном сличении, %
1	IX—1948 г.	А	0,01
2	IX—1948 г.	А	0,01
3	IX—1948 г.	А	0,05
4	IX—1948 г.	А	0,05
5	IX—1948 г.	А	0,03
6	IX—1948 г.	А	0,02
7	IX—1948 г.	А	0,01
8	VIII—1950 г.	А	0,01
9	VIII—1950 г.	А	0,02
10	VIII—1950 г.	А	0,02
11	VIII—1950 г.	А	0,03
12	VIII—1950 г.	А	0,05
13	XII—1947 г.	Б	0,01
14	IX—1948 г.	Б	0,01
15	II—1949 г.	Б	0,02
16	II—1949 г.	Б	0,01

постоянную 10^6 мкс/а, в зависимости от расхождения действительных значений постоянных этих мер. При этих расчетах принимались следующие величины абсолютных погрешностей: $\Delta C_{\Phi} = 3$ мкс, (при $C_{\Phi} = 500$ мкс/дел), $\Delta \alpha = 0,2$ дел. (при $\alpha = 100$ дел.), $\Delta I_1 = 0,004$ а (при $I_1 = 1$ а).

Таким образом, чтобы обеспечить требуемую практикой погрешность не больше 0,1%, необходимо нормировать изготовление образцовых и рабочих мер магнитного потока с допустимым отклонением постоянной от номинального значения не больше чем в 1%.

В качестве иллюстрации приводятся результаты, полученные в магнитной лаборатории ВНИИМ, по сличению образцовой меры магнитного потока № 3 с рабочим эталоном потока баллистическим нулевым методом по

схеме рис. 1 (табл. 2) и по сличениям различных рабочих мер магнитного потока с номинальным значением постоянной 10^6 мкс/а с образцовой мерой нулевым методом встречного включения (схема рис. 3), проводившимся различными наблюдателями в разное время (табл. 3).

Как следует из табл. 3, расхождения при каждом данном сличении не превосходят 0,05%.

Сличение рабочих эталонов напряженности поля с первичным эталоном

В результате эталонирования абсолютным методом определяется значение постоянной катушки напряженности магнитного поля, входящей в электромагнитный эталон [1]. Эта постоянная, дающая напряженность поля при единице силы тока в обмотке катушки, и является той величиной, от которой единица напряженности поля может быть передана нижестоящим мерам. Точность воспроизведения единицы напряженности магнитного поля первичным эталоном оценивается в 0,01%.

Сличение рабочих эталонов напряженности магнитного поля проводится по схеме баллистического нулевого метода (рис. 1). В центре катушки электромагнитного эталона помещается цилиндрическая измерительная катушка с однослойной обмоткой, постоянная которой определяется расчетом по ее геометрическим размерам и числу витков. Измерительная катушка с расчетной постоянной помещается также и в сличаемый рабочий эталон напряженности поля. При достаточно точном изготовлении цилиндрической поверхности (2—3 м) и обмотке голой тонкой проволокой (диаметр около 0,05 мм) можно добиться достаточно высокой точности при расчете постоянной измерительной катушки. Данные, которыми в этом отношении располагает магнитная лаборатория ВНИИМ, приводятся в табл. 4.

Наиболее трудно выполняемыми являются измерительные катушки или с очень большим или с очень малым значением постоянной.

Постоянная рабочего эталона на основании результатов сличения вычисляется по формуле (8):

$$K_{HX} = K_{HN} \frac{K_{swN}}{K_{swX}} \cdot \frac{r_1}{r_1 + r_2 + r_N}$$

где в данном случае K_{HX} — постоянная рабочего эталона;

K_{HN} — постоянная первичного эталона;

K_{swX} — постоянная измерительной катушки в рабочем эталоне;

K_{swN} — постоянная измерительной катушки в первичном эталоне.

Для наибольшей относительной погрешности определения K_{HX} , пренебрегая погрешностью первичного эталона, получим выражение

$$\frac{\Delta K_{HX}}{K_{HX}} = \frac{\Delta K_{swN}}{K_{swN}} + \frac{\Delta K_{swX}}{K_{swX}} + \frac{\Delta r_1}{r_1} + \frac{\Delta(r_1 + r_2 + r_N)}{r_1 + r_2 + r_N} + \frac{\alpha}{I_1 K_{HX}} \cdot \frac{\Delta C_\Phi}{K_{swX}} +$$

$$+ \frac{C_\Phi}{K_{HX} I_1} \cdot \frac{\Delta \alpha}{K_{swX}} + \frac{C_\Phi^2}{K_{HX} \cdot I_1} \cdot \frac{\Delta I_1}{K_{swX}} + \frac{C_\Phi^2}{I_1} \cdot \frac{\Delta K_{swX}}{K_{swX} \cdot K_{HX}} + \theta_H$$

где θ_H — погрешность, вызываемая ограниченной чувствительностью измерительной цепи.

Таблица 4

Значение постоянной измерительных катушек, см ²	Наибольшая относительная погрешность в определении постоянной по расчету, %
10 000	Около 0,03
8 000	• 0,02
7 000	• 0,02
1 000	• 0,04
500	• 0,05
150	• 0,06

Подсчет показывает, что наибольшая погрешность имеет величину порядка 0,12%, а вероятная относительная — порядка 0,05%, при

$$\frac{\Delta K_{zwN}}{K_{zwN}} = \frac{\Delta K_{zwX}}{K_{zwX}} = 0,03\%$$

$$\frac{\Delta r_1}{r_1} = \frac{\Delta(r_1 + r_2 + r_N)}{r_1 + r_2 + r_N} = 0,02\%; \Delta I_1 = 0,012a \text{ (при } I_1 = 3a);$$

$$\Delta C_\Phi = 3 \text{ мкс/дел (при } C_\Phi = 500 \text{ мкс/дел), } K_{H\lambda} = 5 \text{ э/а,}$$

$$\vartheta_H = 0,02\%; \alpha = 5 \text{ дел.; } \Delta\alpha = 0,2 \text{ дел.}$$

Относительно большая величина погрешности определяется недостаточной чувствительностью измерительной цепи и для повышения точности требуется увеличение K_{zwN} или силы тока, что практически является

Таблица 5

№ измерения	Значение постоянной рабочего эталона, э/а	Примечание
1	0,40509	Средняя квадратичная погрешность 0,036%
2	0,40513	
3	0,40505	
4	0,40507	
5	0,40510	
6	0,40507	
7	0,40512	
8	0,40508	
9	0,40511	
10	0,40512	
Среднее	0,40509	

трудно выполнимым. При достижении даже полной компенсации или точнее компенсации, доведенной до отклонения гальванометра, определяемого разрешающей способностью глаза (баллистический импульс в 0,1 дел.), мы можем теоретически снизить вероятную погрешность до 0,08%. Это последнее условие также трудно выполнимо из-за наличия различных постоянных времени и появления двойного импульса. Некоторое повышение точности до величины порядка нескольких сотых процента может быть достигнуто путем увеличения числа измерений.

Результаты сличений рабочего эталона (катушка Н-1) с первичным эталоном иллюстрируются данными одной серии измерений в табл. 5.

Данные таблицы показывают, что наибольшее отклонение от среднего составляет величину порядка 0,01%. Дальнейшее повышение точности может быть достигнуто, если проводить сличение описанным выше методом с двумя уравновешиваниями цепи [формулы (9) и (10)].

Сличение образцовых мер напряженности поля с рабочими эталонами

Проводя сличение образцовых мер тем же методом, что и сличение рабочих эталонов, мы накопим еще такую же погрешность, и, следовательно, наибольшая погрешность возрастет до 0,24%, а вероятная относительная — до 0,08%, если не применять метода двойного уравновешивания.

Сличение рабочих мер напряженности поля с образцовыми

Сличение рабочих мер напряженности поля, проводимое таким же нулевым методом, для единичного измерения дает погрешность, превышающую 0,5%. При достаточно большом числе измерений можно добиться получения погрешности в 0,2—0,3%.

До последнего времени рабочие меры напряженности магнитного поля поверялись не нулевым, а баллистическим методом непосредственной оценки.

Этот метод заключался в определении постоянной поверяемой меры K_H при помощи образцовой меры магнитного потока, которая служит для градуировки баллистического гальванометра, образцовой измерительной катушки с известной постоянной K_{swN} и амперметра класса 0,2.

Искомая постоянная в этом случае рассчитывается по формулам:

$$K_H = \frac{C_\Phi^2}{2IK_{swN}}; \quad C_\Phi = K_\Phi \frac{I_0}{\alpha_0},$$

где I — сила тока при измерениях (переключение тока);

I_0 — сила тока при градуировке гальванометра (выключение тока);

K_Φ — постоянная образцовой меры магнитного потока.

Выражение для наибольшей погрешности определения C_Φ будет иметь вид:

$$\frac{\Delta C_\Phi}{C_\Phi} = \frac{\Delta K_\Phi}{K_\Phi} + \frac{\Delta I_0}{I_0} + \frac{\Delta \alpha_0}{\alpha_0}.$$

Полагая относительные погрешности для K_Φ — 0,1%, для I_0 — 0,4% и α_0 — 0,2%, получим наибольшую погрешность в определении C_Φ равной 0,7%.

Опыт магнитной лаборатории ВНИИМ показывает, что погрешность определения C_Φ может быть оценена в 0,2—0,3%, если, как это принято в лаборатории, проводится серия из десяти измерений и принимается среднее значение.

Для наибольшей погрешности определения величины K_H имеем

$$\frac{\Delta K_H}{K_H} = \frac{\Delta C_\Phi}{C_\Phi} + \frac{\Delta \alpha}{\alpha} + \frac{\Delta K_{swN}}{K_{swN}} + \frac{\Delta I}{I}.$$

Подставляя ранее принятые значения для составляющих погрешностей, получим для $\frac{\Delta K_H}{K_H}$ значение наибольшей погрешности порядка 1% и для повышения точности совершенно неизбежно многократное повторение измерений.

Анализ большого экспериментального материала, имеющегося в магнитной лаборатории ВНИИМ по поверкам различного рода катушек напряженности поля методом непосредственной оценки, подтверждает, что для единичного измерения погрешность имеет величину, доходящую до 1%, а в отдельных случаях даже несколько больше.

При многократных же наблюдениях, когда за результат принимается среднее значение, эта погрешность снижается до величины порядка 0,5%. Покажем это на двух примерах. Для катушки № 18595, исследованной в 1948 и 1951 гг., значение постоянной оказалось соответственно равным 74,5₄ и 74,3₀, что дает расхождение в 0,2%, а для катушки № 5731, исследованной в 1937 и 1944 гг., значения постоянной — 94,7₈ и 94,2₀, что дает расхождение в 0,5%.

Рассмотрение вопроса о проверке рабочих мер напряженности магнитного поля указывает на необходимость отказаться от проверки баллистическим методом непосредственной оценки для случаев, когда погрешность не должна превосходить 0,5%, и применять нулевой метод.

Поверка измерительных катушек

Если не требуется высокая точность, поверка рабочих измерительных катушек может производиться баллистическим методом непосредственной оценки, опираясь на образцовые меры магнитного потока и напряженности магнитного поля.

Постоянная измерительной катушки K_{sw} в этом случае рассчитывается по формуле:

$$K_{sw} = \frac{C_{\phi} \alpha}{2K_{II} I}$$

Выражение для наибольшей относительной погрешности определения K_{sw} будет иметь вид:

$$\frac{\Delta K_{sw}}{K_{sw}} = \frac{\Delta C_{\phi}}{C_{\phi}} + \frac{\Delta \alpha}{\alpha} + \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta K_{II}}{K_{II}}$$

Принимая, что $\frac{\Delta C_{\phi}}{C_{\phi}} = 0,3\%$, $\frac{\Delta \alpha}{\alpha} = 0,2\%$, $\frac{\Delta I}{I} = 0,4\%$ и $\frac{\Delta K_{II}}{K_{II}} = 0,1\%$, получим, что величина наибольшей погрешности определения K_{sw} окажется равной 1%.

Когда же требуется более высокая точность, проверка осуществляется нулевым баллистическим методом (см. стр. 10). В этом случае выражение для наибольшей погрешности, основываясь на формуле (11), будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta K_{swX}}{K_{swX}} \approx & \frac{\Delta r_1}{r_1} + \frac{\Delta r'_1}{r'_1} + \frac{\Delta(r'_1 + r'_2 + r_N)}{r'_1 + r'_2 + r_N} + \frac{\Delta(r_1 + r_2 + r_N)}{r_1 + r_2 + r_N} + \\ & + \frac{\Delta K_{swN}}{K_{swN}} + \frac{C_{\phi} \alpha}{K_{\phi} I} \cdot \frac{\Delta K_{swN}}{K_{swX}} + \frac{K_{swN}}{K_{swX}} \cdot \frac{\alpha}{K_{\phi} I} \Delta C_{\phi} + \frac{K_{swN}}{K_{swX}} \cdot \frac{C_{\phi}}{K_{\phi} I} \Delta \alpha + \\ & + \frac{K_{swN}}{K_{swX}} \cdot \frac{C_{\phi} \alpha}{K_{\phi}^2 I} \Delta K_{\phi} + \frac{K_{swN}}{K_{swX}} \cdot \frac{C_{\phi} \alpha}{K_{\phi} I^2} \Delta I + \frac{\alpha'}{K_{\phi} I'} \Delta C_{\phi} + \\ & + \frac{C_{\phi}}{K_{\phi} I'} \Delta \alpha + \frac{C_{\phi} \alpha'}{K_{\phi}^2 I'^2} \Delta K_{\phi} + \frac{C_{\phi} \alpha'}{K_{\phi} (I')^2} \Delta I, \end{aligned}$$

где α и α' — отклонения гальванометра вследствие недокомпенсации при двух уравновешиваниях цепи; I и I' — токи в двух опытах.

В данном случае учитывается наличие неполной компенсации.

Рассмотрим сличение измерительных катушек, имеющих одинаковые номинальные постоянные. При условии доведения компенсации до 2—3 дел. и принимая для отдельных погрешностей следующие значения: $\Delta \alpha = 0,2$ дел.; $\Delta C_{\phi} = 3$ мкс/дел.; $\Delta I = 0,01$ а при силе тока 3 а; $\Delta K_{\phi} = 200$ мкс/а при $K_{\phi} = 200000$ мкс/а ($K_{sw} = 10000$ см² и $K_{II} = 20$ в/а), получим для наибольшей погрешности однократного измерения величину порядка 0,2% и для вероятной — относительной — 0,06 ± 0,07%. В данном случае еще не учитывается возможность повышения точности за счет многократных измерений, когда погрешность может быть легко уменьшена до 0,1%.

Результаты проведенной выше оценки погрешностей значений мер, воспроизводящих единицы магнитных величин, сведены в табл. 6.

Таблица 6

Наименование меры	Вероятная погрешность, %			
	Первичный эталон	Рабочий эталон	Образцовая мера	Рабочая мера
Меры напряженности магнитного поля	0,01	0,05	0,08	0,1
Меры магнитного потока	—	0,03	0,05	0,06
Измерительные катушки	—	—	0,03	0,07

Если же принять погрешность исходной для данного разряда меры за нуль, то получим данные, приведенные в табл. 7.

Опыт магнитной лаборатории показывает, что состояние метрологического обслуживания в области магнитных измерений в значительной своей части удовлетворяет современным требованиям широкой практики.

Таблица 7

Однако для некоторых областей измерений, в частности это касается измерений магнитных полей, требуется более высокая точность относительных измерений, чем это обеспечивается в настоящее время.

Наименование меры	Вероятная погрешность, %			
	Первичный эталон	Рабочий эталон	Образцовая мера	Рабочая мера
Меры напряженности магнитного поля	0	0,05	0,08	0,10
Меры магнитного потока	—	0	0,04	0,06
Измерительные катушки	—	—	0,02	0,06

ВЫВОДЫ

1. Разработанная поверочная схема для магнитных мер и практическое ее осуществление позволяют в значительной своей части удовлетворять требования практики в отношении проверок магнитных мер.

2. Для удовлетворения требований отдельных областей науки и техники необходимо повысить точность относительных измерений магнитных полей.

3. Следует предусмотреть возможность сличения образцовых мер с первичным эталоном в тех случаях, когда требуется иметь повышенную точность определения значений постоянной образцовых мер.

4. Для мер магнитного потока и напряженности поля разных разрядов должны быть нормированы допустимые погрешности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шрамков Е. Г., Труды ВНИИМ, вып. 10(70), 1952.

БИБЛИОТЕКА
Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии
имени Д. М. Келдыша

ОБРАЗЦОВАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ СЛИЧЕНИЯ МЕР
МАГНИТНОГО ПОТОКА,
НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ КАТУШЕК

Как уже изложено в статье Е. Г. Шрамкова и Е. Т. Чернышева¹, сличение мер напряженности магнитного поля и магнитного потока, а также измерительных катушек производится в магнитной лаборатории ВНИИМ нулевым баллистическим методом по схеме, которая исследовалась ранее на макете и показала вполне удовлетворительные результаты (рис. 1).

На основе этих исследований была разработана конструкция стационарной измерительной установки, принципиальная схема которой показана на рис. 2, а внешний вид на рис. 3.

Сопротивления r_1 и r_2 (рис. 2) представляют собой магазины типа

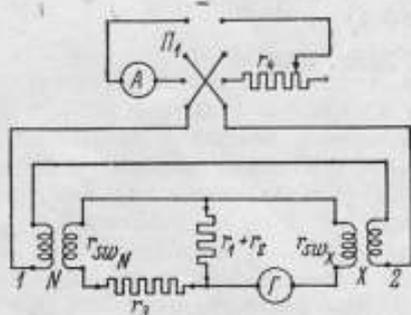


Рис. 1. Принципиальная схема для сличения магнитных мер нулевым баллистическим методом с включением вторичных обмоток в мостовую цепь.

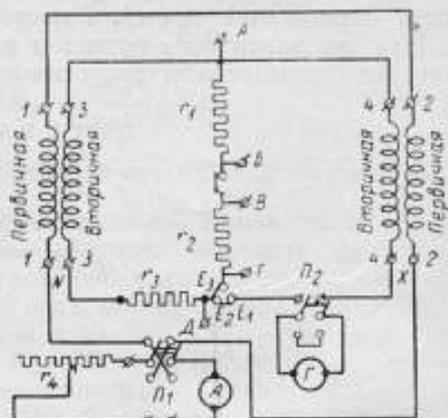


Рис. 2. Принципиальная схема установки для сличения магнитных мер нулевым или разностным баллистическим методом.

МСП-3/5, на 1111,0 ом, а r_2 — реохорд типа РПИ-2, на 1,1 ом, изготовленные заводом «Эталон»; все они смонтированы в столе. Там же находится мост типа МТВ-3, изготовленный тем же заводом и служащий для измерения суммы сопротивлений $(r_1 + r_2)$ и $(r_1 + r_2 + r_3 + r_{3sw})$ в процессе сличения мер [формула (1)]. На верхней плоскости стола размещены шкала, осветитель и зрительная труба, механический переключатель Π_1 в первичной цепи и ртутный переключатель Π_2 в запаянных трубках в измерительной цепи. Кроме того, там же расположены четыре зажима для включения в цепь измерительных обмоток (3 и 4), четыре зажима для включения первичных обмоток (1 и 2), два зажима для включения амперметра и два зажима для

¹ См. статью настоящего сборника, стр. 5.

питания схемы (сбоку под крышкой стола). На верхней плоскости стола находятся зажимы с замыкающими пластинами, позволяющими осуществлять необходимые при сличениях переключения. Размыкая пластину $БВ$, получаем возможность производить сличения по схеме рис. 4

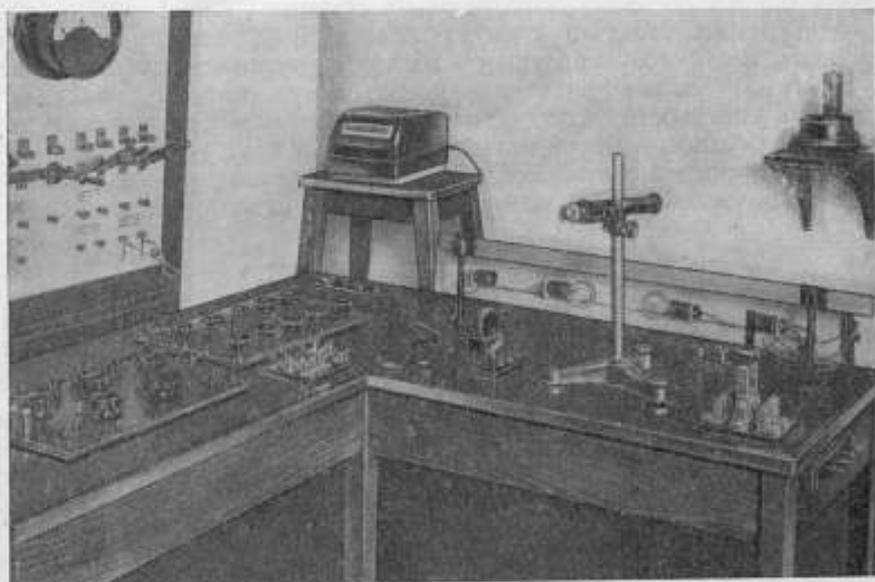


Рис. 3. Общий вид установки для сличения магнитных мер.

(встречное включение вторичных обмоток). При замкнутой пластине $БВ$ сличение производится по схеме, изображенной на рис. 1. Кроме того, зажимы $А$, $Б$, $В$, $Г$, $Д$ и $Е_3$ (рис. 2) предназначены для подключения моста при измерении сопротивлений отдельных участков: $АГ$ (сопротивление $r_1 + r_2$), и $ГД$ (сопротивление $r_1 + r_2 + r_3 + r_{swN}$), где r_{swN} — сопротивление вторичной обмотки катушки N . Так, например, при включенных пластинах, соединяющих зажимы $БВ$, и разомкнутых зажимах $Е_2Е_3$ и $Е_2Е_1$ можно измерить между зажимами $ГД$ сумму сопротивлений ($r_1 + r_2 + r_3 + r_{swN}$).

Таким образом, имеется возможность непосредственно измерять сопротивления, стоящие как в числителе, так и в знаменателе формулы (1) с учетом сопротивлений соединительных проводов при той температуре, при которой производилось сличение мер.

Схема питания, в которую входит регулировочное сопротивление r_4 , переключатель $П_1$ и амперметр, собирается отдельно и присоединяется к зажимам «питание». Для измерений сопротивлений, осуществляемых одинарным или двойным мостом, схема питания моста собирается отдельно. Баллистический гальванометр устанавливается отдельно от стола на расстоянии не менее метра от шкалы.

В качестве примера ниже приводятся результаты сличения мер напряженности магнитного поля.

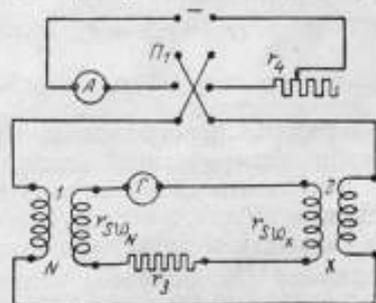


Рис. 4. Принципиальная схема для сличения магнитных мер разностным баллистическим методом с встречным включением вторичных обмоток.

Сличалась катушка с однослойной обмоткой на кварцевом цилиндре по типу катушки Гельмгольца с первичным эталоном напряженности магнитного поля. Для этого была изготовлена особая измерительная катушка, имеющая следующие данные: постоянная $K_{zw} = 214750 \text{ см}^2$, площадь поперечного сечения — $85,9 \text{ см}^2$, число витков — 2500 из проволоки ПЭШО диаметром 0,3 мм по меди, сопротивление обмотки — 201,2 ом.

Сличение производилось по схеме, приведенной на рис. 1, и заключалось в следующем. В сличаемую катушку и в катушку первичного эталона поочередно помещали указанную выше измерительную катушку. Каждая из катушек напряженности поля, в сочетании с измерительной катушкой, сличалась с образцовой мерой магнитного потока Ф-II.

При равновесии измерительной цепи, когда в первичную цепь включена катушка первичного эталона, справедливо следующее выражение:

$$K_{HЭ} \cdot K_{zw} = K_{\Phi} \frac{r_1 + r_2}{r_1 + r_2 + r_3 + r_{swN}}, \quad (1)$$

где $K_{HЭ}$ — постоянная первичного эталона напряженности поля;
 K_{zw} — постоянная измерительной катушки;
 K_{Φ} — постоянная образцовой меры магнитного потока;
 r_{swN} — сопротивление вторичной обмотки образцовой меры магнитного потока.

При втором уравнивании цепи, когда в первичную цепь включена исследуемая катушка, имеем

$$K_{HX} \cdot K_{zw} = K_{\Phi} \frac{r'_1 + r'_2}{r'_1 + r'_2 + r'_3 + r_{swN}}, \quad (2)$$

где K_{HX} — постоянная исследуемой катушки напряженности поля.
 Из уравнений (1) и (2) находим

$$K_{HX} = K_{HЭ} \frac{r'_1 + r'_2}{r'_1 + r'_2 + r'_3 + r_{swN}} \cdot \frac{r_1 + r_2 + r_3 + r_{swN}}{r_1 + r_2}. \quad (3)$$

Сопротивления

$$(r_1 + r_2) = r, \quad (r'_1 + r'_2) = r', \quad (r_1 + r_2 + r_3 + r_{swN}) = r_0 \\ \text{и} \quad (r'_1 + r'_2 + r'_3 + r_{swN}) = r'_0$$

измерялись непосредственно мостом после соответствующего уравнивания измерительной цепи.

Результаты сличения катушки первичного эталона с катушкой Ф-II приведены в табл. 1, а исследуемой катушки с той же катушкой Ф-II — в табл. 2.

По средним значениям отношений сопротивлений r/r_0 и r'/r'_0 , пользуясь формулой (3), получена величина постоянной исследуемой катушки $K_{HX} = 0,6668_0 \text{ в/а}$. В соответствии с формулой (3), выражение для наибольшей погрешности определения постоянной K_{HX} имеет вид:

$$\frac{\Delta K_{HX}}{K_{HX}} = \frac{\Delta r'}{r'} + \frac{\Delta r'_0}{r'_0} + \frac{\Delta r_0}{r_0} + \frac{\Delta r}{r},$$

если пренебречь погрешностью значения постоянной первичного эталона.

Оценивая погрешность измерения каждого из четырех сопротивлений в 0,02%, получим наибольшую погрешность $\frac{\Delta K_{HX}}{K_{HX}} = \pm 0,08\%$, а вероятную относительную¹ — 0,04%.

¹ Здесь и в дальнейшем имеется в виду погрешность, определяемая по правилам, относящимся к косвенным измерениям.

Таблица 1

r, OM	r_n, OM	r_0, OM	$\frac{r}{r_0}$
260	152,3	630,50	0,4123 ₇
270	166,6	654,86	0,4123 ₀
280	180,6	678,94	0,4124 ₁
290	194,7	703,12	0,4124 ₅
300	208,7	727,14	0,4125 ₈
310	222,9	751,41	0,4125 ₆
320	237,3	775,49	0,4124 ₈
330	251,8	800,28	0,4123 ₆
340	266,0	824,48	0,4123 ₈
350	280,2	848,69	0,4124 ₀
360	294,2	872,72	0,4125 ₀
370	308,0	896,64	0,4126 ₅
380	322,7	921,25	0,4124 ₈
390	337,0	945,48	0,4124 ₉
400	351,5	969,75	0,4124 ₈
Среднее значение $0,4124_0 \pm 0,00007$			

Таблица 2

r', OM	r'_n, OM	r'_0, OM	$\frac{r'}{r_0}$
260	89,2	567,05	0,4585 ₁
270	100,9	588,86	0,4585 ₁
280	112,4	610,46	0,4586 ₇
290	124,2	632,30	0,4586 ₄
300	135,9	654,12	0,4586 ₃
310	147,8	676,06	0,4585 ₃
320	159,5	697,82	0,4585 ₇
330	171,2	719,59	0,4585 ₉
340	183,0	741,42	0,4585 ₇
350	194,8	763,26	0,4585 ₅
360	206,4	764,93	0,4586 ₃
370	218,3	806,86	0,4585 ₆
380	229,8	828,38	0,4587 ₂
390	241,8	850,42	0,4585 ₉
400	253,4	872,04	0,4586 ₉
Среднее значение $0,4585_9 \pm 0,00005$			

При сличении обеих катушек баллистический гальванометр включался примерно на одно и то же сопротивление.

Если бы при помощи этого гальванометра непосредственно измерялся полный магнитный поток, сцепляющийся с измерительной катушкой, помещенной в сличаемую катушку напряженности поля, то при силе тока в 1 а в обмотке катушки напряженности поля отклонение гальванометра при переключении тока было бы равно

$$\alpha = \frac{2r_0 H K_{sw}}{C_\phi},$$

где $H = K_{H\Omega} \cdot I$, если I — сила тока в амперах в обмотке катушки;

C_ϕ — постоянная гальванометра в единицах магнитного потока.

В нашем случае $I = 1$ а, $K_{H\Omega} = 0,666$ в/а (приблизительно), $K_{sw} = 214\,750$ см², $C_\phi = 575$ мкс/дел.

Тогда $\alpha = 497$ дел.

При сличении катушек вышеприведенным нулевым методом полной компенсации магнитных потоков не удастся достигнуть вследствие различных постоянных времени соответствующих цепей индуктируемых токов.

Недокомпенсация, как показывает опыт, составляла величину порядка 0,2 деления по шкале гальванометра, что соответствовало в условиях наших экспериментов магнитному потоку в 115 мкс или 0,04% от величины полного потока сцепления сличаемой катушки напряженности поля в сочетании с измерительной катушкой.

Добавляя к вычисленной выше величине погрешности погрешность от недокомпенсации, получим величину наибольшей погрешности определения постоянной катушки напряженности поля $\frac{\Delta K_{НХ}}{K_{НХ}} = \pm 0,12\%$, а вероятную относительную — порядка 0,06%.

Исследуемая катушка была изготовлена с особой тщательностью, что позволило рассчитать ее постоянную по геометрическим размерам обмотки.

Расчетная величина оказалась равной 0,66670 *э/а*, т. е. расхождение между расчетной и экспериментально определенной постоянными составляет 0,02%. Это является лишним подтверждением надежности сличений на описанной образцовой установке.

ВЫВОДЫ

1. Разработана и осуществлена стационарная установка для сличения мер магнитного потока, напряженности поля и измерительных катушек нулевым и разностным баллистическим методом, обеспечивающая погрешность передачи значений магнитных единиц, не превышающую 0,1%.

2. Установка используется для сличения магнитных мер в магнитной лаборатории ВНИИМ и может быть рекомендована также (благодаря несложности обращения с ней и простоте оборудования) для широкой измерительной практики при поверках магнитных мер.

ИНДУКЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ СИЛЬНЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Развитие промышленности и некоторых областей современной физики ставит задачу повышения точности измерений напряженности сильных постоянных магнитных полей в зазорах электромагнитов.

В настоящей работе, выполненной в магнитной лаборатории ВНИИМ, эта задача решается путем усовершенствования индукционных методов. Выбор индукционных методов вызван тем, что они имеют известные преимущества по сравнению с другими методами. Индукционные методы основываются на хорошо изученном и сравнительно простом явлении, в котором напряженность магнитного поля связана линейной зависимостью с величиной, измеряемой непосредственно. Эти методы являются достаточно чувствительными и обеспечивают метрологическую схему передачи единицы напряженности от эталона к источникам сильных полей.

Усовершенствование индукционных методов достигается путем осуществления их в виде нулевых, в которых индуктированная в измерительной катушке э. д. с. компенсируется э. д. с. подобной же формы. С целью уменьшения погрешности результатов используются специально изготовленные образцовые меры с малыми погрешностями.

Для исследования индукционных методов были созданы установки, получившие название установок с вращающимися катушками и с поворотными катушками.

ОБРАЗЦОВЫЕ МЕРЫ

Для использования в установках были изготовлены и исследованы образцовая катушка напряженности поля и образцовые измерительные катушки.

Образцовая катушка напряженности поля (рис. 1), являющаяся промежуточной мерой между эталоном и рабочими источниками сильного поля, изготовлена по типу колец Гельмгольца.

Постоянная K_H катушки с многослойной обмоткой определялась сличением с эталоном нулевым методом¹ и оказалась равной $(18,283 \pm 0,003) \text{ в/а}$. С помощью этой катушки воспроизводятся магнитные поля напряженностью до 150 э.

Обмотки образцовых измерительных катушек однослойные. Катушки называются нами расчетными, так как их постоянные определены из геометрических размеров. С этой целью измерялись диаметры каркасов без обмотки и с обмоткой. Погрешность каждого измерения не превышала 1 мк.

Пустотелые каркасы больших измерительных катушек изготовлены из мрамора, малых — из янтаря. Выбор этих материалов вызван тем, что они обладают хорошими изоляционными качествами и имеют малые

¹ См. статью настоящего сборника, стр. 5.

температурные коэффициенты расширения. Можно полагать, что эти материалы будут обладать надежным постоянством размеров во времени, так как они прошли длительное естественное старение.

При намотке катушек провод укладывали с постоянным зазором между витками. Для этого одновременно наматывали два проводника, один из которых затем удаляли.

В табл. 1 помещены данные измерений и результаты вычислений постоянных шести измерительных катушек.

При помещении больших измерительных катушек (№ 1, 2, 3) одна в другую и при последовательном и согласованном соединении их обмоток



Рис. 1. Разрез образцовой катушки напряженности поля:

R —300 мм; ab —50,4 мм;
 ac —54,6 мм.

образуется измерительная катушка № 7 с постоянной $K_{sw_7} = 11668 \text{ см}^2$.

Погрешность расчетной постоянной каждой измерительной катушки определяется погрешностью измерения диаметра каркаса и отступлением плоскостей витков обмоток от перпендикулярного их расположения к оси каркаса. Первая погрешность вычисляется по формуле:

$$\frac{\Delta K_{sw}}{K_{sw}} = \frac{3\Delta D_k + D_0}{D_1},$$

где ΔD_k — средняя арифметическая погрешность измеренного значения диаметра каркаса;

D_0 — диаметр каркаса с обмоткой;

D — среднее значение диаметра обмотки (между осевыми линиями провода витка).

Результаты вычислений погрешности постоянных образцовых измерительных катушек по этой формуле помещены в табл. 2. Погрешность постоянной катушки № 7 определялась как сумма погрешностей постоянных образующих ее катушек и была равна $2,4 \text{ см}^2$ (0,021%).

Погрешность постоянной, обусловленная наклоном плоскостей витков обмоток к осям каркасов, вычисляется по формуле:

$$\frac{\Delta K_{sw}}{K_{sw}} = \sec \beta - 1,$$

где β — угол между нормалью к плоскости витка в его центре и осью каркаса катушки.

Если расстояние между витками обмотки равно диаметру провода, то угол β может быть вычислен из формулы:

$$\text{tg } \beta = \frac{d}{D_k - d},$$

где d — диаметр провода обмотки;

D_k — диаметр каркаса катушки.

Как показал расчет, эта погрешность оказывается пренебрежимо малой. Так, для постоянной катушки № 6 (для которой она имеет наибольшее значение) она не превышает 0,0015%.

Для катушки № 7 необходимо также оценить погрешность, обусловленную несоосностью образующих ее двух катушек по отношению к третьей. Максимальная абсолютная погрешность может быть вычислена по формуле:

$$\Delta K_{sw_7} = K_{sw_1}(1 - \cos \alpha) + K_{sw_2}(1 - \cos 2\alpha),$$

где K_{sw_1} и K_{sw_2} — постоянные катушек № 1 и 2;

α — угол между осями каркасов, помещенных один в другой.

Таблица 1

№ катушек	Средние значения диаметров, мм		Средний диаметр витка D , мм	Число витков n	Постоянные катушек $K_{\text{ст}}, \text{см}^2$
	каркаса D_K	каркаса с обмоткой D_0			
Мраморные каркасы					
1	53,945 ₃	54,105 ₀	54,025 ₁	299	6854,1
2	37,015 ₇	37,134 ₁	37,074 ₉	322	3476,8
3	22,001 ₆	22,119 ₃	22,060 ₄	350	1337,8
Янтарные каркасы					
4	16,805 ₆	16,922 ₃	16,836 ₉	137	306,0 ₀
5	13,385 ₆	13,501 ₆	13,443 ₆	107	151,8 ₈
6	10,612 ₆	10,730 ₀	10,670 ₇	85	76,0 ₂

Таблица 2

№ катушек	$\Delta D_K, \text{мм}$	$\Delta D, \text{мм}$	$\frac{\Delta K_{\text{ст}}}{K_{\text{ст}}}, \%$	$\Delta K_{\text{ст}}, \text{см}^2$
1	0,001 ₃	0,004 ₅	0,015	1,0
2	0,001 ₇	0,003 ₁	0,022	0,8
3	0,002 ₂	0,002 ₉	0,043	0,6
4	0,001 ₀	0,001 ₁	0,024	0,07
5	0,001 ₇	0,001 ₅	0,049	0,07
6	0,001 ₉	0,001 ₆	0,069	0,05

В изготовленных каркасах этот угол не превышал $0,1^\circ$, а вычисленная по последней формуле погрешность была не более $0,004\%$.

Таким образом, приведенные в табл. 2 погрешности с достаточной степенью точности можно считать полными погрешностями расчетных постоянных образцовых измерительных катушек.

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ УСТАНОВОК

Общие виды установок с вращающимися и поворотными катушками представлены соответственно на рис. 2 и 3. Катушка 1 помещается в измеряемое сильное поле электромагнита, 2 — в поле образцовой катушки напряженности поля 3. Обмотки измерительных катушек соединены между собой последовательно. При повороте вала, на который падают катушки, в них индуктируются э. д. с. Соответствующим направлением магнитных полей или соединением обмоток измерительных катушек обеспечивается противофазность индуктированных в катушках э. д. с. Регулировкой силы тока в образцовой катушке достигается уравнивание этих э. д. с. Полная компенсация э. д. с. по ряду причин не достигается, и момент

равенства потокоцеплений с измерительными катушками устанавливается по минимуму показаний указателя компенсации э. д. с., включенного в цепь измерительных катушек.

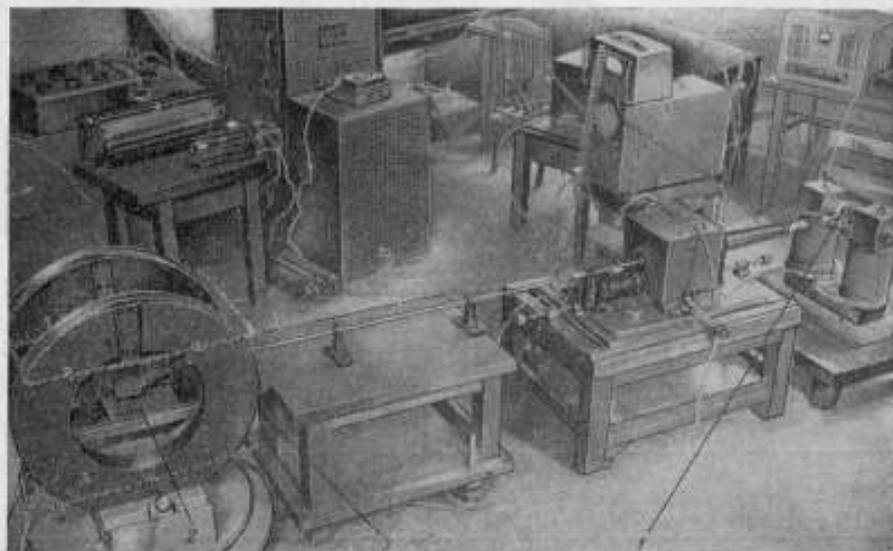


Рис. 2. Общий вид установки с вращающимися катушками:

1 — малая измерительная катушка (№ 4, 5 или 6); 2 — большая измерительная катушка (№ 7);
3 — образцовая катушка напряженности поля.

Поскольку постоянные образцовых мер — измерительных катушек и образцовой катушки напряженности поля — известны, то, зная силу тока

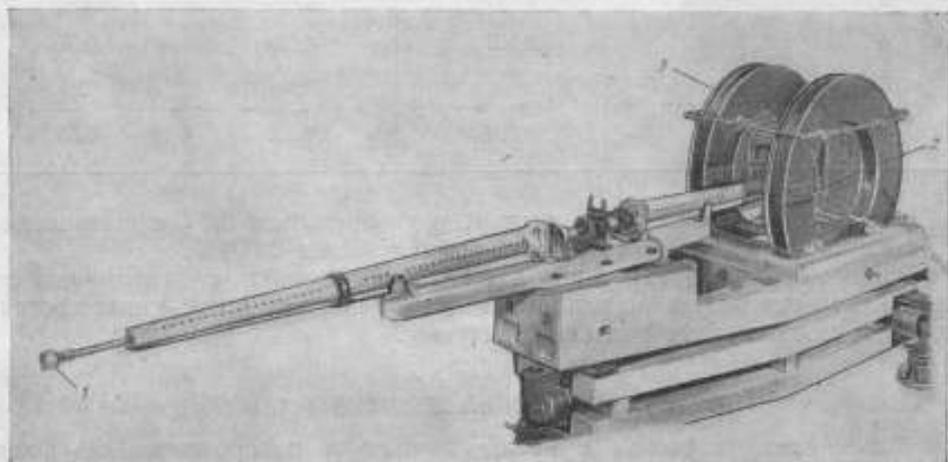


Рис. 3. Общий вид установки с поворотными катушками:

4 — малая измерительная катушка (№ 4, 5 или 6); 2 — большая измерительная катушка (№ 7); 3 — образцовая катушка напряженности поля.

в образцовой катушке поля в момент компенсации э. д. с., можно вычислить и измеряемую напряженность сильного поля. Сила тока в образцовой катушке поля измеряется с помощью компенсатора, который служит также для контроля постоянства силы тока в обмотках электромагнита (рис.4).

Таким образом, измерение напряженности сильного поля электромагнита сводится к сравнению его с напряженностью поля образцовой катушки; сила тока в последней и является мерой напряженности сильного поля.

В установке с вращающимися катушками равномерное вращение вала осуществляется синхронным двигателем, питаемым от эталона частоты ВНИИМ. При частоте питающего тока 1000 гц ротор двигателя вращается со скоростью 1200 об/мин. При этом в измерительных катушках индуктируются э. д. с. частотой 20 гц. Указателем компенсации э. д. с. служит электронный осциллограф или ламповый вольтметр. В цепь измерительных катушек указатель подключается с помощью скользящих контактов, образованных медными кольцами и угольными щетками.

Напряженность поля при измерениях установкой с вращающимися катушками вычисляется по формуле:

$$H_s = \frac{H_k K_{sw11}}{K_{sw1}}$$

где $H_k = K_k I_k$ — напряженность поля в образцовой катушке поля;

I_k — сила тока в образцовой катушке;

K_{sw1} и K_{sw11} — постоянные измерительных катушек, помещаемых в поля электромагнита и образцовой катушки.

В установке с поворотными катушками вал поворачивается на 180°.

Приводом служит спиральная пружина, завод которой выполняется вручную, а спуск — нажатием на спусковой рычаг. Ограничители, положение которых регулируется, обеспечивают угол поворота на 180°. При повороте измерительных катушек в них индуктируются полуволны э. д. с. Указателем компенсации служит чувствительный баллистический гальванометр.

Напряженность поля при измерениях установкой с поворотными катушками вычисляется по формуле:

$$H_s = \frac{H_k K_{sw11} + \frac{C_\phi \alpha}{2}}{K_{sw1}} \quad (1)$$

где C_ϕ и α — постоянная баллистического гальванометра и отсчет по его шкале при повороте катушек на 180°.

Перед измерениями выполняются угловые юстировки установок для достижения максимального потокосцепления с измерительными катушками, а также более точного обеспечения противофазности компенсируемых э. д. с. Контроль за неизменностью положений измерительных катушек производится по шкалам юстировочных устройств.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВОК

С целью уточнения методики измерений был проведен ряд исследований, в результате которых были выявлены источники систематических погрешностей и найдены способы их устранения или существенного уменьшения.

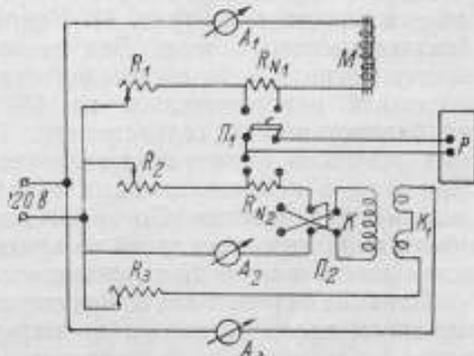


Рис. 4. Схема питания источников поля: M — электромагнит; K — образцовая катушка поля; R_1, R_2, R_3 — регулировочные резисторы; A_1, A_2, A_3 — амперметры для грубого контроля сил токов; R_{N1} и R_{N2} — образцовые катушки сопротивлений; Π_1 и Π_2 — переключатели; P — компенсатор; K_1 — обмотка для компенсации вертикальной составляющей земного поля.

Погрешности от влияния земного магнитного поля

Наложение земного магнитного поля на измеряемое сильное поле электромагнита не вызывало существенной погрешности ввиду малой величины первого по сравнению с последним и соответствующей взаимной ориентировки земного и измеряемого полей¹. Однако значительная систематическая погрешность вызывается наложением земного поля на поле образцовой катушки. Напряженность первого поля составляла 0,1—0,2% напряженности второго.

Вертикальная составляющая земного поля компенсируется полем дополнительных обмоток K_1 , надетых непосредственно на образцовую катушку напряженности поля (рис. 4). Компенсация полей подбиралась с помощью баллистического метода. Для этого, при выключенных токах в обмотке электромагнита и в образцовой катушке напряженности поля, в центре последней поворачивалась на 180° измерительная катушка, замкнутая на баллистический гальванометр. При отсутствии тока в компенсационных обмотках отсчет по шкале гальванометра был порядка 30 делений. При токе в компенсационных обмотках порядка 1 а это отклонение сводилось к 0,1 деления. Во время измерения сила тока в компенсационных обмотках контролировалась по прибору класса 0,2 или даже 0,5. При этом погрешность измерений напряженности поля не превосходила 0,002—0,005%.

Влияние горизонтальной составляющей земного поля устраняется размещением валов установок по магнитному меридиану. Погрешность измерений от возможного несовещения вала установки с меридианом на $2-3^\circ$ оказывается пренебрежимо малой.

Погрешность от влияния полей рассеяния

Наложение полей рассеяния от сравниваемых источников полей также является причиной систематической погрешности. В то время как наложением поля рассеяния образцовой катушки поля на сильное поле электромагнита можно пренебречь (расстояние между центрами источников полей в установке порядка 2,5 м), наложение поля рассеяния электромагнита следовало учитывать, так как оно составляло 0,1—0,3% поля образцовой катушки. Напряженность поля рассеяния электромагнита в центре образцовой катушки поля измерялась баллистическим методом с погрешностью 2—3%, что обуславливает погрешность измерения напряженности поля порядка 0,005%.

При работе с установкой с вращающимися катушками в цепи этих катушек обнаруживается наличие посторонних э. д. с. частотой 50 гц и более высоких.

Уменьшение наводок в цепи измерительных катушек достигалось заземлением частей установки. Влияние остаточных высокочастотных наводок на указатель равновесия устранялось шунтированием его входа емкостью в 0,01 мкф.

Погрешности, вызванные угловыми юстировками

Результат измерения напряженности поля существенно зависит от расположения измерительных катушек в сличаемых полях. Оси катушек должны быть перпендикулярны валу, а концы вала — направлениям сличаемых полей. Достигалось это путем угловых юстировок измерительных катушек и несущих их концов вала. Большая часть юстировок выполнялась геометрическим способом. Только две юстировки, обеспечивающие перпенди-

¹ Направление сличаемых полей (электромагнита и образцовой катушки поля) было горизонтальным.

кулярность вала с малой измерительной катушкой силовым линиям измеряемого сильного поля и противофазность компенсируемых э. д. с., выполнялись с помощью компенсационного метода, осуществляемого самой установкой.

Погрешность измерения напряженности полей вследствие погрешности угловых юстировок при измерениях установкой с вращающимися катушками имеет порядок 0,05%, а при измерениях другой установкой 0,01—0,02%. Эта погрешность является систематической, но знак ее неизвестен. Такой же характер в случае применения установки с поворотными катушками имеет погрешность вследствие того, что угол поворота вала не равен 180° . После регулировки этого угла отличие его от 180° не превышало 1° , а погрешность измерений по этой причине оказывалась пренебрежимо малой, так как второе слагаемое в числителе расчетной формулы (1) для напряженности поля в 100—1000 раз меньше первого.

Исследование чувствительности установок

Чувствительность установок к измеряемой напряженности поля для данного указателя равновесия зависит от постоянных измерительных катушек. Практическое значение имеет чувствительность к изменению потоко-сцеплений с измерительными катушками, которая и исследовалась. Экспериментальным путем было найдено, что порог чувствительности установки к вращающимся катушкам имеет величину порядка 500 мкс, а другой установки — порядка 20 мкс. При потоко-сцеплениях с измерительными катушками порядка 10^6 мкс относительные значения порогов чувствительности установок (отношение абсолютного значения порога чувствительности к полному потоко-сцеплению) оказались соответственно порядка 0,05 и 0,002%. Используемые в установках указатели компенсации соответствуют указанным чувствительностям установок.

Причины неполной компенсации э. д. с. измерительных катушек

При работе с обеими установками полная компенсация э. д. с. измерительных катушек практически не достигалась. Общей причиной неполной компенсации является неодинаковая форма кривых компенсируемых э. д. с., вызываемая различной индуктивностью катушек, а также неправильным расположением их, если перед измерениями угловые юстировки были выполнены недостаточно тщательно. Различная форма э. д. с. обуславливается также различной степенью неоднородности сличаемых полей; с увеличением неоднородности измеряемого поля наблюдалось увеличение остаточной (нескомпенсированной) э. д. с.

Кроме общих для обеих установок причин неполной компенсации э. д. с., были обнаружены еще причины недокомпенсации, присущие только данной установке. Для установки с вращающимися катушками такой причиной является нарушение противофазности э. д. с. катушек, вызываемое вибрациями в установке. При измерениях же установкой с поворотными катушками такой причиной является неодновременность поступления импульсов тока в рамку гальванометра, вызываемая различной индуктивностью измерительных катушек. Во избежание двусторонних отклонений рамки гальванометра импульс от малой измерительной катушки (с меньшей индуктивностью) делался заведомо несколько большим, чем импульс от второй катушки.

Неполная компенсация э. д. с. измерительных катушек снижает чувствительность установки и является одной из причин разброса результатов измерений.

Зависимость результатов измерений установкой с поворотными катушками от скорости поворота вала

Как известно, при измерениях баллистическим гальванометром требуется, чтобы весь измеряемый импульс тока протекал через рамку гальванометра прежде, чем рамка приходит в движение. Это условие практически выполняется, если время протекания импульса значительно меньше периода гальванометра.

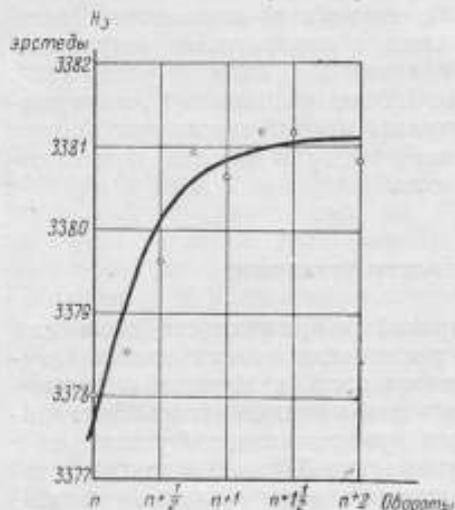


Рис. 5. Зависимость измеренного значения напряженности поля от скорости поворота вала.

При измерениях время поворота вала на 180° было порядка 0,2 сек., а период гальванометра равен 14,6 сек. При использовании такого гальванометра скорость поворота вала была недостаточной, вследствие чего возникла систематическая ошибка в измерениях.

На рис. 5 изображена зависимость измеренной напряженности поля H_z от скорости поворотов вала. Последняя отложена по оси абсцисс в условных единицах — в оборотах завода пружины привода. Через n на графике обозначен начальный завод пружины.

Как видно из рис. 5, с увеличением завода пружины измеренная напряженность поля увеличивается и достигает некоторого предела, который можно рассматривать как действительное значение измеряемой напряженности поля.

Из графика можно было определить поправку к измерениям, выполненным при скорости поворота вала, соответствующей начальному заводу пружины. Поправка имеет положительный знак. Ее абсолютное значение, равное разности значений напряженности поля, измеренной при достаточно большой и начальной скоростях поворотов вала, равно

$$\delta H_z = H_{z\infty} - H_{zn} = 3,5_z.$$

Относительное значение поправки $\frac{\delta H_z}{H_{zn}} \cong 0,001$, т. е. 0,1%.

Это значение не зависит от величины измеряемой напряженности поля и определяется только начальным заводом пружины привода.

При введении этой поправки погрешность значения измеренной напряженности поля вследствие погрешности поправки находится в пределах 0,003—0,006%.

При использовании гальванометра с периодом 22 сек. и при скорости поворота вала, соответствующей тому же начальному заводу пружины в n оборотов, абсолютное значение поправки было менее 1 э и ею можно было пренебречь.

Пределы измерений установок

При условии полной компенсации э. д. с. измерительных катушек расчетные формулы обеих установок совпадают и имеют вид

$$H_z = \frac{K_H I_c \cdot K_{sw11}}{K_{sw1}}.$$

Числитель правой части формулы представляет собой потокосцепление с измерительной катушкой, находящейся в поле образцової катушки напряженности поля. Величина этого потокосцепления и определяет предел измерений установок.

В условиях нормальной эксплуатации установок сила тока, допустимая в обмотках образцовой катушки напряженности поля, имеет порядок 5 а, а потокосцепление с измерительной катушкой — 10^6 мкс. Если в измеряемое поле помещена расчетная катушка № 6, то максимальная напряженность поля, которая может быть измерена установками, составляет 14 000 э.

При кратковременных измерениях сила тока в обмотках образцовой катушки напряженности поля может быть доведена до 8 а; при этом предел измерений напряженности поля будет равен 22 000 э.

Исследование условий постоянства и воспроизводимости напряженности поля электромагнита

Постоянство напряженности поля в электромагните определяется в первую очередь постоянством температуры его сердечника и силы тока в его обмотках.

Измерения напряженности поля в электромагните выполнялись при силах тока, при которых магнитное состояние материала сердечника характеризовалось точками, лежащими за перегибом основной кривой намагничивания. Тем не менее, поскольку материал не был насыщен, колебания температуры и силы тока в обмотках электромагнита существенно влияли на величину напряженности поля в его зазоре.

Для стабилизации температуры материала сердечника оказалось необходимым перед измерениями выдержать электромагнит при данной силе тока в течение 12—15 мин. С той же целью постоянство комнатной температуры следовало поддерживать с точностью порядка 1° С. Колебания комнатной температуры в пределах $1-2^\circ$ С вызывают изменения напряженности измеряемого поля порядка 0,01—0,03%.

Для поддержания постоянства напряженности поля электромагнита с точностью до 0,01% сила тока в его обмотках не должна изменяться больше чем на 0,005%.

Исследование воспроизводимости напряженности поля в зазоре электромагнита представляло интерес для сопоставления результатов измерений, выполненных на различных установках в различное время. Обеспечение одинаковых температурных условий и одинаковой силы тока в обмотках электромагнита для воспроизведения напряженности поля в зазоре оказалось недостаточным. Причиной этого были гистерезисные явления в сердечнике электромагнита. При соблюдении прочих одинаковых условий воспроизводимость напряженности поля в зазоре электромагнита порядка 0,04% обеспечивалась предварительной десятикратной коммутацией тока в его обмотках.

Воспроизводимость измерений установками

С целью исследования воспроизводимости измерений установками проводились тридцатикратные измерения напряженности постоянного поля в зазоре электромагнита. Постоянство и воспроизводимость поля перед измерениями каждого нового ряда обеспечивались указанными выше мероприятиями.

При измерениях пользовались тремя расчетными измерительными катушками (№ 4, 5, 6) при различных силах тока в обмотках электромагнита. Установкой с вращающимися катушками измерения производились в зазоре электромагнита шириной 44 мм, а установкой с поворотными катушками — в зазорах различной ширины. Результаты обработки рядов измерений помещены в табл. 3 и 4.

Таблица 3

№ расчетных измерительных катушек	Сила тока в обмотках электромагнита, а	Среднее значение измеренной напряженности поля, а	Средняя квадратичная погрешность ряда		Максимальный разброс в ряду измерений	
			абсолютная, а	относительная, %	абсолютный, а	относительный, %
4	6,984 ₆	2870	2	0,06 ₄	7	0,2 ₃
5	6,984 ₆	2877	2	0,06 ₃	7	0,2 ₃
6	6,984 ₆	2878	2	0,05 ₈	6	0,2 ₀
4	9,979 ₂	3330	2	0,07 ₂	8	0,2 ₅

Таблица 4

№ расчетных катушек	Сила тока в обмотках электромагнита, а	Среднее значение измеренной напряженности поля, а	Средняя квадратичная погрешность ряда		Максимальный разброс в ряду измерений	
			абсолютная, а	относительная, %	абсолютный, а	относительный, %
Ширина зазора 44 мм						
4	6,984 ₆	2869 ₂	0,4	0,014	1,6	0,056
5	6,984 ₆	2876 ₃	0,3	0,013	1,1	0,040
6	6,984 ₆	2878 ₃	0,3	0,011	1,2	0,042
Ширина зазора 40 мм						
5	6,984 ₆	3158 ₄	0,4	0,014	1,4	0,046
6	6,984 ₆	3159 ₄	0,4	0,014	1,5	0,047
Ширина зазора 37 мм						
6	6,984 ₆	3387 ₃	0,4	0,011	1,2	0,035
6	9,979 ₂	3906 ₆	0,5	0,014	1,6	0,042
Ширина зазора 39 мм ¹						
6	3,999 ₈	4136 ₉	0,5	0,011	1,8	0,043

¹ Измерения при ширине зазора 39 мм выполнены в другом электромагните.

Как правило, при измерениях напряженности более сильных полей, создаваемых большими токами в обмотках электромагнита, погрешности и максимальные разбросы рядов измерений увеличиваются. Объясняется это тем, что постоянство более сильных токов в обмотках электромагнитов поддерживалось с меньшей точностью.

При измерениях одной и той же напряженности поля измерительными катушками с меньшими постоянными погрешности и максимальные разбросы рядов измерений, как правило, оказываются меньше. Этот факт объясняется тем, что для достижения компенсации э. д. с. в этих случаях

в обмотках образцовой катушки напряженности поля требуется меньшая сила тока, который поддерживается с большим постоянством. Таким образом, непостоянство силы тока в обмотках образцовой катушки напряженности поля также может быть источником погрешности измерений.

Зависимость результатов измерений напряженности неоднородного поля от объема измерительных катушек

Как видно из кривой распределения поля в зазоре электромагнита, изображенной на рис. 6, измеряемое поле было недостаточно однородным. Эта кривая получена с помощью установки с вращающимися катушками. Измерение напряженности поля производилось через каждый миллиметр перемещения измерительной катушки по линии, проходящей через центр зазора и параллельной плоскостям полюсных наконечников.

При измерениях напряженности одного и того же поля различными измерительными катушками центр каждой из них совмещался с центром зазора. Поскольку измеренное какой-либо катушкой значение напряженности поля является усредненным по объему катушки, то напряженности поля,

измеренные катушками большего объема, должны быть меньше. Этот вывод согласуется с данными, приведенными в табл. 3 и 4.

Указанная зависимость подтверждается расчетом. Экспериментально полученная кривая распределения может быть аналитически представлена нижеследующей зависимостью:

$$H = H_0 - 0,8r^{2,1} \text{ при } 0 < r < 5,5 \text{ мм};$$

$$H = H_0 - 0,01r^{3,1} \text{ при } 5,5 < r < 8,4 \text{ мм},$$

где H — напряженность поля на расстоянии r от центра зазора;

H_0 — напряженность поля в центре зазора.

Если поле имеет радиальную симметрию, максимальное потокосцепление с измерительной катушкой выражается формулой:

$$\Psi = 2\pi w \mu_0 \int_0^R H r dr,$$

где w — число витков катушки;

μ_0 — проницаемость пустоты;

R — радиус измерительной катушки.

Обозначая напряженность, измеренную катушкой № 6, через H_6 , и пользуясь вышеприведенными выражениями, получим напряженность поля в центре зазора электромагнита:

$$H_0 = H_6 + \frac{2\pi w}{K_{\text{кв}_6}} \int_0^{5,33} 0,08r^{2,1} dr,$$

где $K_{\text{кв}_6}$ — постоянная катушки № 6.

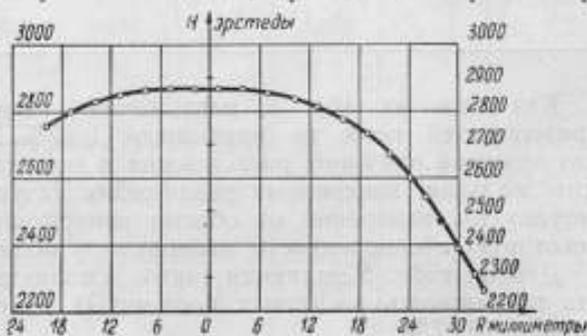


Рис. 6. Распределение поля в зазоре электромагнита.

Зная H_0 , можно вычислить напряженности поля, ожидаемые при измерении, катушками большего размера (№ 5 и 4, табл. 5).

Таблица 5

№ измерительных катушек	Значения напряженностей поля, э		Расхождение в значениях между вычисленными и измеренными напряженностями поля, %
	вычисленных	измеренных	
6	2878	2878	0
5	2875	2877	0,07
4	2872	2870	0,07

Как видно из табл. 5, расхождения вычисленных и измеренных напряженностей поля не превышают 0,07%. Это позволяет утверждать, что основной причиной расхождения в значениях напряженностей одного и того же поля, измеренных различными катушками, является зависимость результатов измерений от объема измерительных катушек, имея в виду некую неоднородность измеряемого поля.

Данные табл. 5 являются также дополнительным подтверждением того, что погрешность расчетных постоянных измерительных катушек не превышает 0,07%.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ДВУМЯ УСТАНОВКАМИ

В табл. 6 сопоставлены результаты измерений напряженности одного и того же поля установками с вращающимися и поворотными катушками.

Как видно из табл. 6, погрешности рядов измерений установкой с вращающимися катушками имеют величину порядка 0,06%, а другой установкой — порядка 0,01%. В таком же соотношении находятся и максимальные разбросы в ряду измерений установками.

Расхождения результатов измерений двумя установками не превышают 0,03%, т. е. оказываются в пределах воспроизводимости напряженности поля электромагнита и в пределах погрешностей рядов измерений каждой установкой. Таким образом, результаты измерений двумя установками следует считать совпадающими.

Погрешности измерений установками

Вычисление погрешностей измерений проводилось по формулам, которые легко получаются из расчетных формул для напряженности поля. При этом учитывались также погрешности от угловых юстировок и погрешности поправок. Вычисленные максимальные погрешности измерений обеими установками оказались в пределах 0,1—0,2%. Одинаковый порядок погрешностей объясняется тем, что в обеих установках используются одни и те же образцовые меры, погрешности постоянных которых и определяют в основном погрешность измерений. Погрешности измерений установками, вычисленные по формулам погрешности косвенного измерения, не превышают 0,1%.

В практике магнитной лаборатории ВНИИМ установки использовались для градуировки электромагнита, который применяется для поверки измерителей напряженности постоянных магнитных полей с погрешностью 0,2—0,3%.

Таблица 6

Наименование установки	Значение измеренной напряженности поля, э	Средняя квадратичная погрешность		Максимальный разброс в ряду измерений		Расхождение значений напряженности поля, измеренной установками	
		абсолютная, э	относительная, %	абсолютный, э	относительный, %	абсолютное, э	относительное, %
При измерениях катушкой № 4							
Установка с вращающимися катушками	2869,9	1,8	0,06 ₄	6,6	0,2 ₃	0,7	0,0 ₂
Установка с поворотными катушками	2869,2	0,4	0,014	1,6	0,056		
При измерениях катушкой № 5							
Установка с вращающимися катушками	2877,1	1,8	0,06 ₃	7,2	0,2 ₅	0,8	0,0 ₃
Установка с поворотными катушками	2876,3	0,3	0,013	1,1	0,040		
При измерениях катушкой № 6							
Установка с вращающимися катушками	2878,2	1,7	0,05 ₈	5,8	0,02 ₀	0,1	0,00 ₃
Установка с поворотными катушками	2878,3	0,3	0,011	1,2	0,042		

Выводы

1. Разработанная методика измерения напряженности сильных постоянных магнитных полей нулевыми индукционными методами на двух установках (с поворотными и вращающимися катушками) позволяет осуществлять передачу единицы напряженности магнитного поля от эталона к источникам сильных полей.

2. Максимальная погрешность измерений установками оценивается величиной 0,1—0,2%.

3. Расхождение в результатах измерений напряженности одного и того же поля обеими установками находится в пределах 0,03—0,04%, что указывает на отсутствие больших систематических погрешностей.

4. По воспроизводимости результатов измерений преимущество оказалось на стороне установки с поворотными катушками, для которой погрешность ряда измерений имеет величину порядка 0,01%, а максимальный разброс в ряду измерений составлял 0,04—0,06%, что в пять раз меньше соответствующих величин для другой установки.

5. Обе установки могут применяться для измерения напряженности постоянных магнитных полей до 14 000—15 000 э, а при кратковременных измерениях — до 22 000 э.

ВЫБОР МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ НАМАГНИЧИВАНИИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПЕРЕМЕННЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Процесс намагничивания материалов в постоянном магнитном поле наиболее просто описывается кривой зависимости магнитной индукции B от напряженности магнитного поля H . Имея в своем распоряжении материалы, в которых процесс намагничивания проходит необратимо, мы получаем эту зависимость неоднозначной. В настоящее время для определенности в качестве главных характеристик поведения материала в постоянном магнитном поле приняты основная и гистерезисная кривые намагничивания.

При переходе к периодически изменяющимся во времени намагничивающим полям, принципиально независимо от частоты их изменения, возникают новые явления, требующие и новых понятий для своего описания. В этом случае напряженность внешнего магнитного поля оказывается уменьшенной за счет противоположно направленного поля вихревых токов, и вместе с тем плотность магнитного потока по сечению магнитопровода становится неоднородной и с ростом частоты все в большей степени поток уплотняется к периферии сечения. Эти явления в совокупности обычно называются магнитным поверхностным эффектом.

В табл. 1 приводятся данные о величине усредненного значения индукции слоистых образцов с различной толщиной листов, изготовленных из углеродистой стали (сталь 3). Данные получены путем сопоставления результатов измерений на постоянном и переменном токах частотой 50 гц. Следует отметить, что магнитные свойства всех образцов при испытании на постоянном токе показали совпадение в пределах 2%.

Таблица 1

Магнитная индукция, гс	Напряженность внешнего намагничивающего поля, [*] а	Напряженность поля, эквивалентного действию вихревых токов, а (при толщине пластины, мм)				
		0,5	1,0	2,0	5,0	10,0
1000	0,60	0	0,1	0,3	0,9	1,7
2000	1,05	0	0,3	0,7	2,1	4,2
3000	1,40	0,1	0,5	1,3	3,9	7,3
4000	1,70	0,1	0,6	1,7	5,0	11,4
5000	2,00	0,1	0,8	2,2	8,5	16,5
6000	2,55	0,1	0,8	2,6	11,2	21,9

^{*} Напряженность поля, равная напряженности постоянного поля при том же значении индукции.

Как видно из табл. 1, величина уменьшения напряженности поля при условиях, благоприятных для развития вихревых токов, весьма велика. Кроме того, к свойствам материала как такового присоединяются свойства геометрической формы образца (толщина проката).

На рис. 1 приведена зависимость проницаемости от частоты для одного из образцов железо-никелевого сплава.

Проницаемость определялась как отношение амплитуд индукции и напряженности поля.

Циклическое перемагничивание материала и одновременное наличие вихревых токов, а также явления, связанные с остаточными изменениями его

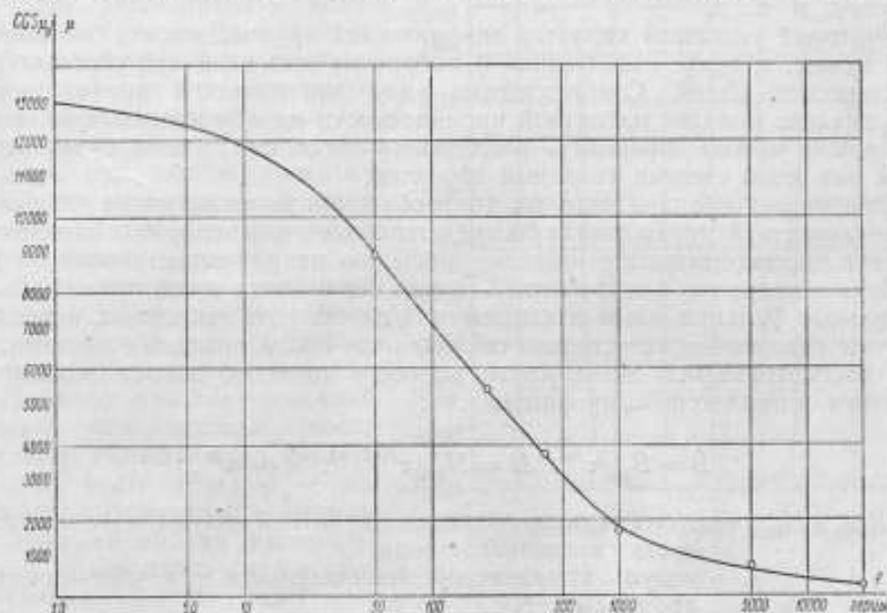


Рис. 1. Зависимость магнитной проницаемости образца железо-никелевого сплава от частоты при напряженности поля 0,5 э.

магнитного состояния после изменения напряженности магнитного поля, обуславливают затрату энергии на поддержание намагниченного состояния ферромагнитного материала. Эта энергия характеризуется величиной так называемых «потерь в железе» или потерь на гистерезис, вихревые токи и магнитное последствие [1]. Наличие потерь обуславливает фазовое несопадение кривых магнитной индукции и напряженности магнитного поля. При намагничивании материалов переменными магнитными полями мы имеем дело с некоторым интегральным эффектом. Естественно, что физический смысл понятий «напряженность поля», «магнитная индукция» и «магнитная проницаемость» изменяется по сравнению с тем, что мы имеем на постоянном токе, и можно говорить только о каких-то усредненных значениях напряженности поля и индукции, если не касаться изучения их значений от точки к точке и от момента к моменту. Конечно, для каждого отдельного момента времени мы можем свести все к намагничиванию постоянным током, но вряд ли в этом есть необходимость и целесообразность. Желая формально уподобить процесс намагничивания на переменном токе такому же процессу на постоянном токе, считают напряженность магнитного поля, вызывающую намагничение, равной внешнему полю, распределение индукции по сечению — однородным, а магнитную индукцию, и тем самым проницаемость, — зависящей от частоты намагничивающего поля и от степени расслоенности или раздробленности ферромагнитного материала.

Таким образом, может быть получена кривая зависимости магнитной индукции от напряженности внешнего намагничивающего поля, которая в общем виде носит название динамической кривой намагничивания. Эту кривую можно представить разнообразными способами в зависимости от того, какие будут приняты значения магнитной индукции и напряженности магнитного поля.

Действительно, можно говорить о зависимости максимального значения индукции от максимального значения напряженности поля, действующего значения индукции от действующего значения напряженности поля, действующих значений индукции и напряженности поля для основных гармонических и т. д.

Учитывая условный характер динамической кривой, все эти построения равноценны, и вопрос идет лишь о выборе из них наиболее удобных для практических целей. Соответственно виду динамической кривой может быть введено понятие магнитной проницаемости на переменном токе, которую также можно определить различными способами, и она будет иметь в той или иной степени условный характер.

Совершенно очевидно лишь то, что необходима такая величина магнитной проницаемости, которая давала бы представление о целом периоде намагничивания и соответствовала бы одному значению напряженности поля.

Имея в виду, что в современной теории переменных токов принято синусоидальные функции токов и напряжений изображать векторами, а последние уже совершенно естественно связываются с комплексными числами, то и в рассматриваемом нами круге вопросов целесообразно пользоваться понятием комплексной проницаемости:

$$\dot{B} = B_{\max} e^{j\omega t}; \quad \dot{H} = H_{\max} e^{j(\omega t - \varphi)}; \quad \mu = \mu e^{j\varphi},$$

где B_{\max} и H_{\max} — максимальные значения магнитной индукции и напряженности магнитного поля;

μ — модуль комплексной проницаемости или «динамическая проницаемость»;

φ — аргумент комплексной проницаемости.

Вопрос о проницаемости, как характеристике ферромагнитных материалов, наиболее полно рассмотрен в работах проф. В. К. Аркадьева [2], которым, в частности, уже в 1913 г. была высказана эта весьма интересная идея представления проницаемости в форме комплексного числа («комплексная проницаемость»).

В общем случае магнитная индукция и напряженность магнитного поля не являются синусоидальными функциями времени, и либо одна из них, либо обе они искажены. Таким образом, понятие о комплексной проницаемости применимо к некоторому идеализированному случаю или же к рассмотренно эквивалентных синусоид напряженности магнитного поля и магнитной индукции, заменяющих реальные периодические функции. Такая эквивалентность может быть установлена по различным признакам. Можно, как это делается в теории переменных токов, установить эквивалентность реальных кривых некоторым синусоидам, имеющим те же действующие значения. В этом случае модуль комплексной проницаемости будет равен

$$\mu = \mu_e = \frac{B_e \max}{H_e \max} = \frac{B_e}{H_e},$$

где B_e и H_e — действующие значения магнитной индукции и напряженности поля;

$B_e \max$ и $H_e \max$ — максимальные значения эквивалентных синусоид магнитной индукции и напряженности поля.

Возможно также определение модуля комплексной проницаемости в виде

$$\mu = \mu_1 = \frac{B_{1\max}}{H_{1\max}},$$

где $B_{1\max}$ и $H_{1\max}$ — максимальные значения первой гармоники индукции и напряженности магнитного поля.

В своем наиболее полном в настоящее время исследовании магнитного поверхностного эффекта Л. Р. Нейман именно так определяет модуль комплексной проницаемости [3].

Если рассматривать динамическую кривую (по аналогии с основной кривой на постоянном токе) как геометрическое место вершин нормальных гистерезисных петель, что можно сделать при слабом развитии вихревых токов, то такой выбор окажется наиболее физически оправданным.

При линейном характере зависимости между B и H все эти выражения для проницаемости совпадают, но уже для начального участка основной кривой намагничения, когда согласно Релею можно считать $\mu = \mu_0 + aH$ (где μ_0 — начальная проницаемость), между различными видами проницаемости будет иметь место расхождение.

Так, принимая $\mu_{\max} = 1,1$ для μ_e мы получим значение 0,86, а для μ_1 — 0,85.

Еще более резкое расхождение получим для кривой намагничения за областью начальной проницаемости.

На рис. 2 приведена кривая магнитной индукции в функции времени для образца углеродистой стали (слоистой) толщиной пластин 0,5 мм, для напряженности поля 15 э. Эта кривая с большой точностью может быть заменена трапецией, для которой, принимая $\mu_e = 1$, получим $\mu_{\max} = 1,25$ и $\mu_1 = 1,18$.

Подобные кривые были нами получены как экспериментально, так и расчетным путем для нескольких материалов. Так, например, на рис. 3 и 4 и в табл. 2 приводятся для углеродистой стали зависимости трех видов магнитной проницаемости в функции максимального значения напряженности магнитного поля.

Расчетные кривые были получены на основании обработки снятых на постоянном токе основных кривых и нормальных гистерезисных петель. По этим петлям были построены кривые зависимости $B = f(t)$, предполагая $H = H_{\max} \sin \omega t$. Далее были подсчитаны различные виды магнитной проницаемости, для чего при подсчете μ_1 было проведено разложение кривой на гармоники. Одновременно эти же характеристики были получены экспериментально. Действующие значения для B были получены путем обработки осциллограмм. Максимальное значение B_{\max} определялось по измеренному вольтметром среднему значению вторичной э. д. с., а $B_{1\max}$ — на основании

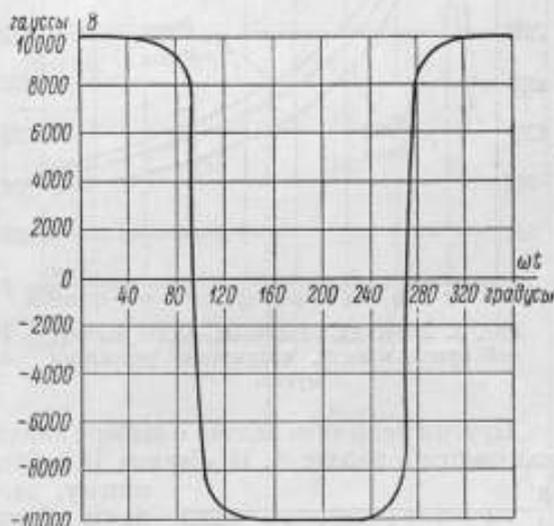


Рис. 2. Характер искажения кривой магнитной индукции.

¹ Под μ_{\max} понимается отношение действительных амплитуд индукции и напряженности поля.

тех же измерений компенсатором переменного тока. Напряженность поля, имея в виду ее синусоидальный характер при таких полях, подсчитывалась по измеренной силе тока.

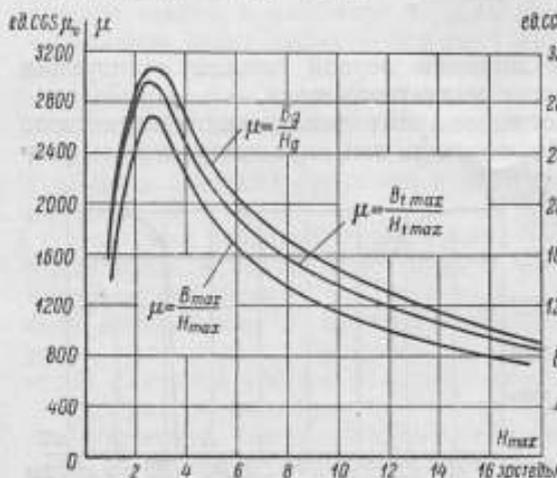


Рис. 3. Значения различных видов магнитной проницаемости, полученные расчетным путем.

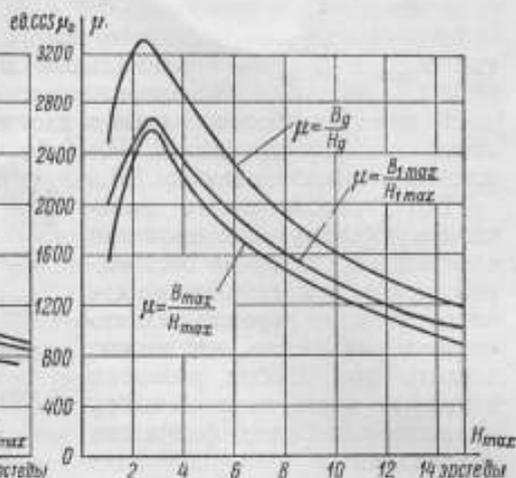


Рис. 4. Значения различных видов магнитной проницаемости, определенные экспериментально.

Другим решением задачи о выборе характеристик является путь, который излагается в работе М. И. Левина [4]. Следуя излагаемому М. И. Левиным методу, за основную характеристику нужно брать комплексное сопротивление переменному току.

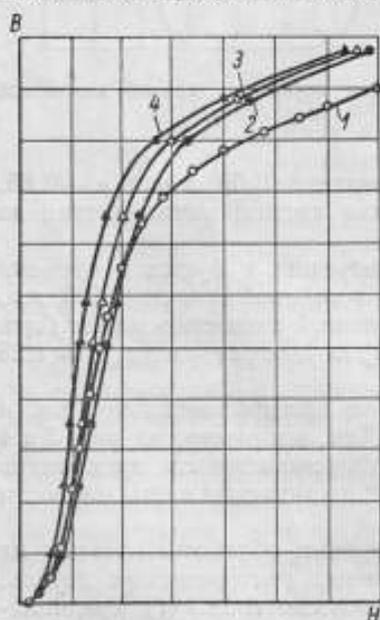


Рис. 5. Основные кривые намагничивания, определенные для различных значений напряженности магнитного поля.

Желание провести сопоставление различных обработанных результатов определения зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля нашло свое отражение в некоторых литературных источниках, из которых отметим работу Голла и Симса [5], а также Вебба и Форда [6]. В первой работе не дается определенных рекомендаций, а лишь приводится упомянутое сопоставление различных кривых зависимости магнитной индукции от напряженности поля на переменном токе.

Критерием правильности выбора кривых как в этой, так и в некоторых других работах является соответствие результатов измерений на постоянном и переменном токах низкой частоты.

Однако, даже установив такую принципиальную позицию, все же необходимо ответить еще на один вопрос: какую из составляющих напряженности поля следует считать за аргумент магнитной проницаемости или магнитной индукции при построении кривых $B = f(H)$ и $\mu = f(H)$.

В работе Голла и Симса с основной кривой 1 намагничивания на постоянном токе (рис. 5) сопоставляется зависимость максимального значения магнитной индукции от напряженности магнитного поля, подсчитанной по полному току I_0^* (кривая 2), от напряженности поля, подсчитанной по току I_0 .

Таблица 2

Напряженность магнитного поля, β	Магнитная проницаемость, ед. CGS_{em}				
	Вид проницаемости	Значение, полученное расчетным путем на основании кривых, снятых на постоянном токе	Значение, полученное из опыта снятия осциллограмм на переменном токе и их обработки		На постоянном токе
			для стали с толщиной проката листов 0,5 мм	для стали с толщиной проката листов 10 мм	
1	$\mu_{\text{max}} = \frac{B_{\text{max}}}{H_{\text{max}}}$	1600	1575	264	1600
	$\mu_e = \frac{B}{H}$	1755	2467	634	
	$\mu_1 = \frac{B_1}{H_1}$	1753	2000	300	
2	$\mu_{\text{max}} = \frac{B_{\text{max}}}{H_{\text{max}}}$	2600	2517	368	2450
	$\mu_e = \frac{B}{H}$	2943	3243	592	
	$\mu_1 = \frac{B_1}{H_1}$	2851	2500	350	
5	$\mu_{\text{max}} = \frac{B_{\text{max}}}{H_{\text{max}}}$	1800	1565	369	1800
	$\mu_e = \frac{B}{H}$	2288	2538	536	
	$\mu_1 = \frac{B_1}{H_1}$	2160	2120	380	
10	$\mu_{\text{max}} = \frac{B_{\text{max}}}{H_{\text{max}}}$	1170	1300	325	1250
	$\mu_e = \frac{B}{H}$	1472	1650	465	
	$\mu_1 = \frac{B_1}{H_1}$	1421	1420	340	
15	$\mu_{\text{max}} = \frac{B_{\text{max}}}{H_{\text{max}}}$	860	890	300	907
	$\mu_e = \frac{B}{H}$	1088	1222	413	
	$\mu_1 = \frac{B_1}{H_1}$	1047	1060	300	
20	$\mu_{\text{max}} = \frac{B_{\text{max}}}{H_{\text{max}}}$	690	720	291	720
	$\mu_e = \frac{B}{H}$	872	973	374	
	$\mu_1 = \frac{B_1}{H_1}$	832	860	275	

(кривая 3), равному полному току за вычетом составляющей тока, соответствующего потерям на вихревые токи, и, наконец, зависимость от напряженности поля, подсчитанной по реактивной составляющей тока I_p (кривая 4).

По замыслу авторов, эти сопоставления должны дать указания для выбора методики подсчета напряженности поля, при которой результаты измерений на переменном токе дадут наиболее близкое совпадение с данными, полученными на постоянном токе.

Рассмотрение приводимых в литературе данных позволяет сделать вывод, что наиболее близкое совпадение достигается в случае, когда напряженность поля подсчитывается по величине полного тока.

Настоящая работа имела целью рекомендовать выбор характеристики переменного намагничивающего поля.

Решение этого вопроса может быть получено, если провести измерение магнитной индукции при различном соотношении реактивной и активной составляющих тока, поддерживая в то же время постоянной величину напряженности поля при синусоидальном ее изменении. Для этой цели нами была выбрана следующая методика.

Испытуемый образец подвергался намагничиванию полем одной и той же напряженности (т. е. произведения силы тока на число витков), создаваемой различными токами при разном числе намагничивающих витков. Как показали результаты измерений, проведенных для различных сортов стали при одной и той же напряженности поля, подсчитанной по полному току, при различных соотношениях индуктивности и сопротивления, величина максимального значения переменной индукции остается практически одной и той же. Получаемые при намагничивании в таких условиях потери должны быть величиной постоянной, так как они соответствуют постоянному значению индукции (и напряженности поля), однако подсчитанное (или экспериментально определенное) сопротивление потерь не может являться характеристикой материала. Оно характеризует не только материал сердечника, а и всю катушку индуктивности, имеющую определенную намагничивающую обмотку. Характеристикой, которая может дать единообразное суждение о потерях материала при заданной индукции, может служить измеренное сопротивление потерь, отнесенное к квадрату числа витков намагничивающей обмотки.

Пусть эта величина будет r ; тогда сопротивление потерь в образце, имеющем w витков, может быть подсчитано как $w^2 r$, а потери в таком образце при прохождении через его обмотку тока I будут, пренебрегая потерями на вихревые токи в меди, равны

$$P = I^2 w^2 r.$$

При таком способе выражения потерь, они являются функцией намагничивающих ампервитков и «удельного» сопротивления потерь. Тогда, испытывая материал на переменном токе, мы можем строить кривую потерь в зависимости от магнитной индукции или же кривую «удельного» сопротивления потерь r в функции той же индукции.

Поставленные нами опыты должны были дать ответ на вопрос о выборе правильной характеристики напряженности поля не по сопоставлению с кривыми, снятыми на постоянном токе, а по сравнению результатов измерения индукции, полученных при различных сдвигах фаз между намагничивающим током и приложенным к обмотке образца напряжением (э. д. с.). Такой подход к выбору характеристики напряженности поля тем более правилен, что при переходе к измерениям на более высоких частотах сравнение с результатами, полученными на постоянном токе, теряет смысл, учитывая влияние вихревых токов.

Ниже приводятся результаты измерений магнитной индукции, полученные для образцов углеродистой стали одинакового сечения, но состоящих в одном случае из сплошного кольца, а в другом из 20 колец толщиной 0,5 мм каждое, но имеющих общую площадь такую же, как и сплошной образец.

Как показывают данные табл. 3, полученные при частоте 50 гц и синусоидальном токе, при изменении угла сдвига от 8 до 30°, т. е. при увеличении φ более чем в 3 раза, измеренное значение индукции колеблется около постоянной величины в пределах $\pm 3\%$, что должно быть отнесено к погрешностям измерения этой величины. Подобным образом можно установить, что амплитудные значения магнитной индукции при одной и той же напряженности

Таблица 3

Число намагничивающих витков	Сила тока полная I , а	Напряженность поля H_{max} , соответствующая силе тока I , а	Индуктивность образца L , мГ	Сопротивление активное R , ом	Сопротивление постоянному току R_0 , ом	Сопротивление потерь R_p , ом	$\sin \varphi$	φ	Максимальная индукция B_{max} , эс	Сопротивление потерь, отнесенное к квадрату числа витков, ом
1000	0,030	3,38	0,172	92,4	11,5	80,9	0,505	30°30'	1350	$8,1 \cdot 10^{-5}$
500	0,060	3,38	0,0430	27,5	5,5	22,0	0,444	26°30'	1360	$8,8 \cdot 10^{-5}$
100	0,30	3,38	0,00172	2,21	1,3	0,91	0,239	14°00'	1380	$9,1 \cdot 10^{-5}$
50	0,60	3,38	0,00043	0,904	0,69	0,214	0,148	8°30'	1340	$8,6 \cdot 10^{-5}$

Таблица 4

Число намагничивающих витков	Сила тока полная I , а	Напряженность поля H_{max} , соответствующая силе тока I , а	Индуктивность образца L , мГ	Сопротивление активное R , ом	Сопротивление постоянному току R_0 , ом	Сопротивление потерь R_p , ом	$\sin \varphi$	φ	Максимальная индукция B_{max} , эс	Сопротивление потерь, отнесенное к квадрату числа витков, ом
500	0,025	1,41	0,351	100	5,5	94,5	0,741	48°00'	3250	$3,8 \cdot 10^{-4}$
50	0,25	1,41	0,00351	1,79	0,69	1,10	0,525	31°30'	3430	$4,4 \cdot 10^{-4}$
10	1,25	1,41	0,00014	0,055	0,014	0,041	0,624	38°30'	3330	$4,1 \cdot 10^{-4}$

Таблица 5

Частота, Гц	Число намагничивающих витков	Сила тока полная I , а	Напряженность поля H_{max} , соответствующая силе тока I , а	Индуктивность образца L , мГ	Сопротивление активное R , ом	Сопротивление постоянному току R_0 , ом	Сопротивление потерь R_p , ом	$\sin \varphi$	φ	Максимальная индукция B_{max} , эс	Сопротивление потерь, отнесенное к квадрату числа витков, ом
1000	500	0,013	0,366	0,1052	543,3	7,2	536,1	0,809	54°	602	$2,1 \cdot 10^{-3}$
1000	126	0,0516	0,366	0,006683	33,36	0,15	33,21	0,819	55°	597	$2,1 \cdot 10^{-3}$
5000	500	0,010	0,282	0,04165	1586	7,2	1579	0,633	39°	207	$6,3 \cdot 10^{-3}$
5000	126	0,0397	0,282	0,00266	96,0	0,15	95,85	0,796	53°	208	$6,0 \cdot 10^{-3}$

Таблица 6

Напряженность магнитного поля, а	Магнитная проницаемость, ед. CGS μ_0 при	
	$H_{\sim} = H_{max} \sin \omega t$	$B_{\sim} = B_{max} \sin \omega t$
	Сталь 94	
0,2	1100	1100
0,4	2300	2330
0,8	4160	4090
1,2	4240	4150
1,6	3980	3970
2,0	3690	3690
2,4	3400	3400

Таблица 7

Напряженность магнитного поля, а	Магнитная проницаемость, ед. CGS μ_0 при	
	$H_{\sim} = H_{max} \sin \omega t$	$B_{\sim} = B_{max} \sin \omega t$
	Сталь ХВП	
0,10	7400	7220
0,20	13700	12750
0,30	17250	16800
0,40	19100	19100
0,50	19350	19680
0,60	18850	19300
0,70	18000	18650

Таблица 8

Таблица 9

Напряженность магнитного поля, э	Магнитная проницаемость, ед. CGS μ_0 при		Напряженность магнитного поля, э	Магнитная проницаемость, ед. CGS μ_0 при	
	$H_m = H_{max} \sin \omega t$	$B_m = B_{max} \sin \omega t$		$H_m = H_{max} \sin \omega t$	$B_m = B_{max} \sin \omega t$
Молибденовый пермаллой № 1			Молибденовый пермаллой № 3		
0,10	24 500	25 400	0,04	63 000	58 000
0,18	30 500	28 800	0,06	68 100	64 600
0,24	24 600	23 600	0,08	63 700	62 000
0,30	19 700	20 000	0,12	50 500	49 600
0,40	15 500	16 400	0,16	40 500	40 400
0,50	13 450	13 600	0,20	34 400	34 000
0,80	8 600	8 500			
1,00	6 900	7 000			

Примечание. Данные проницаемости, начиная с $H_{max} = 0,25$ э, соответствуют искаженной кривой индукции.

Таблица 10

Напряженность магнитного поля, э	Магнитная проницаемость, ед. CGS μ_0 при		Напряженность магнитного поля, э	Магнитная проницаемость, ед. CGS μ_0 при	
	$H_m = H_{max} \sin \omega t$	$B_m = B_{max} \sin \omega t$		$H_m = H_{max} \sin \omega t$	$B_m = B_{max} \sin \omega t$
Молибденовый пермаллой № 3					
0,04	65 300	64 500	0,10	56 500	57 000
0,05	67 000	66 900	0,12	50 000	50 000
0,06	66 800	67 400	0,14	45 200	45 400
0,07	65 300	66 000	0,16	41 700	42 200
0,08	63 000	63 100	0,18	38 600	38 500
0,09	59 800	59 800	0,20	36 000	36 000

Примечание. Размагничивание проведено особо тщательно.

поля не зависят от величины сдвига фаз в цепи. Те же измерения, проведенные для образца углеродистой стали, составленного из 20 колец, показали подобные же результаты (табл. 4). В табл. 5 приводятся аналогичные данные, полученные при частоте 1000 и 5000 гц.

Таким образом, как с точки зрения соответствия кривых, снятых при малых частотах, кривым, снятым на постоянном токе, так и с точки зрения постоянства соотношения магнитной индукции и напряженности поля (т. е. постоянства проницаемости при одном и том же значении индукции) в основу определения основной кривой на переменном токе должна быть положена напряженность намагничивающего поля, подсчитываемая по полному току.

Как известно, для получения численного значения проницаемости безразлично, снимать ли зависимость $B = f(H)$ при синусоидаль-

ном характере индукции или напряженности поля. Однако этот вопрос требует уточнения.

Если отвлечься от возможного несовпадения максимумов индукции и напряженности магнитного поля, то для зависимостей $B_{\max} = f(H_{\max})$ мы должны ожидать совпадения их для случаев как синусоидальной индукции, так и синусоидальной напряженности поля. При низких частотах это действительно имеет место с достаточно большой точностью.

В табл. 6, 7, 8, 9 и 10¹ и соответственно на рис. 6, 7, 8, 9 и 10 приводится сопоставление результатов определения проницаемости при частоте 50 гц, полученных как при синусоидальном изменении напряженности магнитного поля, так и при синусоидальном изменении индукции для стали Э4, стали ХВП и молибденового пермаллоя. Во всех случаях расхождения значений проницаемости, вычисленной как отношение максимального значения индукции к максимальному значению напряженности магнитного поля, не превосходят 5—6%, а для сталей ХВП

Таблица 11

Напряженность магнитного поля H	Магнитная проницаемость, ед. CGS μ_0 при	
	$H_{\sim} = H_{\max} \sin \omega t$	$B_{\sim} = B_{\max} \sin \omega t$
Молибденовый пермаллой		
0,20	4150	4300
0,30	4530	4660
0,40	4770	4910
0,50	4990	5120
0,60	5180	5300

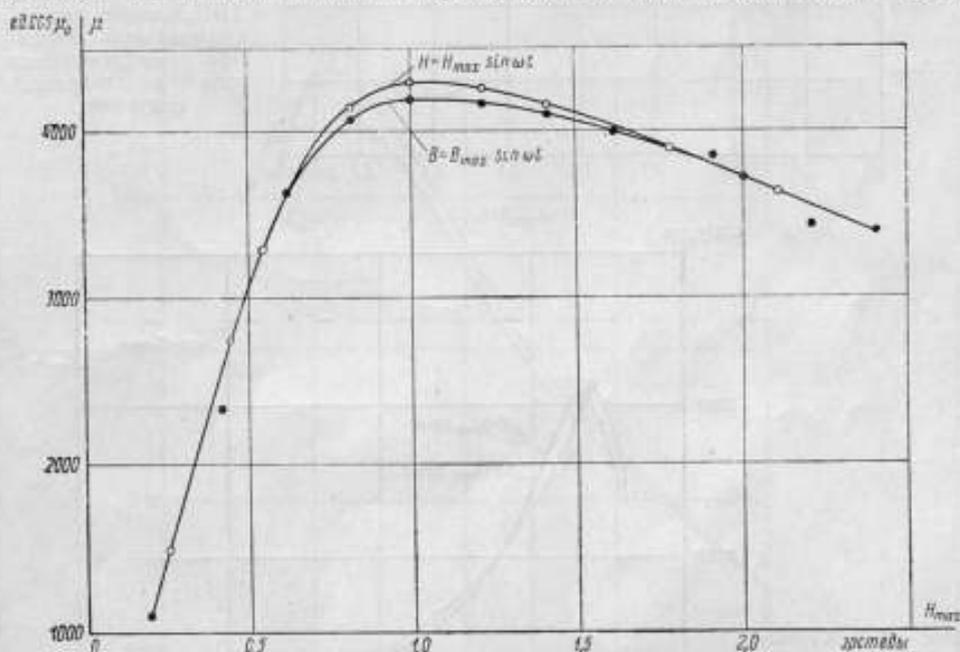


Рис. 6. Кривые проницаемости для стали Э4, снятые при синусоидальном характере напряженности поля и магнитной индукции.

и Э4 они значительно меньше. Следует отметить, что эти расхождения не носят закономерного характера и, очевидно, объясняются другими причинами (недостаточное размагничивание и т. п.).

¹ В табл. 6—11 для напряженности магнитного поля взяты максимальные значения, для магнитной проницаемости — отношение $\mu_{\max} = \frac{B_{\max}}{H_{\max}}$

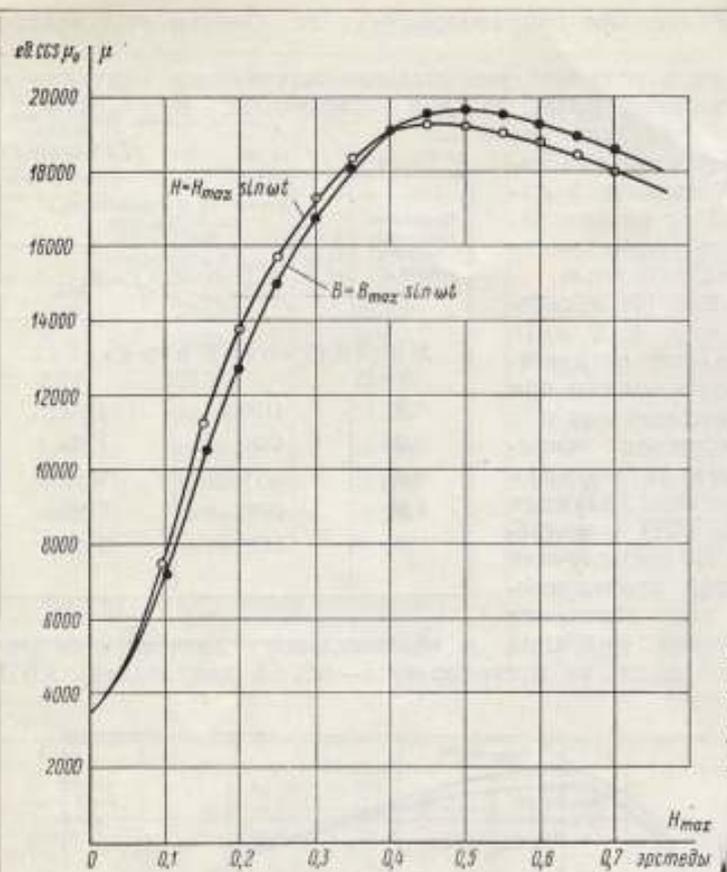


Рис. 7. Кривые [проницаемости для стали ХВП, снятые при синусоидальном характере напряженности поля и магнитной индукции.

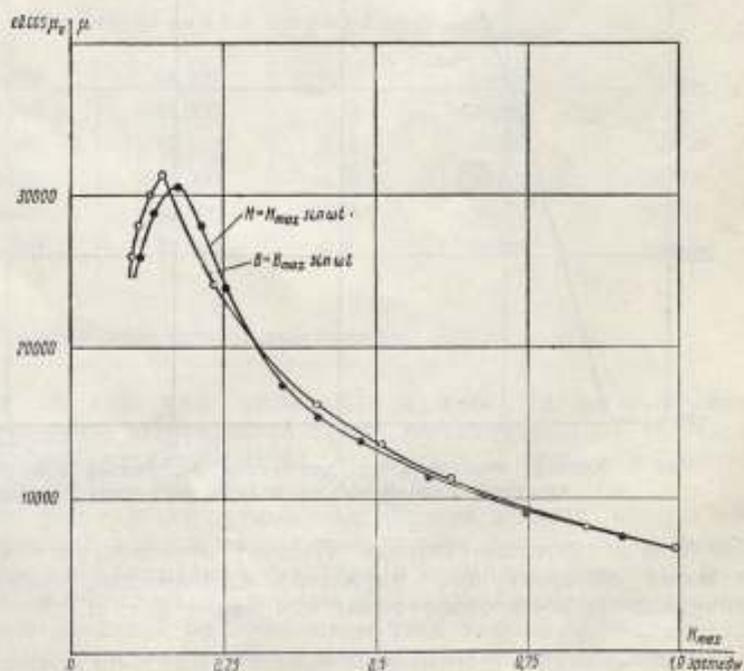


Рис. 8. Кривые проницаемости для молибденового пермаллоя, снятые при синусоидальном характере напряженности поля и магнитной индукции.

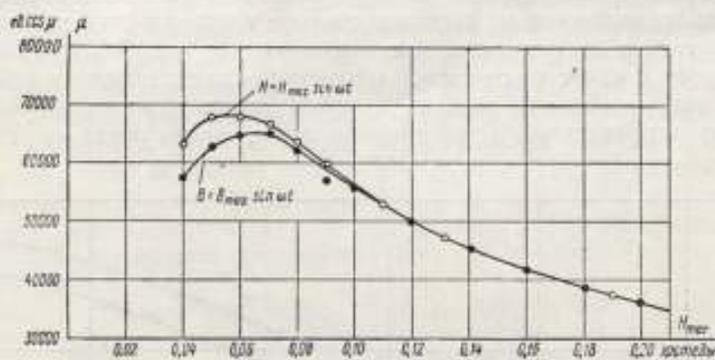


Рис. 9. Кривые проницаемости для молибденового пермаллоя, снятые при синусоидальном характере напряженности поля и магнитной индукции.

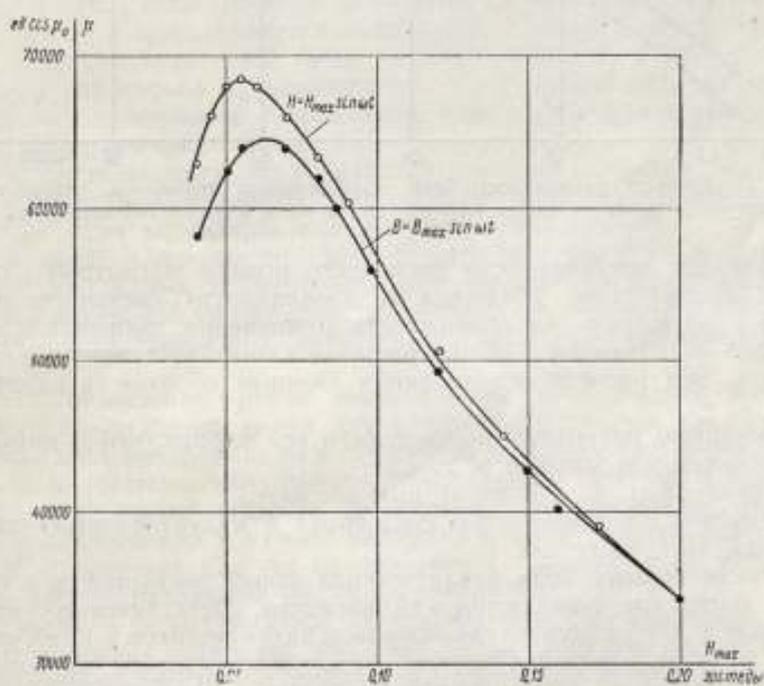


Рис. 10. Кривые проницаемости для молибденового пермаллоя, снятые при синусоидальном характере напряженности поля и магнитной индукции.

Такого же рода результаты были получены для молибденового пермаллоя и при частоте 1000 гц (табл. 11 и рис. 11).

Значительно большее расхождение мы получим, если в качестве модуля комплексной проницаемости примем отношение амплитуд первой гармонической магнитной индукции и напряженности магнитного поля.

Таким образом, с точки зрения определенности физического соответствия процессу намагничивания на постоянном токе и оценки свойства материала, работающего при переменном намагничивании, наиболее оправданным является выбор в качестве основной магнитной характеристики комплексной магнитной проницаемости, модуль которой равен отношению максимумов индукции и напряженности магнитного поля, а аргумент — углу сдвига

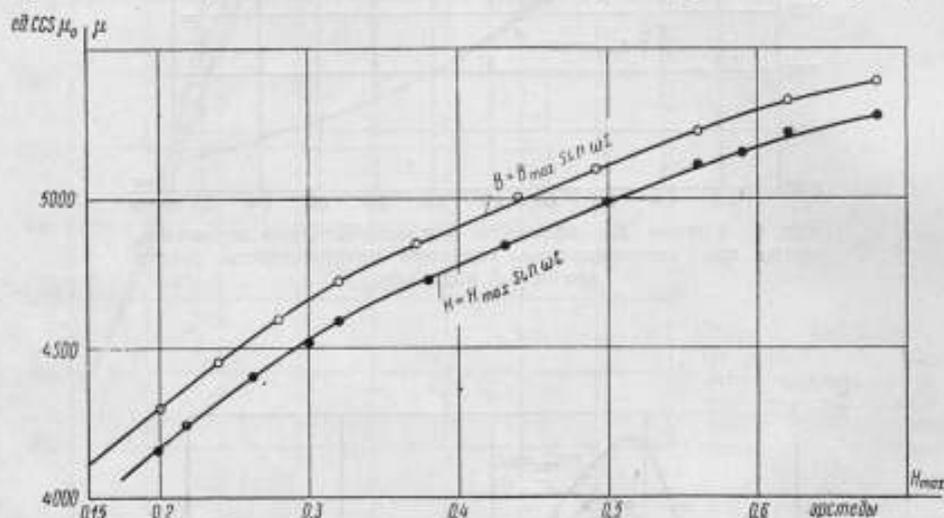


Рис. 11. Кривые проницаемости для молибденового пермаллоя, снятые при синусоидальном характере напряженности поля и магнитной индукции.

между кривыми напряженности магнитного поля и магнитной индукции.

Чтобы окончательно убедиться в правильности сделанного выбора, необходимо посмотреть на возможность применения выбранной характеристики для использования ее при расчетах главнейших электромагнитных механизмов. Эти расчеты основываются главным образом на зависимостях между:

- переменным магнитным потоком (или его плотностью) и индуцируемой им в некотором контуре э. д. с.;
- переменной м. д. с. и магнитным потоком;
- магнитной проницаемостью сердечника и индуктивностью катушки, содержащей этот сердечник.

Для связи первого вида аналитическая форма зависимости неизвестна и расчет носит графо-аналитический характер. Действительно, известно, что значение э. д. с., индуцируемой в одном витке сечением в 1 см^2 , сцепляющимся с потоком, плотность которого имеет максимальное значение B_{max} , при любом характере намагничивания связана соотношением:

$$E_{\text{ср}} = 4B_{\text{max}} \cdot f \cdot 10^{-8};$$

$$E = 4k_f \cdot f \cdot B_{\text{max}} \cdot 10^{-8},$$

где $E_{\text{ср}}$ и E — среднее и действующее значения э. д. с. в вольтах.

Задаваясь величиной напряженности поля, можно по кривой намагничивания легко определить B_{max} , а следовательно, подсчитать и $E_{\text{ср}}$. Также просто подсчитывается величина E , если задаться синусоидальным режимом

магнитного потока. Совершенно неопределенным остается расчет E , если условия намагничивания соответствуют синусоидальному режиму напряженности поля или какому-либо другому режиму, отличному от синусоидального изменения потока. Тогда, принципиально, зная гистерезисную кривую и основную кривую и пренебрегая влиянием вихревых токов, можно провести подсчет функции $e = f(t)$, а следовательно, определить и ее действующее значение. Однако, во-первых, такое пренебрежение не всегда допустимо, а во-вторых, расчет приобретает весьма громоздкий характер. Следует заметить, что какую бы из кривых зависимости $B = f(H)$ и $\mu = f(H)$ мы ни принимали в основу расчета, все они окажутся недостаточными для аналитического проведения расчета. Таким образом, только выбор проницаемости того или иного вида не может решить эту задачу. Проще отказаться в этом случае от расчета действующего значения э. д. с. по кривой намагничивания, а определять зависимость э. д. с. в одном витке, охватывающем сердечник из испытуемого материала сечением 1 см^2 , от напряженности намагничивающего сердечник поля¹.

Естественно, что эти испытания должны проводиться при синусоидальном режиме индукции или напряженности поля.

Некоторая неуверенность относительно предполагаемой формы кривой индукции или напряженности поля у конструктора все же остается, но она неизбежна и здесь должен привлекаться имеющийся предыдущий опыт.

В случае наличия синусоидальной индукции, как уже было сказано, этот подсчет может быть проведен аналитически по кривой зависимости $B_{\text{max}} = f(H)$, если известна эта связь. Следует отметить, что возможность подсчета и здесь является кажущейся, так как при синусоидальном потоке напряженность поля будет несинусоидальной, и мы опять будем вынуждены обратиться к эксперименту. Для других упомянутых выше зависимостей относительно безразлично, какую из характеристик мы положим в основу расчета.

В некоторых случаях для проведения расчетов требуется знание особых характеристик (как например, для зондов), и тогда, естественно, предполагаемая нами характеристика является недостаточной.

Таким образом, при расчете электромагнитных механизмов, работающих в условиях, отличных от синусоидального режима, ни один из рассмотренных видов магнитной проницаемости не имеет существенного преимущества и наиболее целесообразной является обобщенная вольт-амперная характеристика.

Если в отношении кривой намагничивания, т. е. модуля комплексной проницаемости, удастся найти характеристику, которая не зависела бы от режима намагничивания, то в отношении потерь на гистерезис, вихревые токи и последствие, являющихся эквивалентом аргумента комплексной проницаемости, такое решение неизвестно. Действительно, содержание высших гармонических в кривой индукции при синусоидальной напряженности поля означает как бы одновременное существование циклического намагничивания различной частоты и амплитуды.

Последним и весьма важным обстоятельством, на основании которого может быть сделан выбор той или иной характеристики, является возможность достаточно простого и вместе с тем достаточно точного ее экспериментального определения.

Рассмотрение этого вопроса² показывает, что с точки зрения методики измерения характеристика μ_{max} является для практики наиболее удобной.

¹ Вольт-амперная характеристика $E = F\left(\frac{A\omega}{L}\right)$. Один виток и сечение в 1 см^2 определяют лишь результат подсчета, а испытания можно проводить при любом сечении и числе витков.

² См. статью настоящего сборника, стр. 83

1. В качестве основных характеристик поведения магнитных материалов при намагничивании переменными полями могут быть рекомендованы:

а) динамическая кривая намагничивания $B_{\max} = f(H_{\max})$, снятая безотносительно к форме кривых $B = f(t)$ и $H = f(t)$. С точки зрения удобства может быть рекомендовано определение ее при синусоидальной форме H ;

б) зависимость удельных потерь $p = f(B_{\max})$, снятая при синусоидальной форме индукции или к ней приведенная аналитически.

2. Снятие этих двух характеристик равнозначно определению комплексной магнитной проницаемости, соответствующей синусоидам B и H , эквивалентным по максимальному значению реальным кривым индукции и напряженности поля.

3. Наряду с этими основными характеристиками, полезной для расчетов является зависимость $E = f(H)$, т. е. зависимость э. д. с., возникающей в одном витке, охватывающем сердечник из данного материала, имеющий сечение в 1 см^2 , в котором существует магнитное состояние, соответствующее заданной по всем показателям напряженности поля H .

4. При желании характеризовать потери величиной «сопротивления потерь» целесообразно пользоваться сопротивлением потерь, отнесенным к квадрату числа витков намагничивающей обмотки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Becker R., Probleme der technischen Magnetisierungskurve, J. Springer, z. 93, 1938.
2. Аркадьев В. К., Теория электромагнитного поля в ферромагнитных металлах, ЖРФО, 1913, стр. 312—344.
3. Нейман Л. Р., Поверхностный эффект в ферромагнитных телах, Госэнергоиздат, 1949.
4. Левин М. И., Труды МЭИ, вып. 3, 1948.
5. Gall and Sims, On the Theory and Measurements of the Magnetic properties of Iron, J. I. E. E., v. 74, 1934, p. 453.
6. Webb C. E. and Ford L. H., Alternating — Current permeability and the Bridge Method. The Journal of the I. E. E., 1935, v. 76, p. 185.

**О ВЫБОРЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ
НАМАГНИЧИВАНИИ ПОСТОЯННЫМ И ПЕРЕМЕННЫМ
МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ**

Вопрос определения магнитных характеристик ферромагнитных материалов, намагничиваемых одновременно переменным и постоянным полями, неоднократно находил отражение в трудах различных авторов [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8], однако достаточной ясности в отношении нормализации этих характеристик еще нет. Как правило, в рассматриваемом случае используют не отдельную кривую, как это делается при намагничивании материала только переменным полем, а семейство функциональных зависимостей, причем разные авторы используют различные параметры, что затрудняет сравнение полученных характеристик. Основные требования, которые целесообразно предъявить к магнитным характеристикам при одновременном действии на материал постоянного и переменного полей, кратко можно свести к следующим:

1. Характеристики должны отражать особенности работы материала в рассматриваемых условиях, т. е. характеризовать его как таковой, независимо от конструкции того или иного намагничивающего устройства, и, кроме того, должны быть пригодными для использования при расчетах соответствующих электромагнитных устройств.

2. Экспериментальное определение характеристик должно обеспечивать требуемую практикой точность и в то же время должно быть доступным для промышленных предприятий, занимающихся разработкой и выпуском материалов и устройств, работающих в условиях комбинированного намагничивания.

Для того, чтобы обоснованно выбрать магнитную характеристику материала, целесообразно установить связь между электрическими характеристиками того или иного устройства (для сердечника которого предназначен испытываемый материал) и магнитными параметрами материала.

В табл. I приведены функциональные зависимости основных электрических характеристик от магнитных параметров материала сердечника для ряда устройств, работающих в условиях одновременного действия постоянного и переменного полей.

Из таблицы видно, что большинство электрических расчетных характеристик устройств является функциями магнитной проницаемости материала сердечника μ , вычисленной по переменным составляющим магнитной индукции и напряженности поля, и напряженности постоянного поля H_0 . Естественно поэтому, что наиболее удобной является зависимость

$$\mu = f(H_0).$$

Выбор напряженности постоянного поля в качестве независимой переменной вполне согласуется с реальными условиями работы материала в

Таблица 1

Наименование устройства, работающего в условиях одновременного действия постоянного и переменного полей	Наименование и обозначение основной электрической характеристики устройства	Вид функции
Дроссели насыщения, служащие для регулирования	Коэффициент регулирования по мощности (K_{pM}) Коэффициент регулирования по току (K_{pI})	$K_{pM} = f_1(\mu, H_0)$ $K_{pI} = f_2(\mu, H_0)$
Магнитные усилители	Коэффициент усиления по мощности (K_{yM}) Коэффициент усиления по напряжению (K_{yU}) Крутизна характеристики (S) Внутреннее реактивное сопротивление (X_p) Проницаемость (D) ¹	$K_{yM} = f_3(\mu, H_0)$ $K_{yU} = f_4(B, H_0)$ $S = f_5(\mu, H_0)$ $X_p = f_6(\mu)$ $D = f_7(B, H_0)$
Магнитные зонды, основанные на изменении индуктивности	Индуктированная э. д. с. на выходе зонда	$f(\mu, H_0)$
Магнитные зонды, основанные на удвоении частоты, и удвоители частоты	Вторая гармоника индуктированной э. д. с. на выходе зонда	$B_{2\max} = f_8(H_0)$
Трансформаторы постоянного тока	Действительный коэффициент трансформации (K_m)	$K_m = f_9(\mu, H_0)$

¹ Термин «проницаемость» установлен в литературе по аналогии с таким же термином в вакуумной технике.

том или ином устройстве, так как в большинстве из них изменение проницаемости материала сердечника обуславливается именно изменениями напряженности постоянного поля при фиксированных значениях напряженности переменного поля или переменной составляющей индукции.

Зависимость $\mu = f(H_0)$ может быть использована для характеристики материала, предназначенного для изготовления сердечников большинства устройств, работающих с «подмагничиванием» постоянным полем. Исключения составляют удвоители частоты и зонды, основанные на удвоении частоты, для которых главной магнитной характеристикой является зависимость амплитудного значения второй гармоники индукции $B_{2\max}$ от напряженности постоянного поля, т. е.

$$B_{2\max} = f(H_0).$$

Эта зависимость только тогда будет однозначно характеризовать материал, когда будут вполне определенными условия ее измерения, в первую очередь форма волны переменных составляющих напряженности магнитного поля и магнитной индукции. Формально зависимость проницаемости от напряженности постоянного поля можно получить для любой формы кривой магнитной индукции и напряженности поля, однако для того, чтобы характеристики были однозначными и сравнимыми, необходимо задаться одной, вполне определенной, формой волны. Останемся на синусоидальной форме кривой. В тех же случаях, когда магнитный материал работает в условиях искажения кривых напряженности поля и магнитной индукции,

следует условно относить его работу либо к синусоидальной индукции, либо к синусоидальной напряженности магнитного поля в зависимости от того, к какому предельному режиму ближе рассматриваемый реальный случай.

Таким образом, как при испытании ферромагнитного материала, так и при расчете устройств, сердечник которых намагничивается одновременно постоянным и переменным полями, необходимо иметь в виду зависимость характеристик от формы кривых напряженности поля и магнитной индукции. Это особенно существенно именно в условиях одновременного намагничивания сердечника постоянным и переменным полями, так как в отличие от намагничивания образца одним переменным полем величина проницаемости в этом случае зависит от формы кривой напряженности магнитного поля и магнитной индукции.

Для подтверждения этого положения на рис. 1 приведены кривые зависимости проницаемости от напряженности постоянного поля для стали марки Э4 при частоте 50 гц и сумме амплитуд напряженности переменного поля, равной $H_{max} + H_{min} = 4,0$ э.¹

Расхождение значений проницаемости при разных режимах изменения B и H заставляет применять два вида семейств магнитных характеристик:

$$\mu = f(H_0) \text{ при } H_0 = H_{max} \cdot \sin \omega t$$

и

$$\mu = f(H_0) \text{ при } B_0 = B_{max} \cdot \sin \omega t,$$

где H_0 и B_0 — мгновенные значения переменной составляющей напряженности магнитного поля и магнитной индукции.

Чтобы характеристика $\mu = f(H_0)$ была вполне определенной, необходимо, помимо формы волны переменных составляющих, установить постоянство одного из значений этих составляющих.

Зависимость величины проницаемости от того, какой из переменных параметров поддерживается неизменным при определении каждой из кривых, иллюстрируется рис. 2, на котором представлены экспериментально полученные кривые зависимости проницаемости от напряженности постоянного поля для стали Э4 при частоте 50 гц. Результаты этих исследований показали, что при изменении напряженности переменного поля по синусоидальному закону различные изменения напряженности постоянного поля заметно сказываются лишь на сумме амплитуд переменной составляющей индукции и практически не влияют на величину напряженности синусоидального

¹ Проницаемость определялась как отношение сумм амплитуд индукции и напряженности поля.

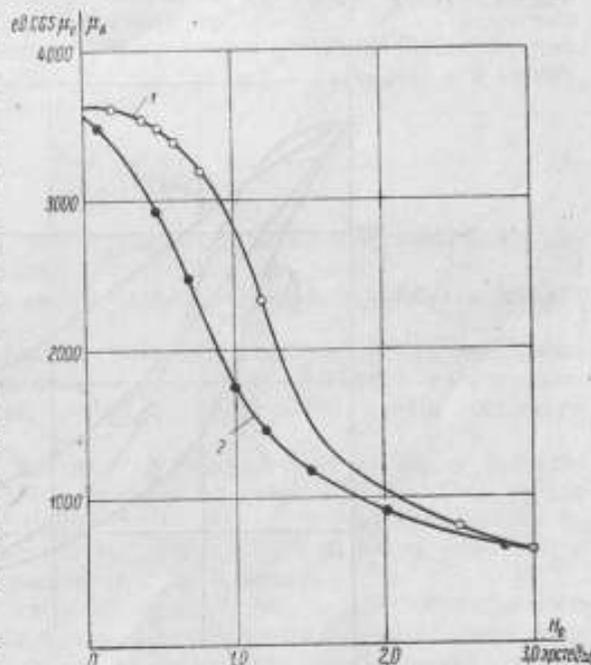


Рис. 1. Кривые зависимости проницаемости от напряженности постоянного поля:

1 — при $H_0 = H_{max} \cdot \sin \omega t$; 2 — при $B_0 = B_{max} \cdot \sin \omega t$.

поля. В то же время при синусоидальном характере изменения магнитной индукции изменения напряженности постоянного поля существенно сказываются на сумме амплитуд переменной составляющей напряженности поля, практически не влияя на величину переменной составляющей магнитной индукции. Следовательно, при синусоидальной напряженности поля естественным путем поддерживается постоянная амплитуда напряженности поля, при синусоидальной же индукции — амплитуда переменной составляющей индукции.

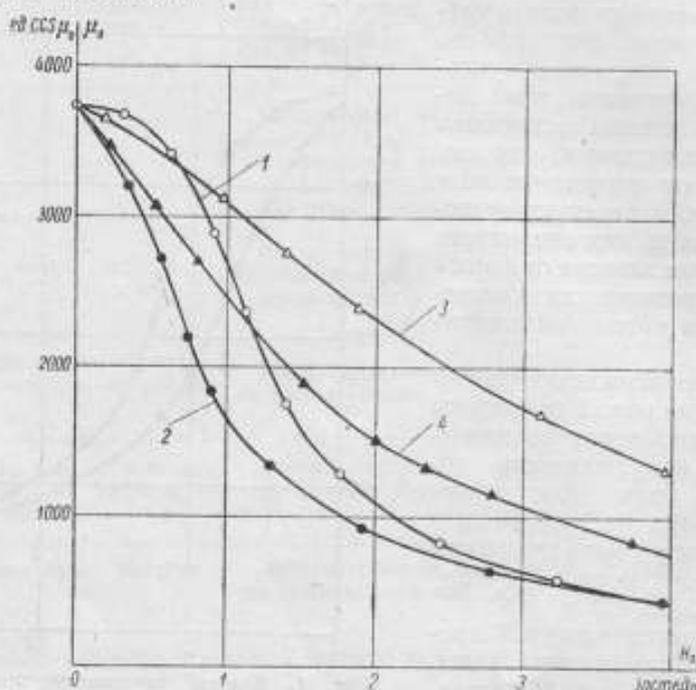


Рис. 2. Кривые зависимости проницаемости от напряженности постоянного поля:

1 — при $H_{\sim} = H_{\max} \sin \omega t$ и $H_{\Delta} = \text{const}$; 2 — при $B_{\sim} = B_{\max} \sin \omega t$ и $H_{\Delta} = \text{const}$; 3 — при $H_{\sim} = H_{\max} \sin \omega t$ и $B_{\Delta} = \text{const}$; 4 — при $B_{\sim} = B_{\max} \sin \omega t$ и $B_{\Delta} = \text{const}$; при $H_0 = 0$ сумма амплитуд напряженности поля для всех кривых $H_{\Delta} = 4,0$ э.

Выбрав в качестве основных характеристик зависимости вида

$$\left. \begin{aligned} \mu &= f(H_0) \text{ при } H_{\sim} = H_{\max} \cdot \sin \omega t \text{ и } H_{\max} = \text{const} \\ \mu &= f(H_0) \text{ при } B_{\sim} = B_{\max} \cdot \sin \omega t \text{ и } B_{\max} = \text{const} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

получим характеристики, отражающие свойства магнитного материала в рабочих условиях, причем все измерения можно производить при изменении только постоянного тока, практически не регулируя переменный. Если же в процессе эксперимента поддерживать постоянной сумму амплитуд несинусоидальной переменной составляющей индукции B_{Δ} (кривая 3, рис. 2) или же сумму амплитуд переменной составляющей напряженности поля H_{Δ} (кривая 2), то при изменении напряженности постоянного поля указанные суммы амплитуд естественным путем не сохраняются неизменными и для обеспечения этого приходится регулировать переменный ток. При этом изменения магнитного состояния материала усложняются, так как в процессе регулирования переменного тока происходят необратимые изменения, которые могут вызвать появление дополнительных погрешностей измерения.

Все сказанное выше и заставляет остановиться на двух семействах характеристик, представленных выражением (1).

При испытании ферромагнитных материалов на переменном токе чаще всего пользуются проницаемостью μ_1 , определенной по первым гармоникам индукции и напряженности поля, эффективной μ_e или μ_d на симметричном цикле при любой степени насыщения¹. Последний вид проницаемости получил широкое распространение в практике, так как эта проницаемость позволяет характеризовать свойства магнитного материала в реальных условиях работы при наличии значительных искажений кривых индукции и напряженности переменного поля. Определяется эта проницаемость как отношение проекции частного цикла на ось ординат к проекции его на ось абсцисс и вычисляется по формуле:

$$\mu_d = \frac{B_{\max} + B_{\min}}{H_{\max} + H_{\min}} \quad (2)$$

где B_{\max} и H_{\max} — наибольшие амплитудные значения индукции и напряженности поля;

B_{\min} и H_{\min} — наименьшие амплитудные значения индукции и напряженности поля.

Асимметрия кривых переменных составляющих индукции или напряженности магнитного поля требует либо определения амплитуд положительной и отрицательной полуволи, либо непосредственно суммы амплитуд переменных составляющих.

Назовем проницаемость на частном несимметричном цикле, в соответствии с терминологией ГОСТ 6896, средней проницаемостью. Она лучше других видов проницаемости отражает процесс изменения магнитного состояния образца по частной несимметричной гистерезисной петле, так как в расчетную формулу ее входят координаты этой петли.

Применяя эквивалентность сложной кривой некоторой синусоиде того же максимального значения, получим, что рассматриваемая средняя проницаемость будет представлять собою модуль комплексной проницаемости.

Аналогично тому, как при намагничивании полем одной частоты используется понятие комплексной проницаемости [9], модуль которой определяется как отношение максимальных значений первых гармоник индукции и напряженности поля, в рассматриваемом случае сложного намагничивания также можно пользоваться этой характеристикой.

Помимо проницаемости, определяемой по первым гармоникам индукции и напряженности магнитного поля, на практике для расчетов магнитных цепей пользуются также проницаемостью, определяемой по формуле:

$$\mu_e = \frac{B_e}{H_e},$$

где

$$B_e = \frac{E \cdot 10^8}{4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot s};$$

$$H_e = \frac{0,4 \cdot \sqrt{2} \cdot \pi \cdot w_1 \cdot I}{l};$$

E — э. д. с., индуцированная в измерительной обмотке на образце (действующее значение);

f — частота намагничивающего переменного тока;

I — сила намагничивающего тока (действующее значение);

¹ μ_1 , μ_e и μ_d даны в соответствии с определениями ГОСТ 6896.

l — длина пути магнитного потока в образце;
 s — площадь сечения образца;
 w_2 — число витков измерительной обмотки;
 w_1 — число витков намагничивающей обмотки.

Лишь при синусоидальном характере изменения намагничивающего тока и индуктированной э. д. с. величины B_e и H_e представляют собою амплитудные значения индукции и напряженности поля. Поскольку обычно либо кривая индукции, либо кривая напряженности поля несинусоидальны, то выбор проницаемости $\mu_e = \frac{B_e}{H_e}$ не всегда целесообразен, так как она представляет собой некоторый коэффициент, не имеющий определенного

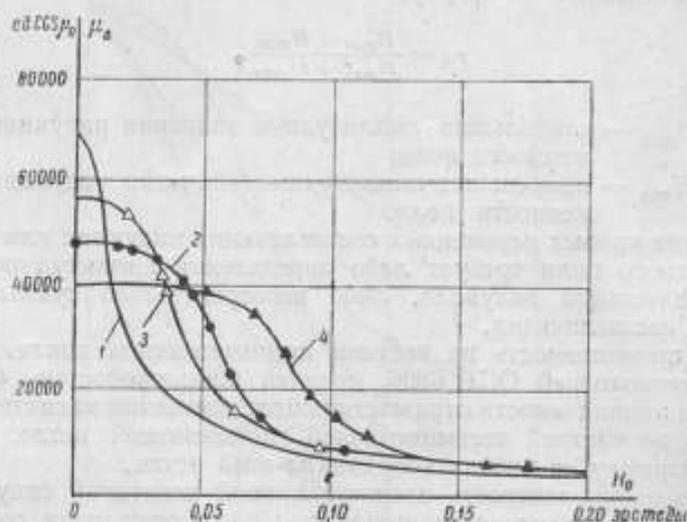


Рис. 3. Семейство кривых зависимости средней проницаемости от напряженности постоянного поля:

$$1 - H_{\max} = 0,047 \text{ э}; \quad 2 - H_{\max} = 0,105 \text{ э}; \quad 3 - H_{\max} = 0,082 \text{ э}; \\ 4 - H_{\max} = 0,135 \text{ э}.$$

физического значения. С этой точки зрения лучше использовать проницаемость на частной несимметричной петле [1], так как она сохраняет определенный смысл при любых искажениях кривых напряженности поля и индукции и дает представление о свойствах материала при наложении на постоянное поле переменного.

Таким образом, в условиях одновременного действия постоянного и переменного полей для характеристики магнитных свойств материалов целесообразно иметь два вида семейств характеристик, выраженных формулами (1), причем в качестве проницаемости, являющейся функцией напряженности постоянного и переменного полей, выбираем среднюю проницаемость μ_a , определяемую формулой (2).

На рис. 3 в качестве примера приведено семейство подобных характеристик, полученное для молибденового пермаллоя на частоте 50 гц при синусоидальном характере изменения напряженности магнитного поля. Кривая 1 соответствует такой амплитуде напряженности магнитного поля, при которой (в случае отсутствия постоянного поля) проницаемость достигает максимума. Именно на этой кривой наиболее заметно сказывается воздействие постоянного поля, заключающееся в значительном падении средней проницаемости при увеличении напряженности постоянного поля.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аркадьев В. К., Электромагнитные процессы в металлах, ч. 1, ОНТИ, 1936, стр. 117.
2. Гроскауфман Б. О., Кирко И. М., Пекелис З. Э., Янушевский В. А., Труды института физики АН Латвийской ССР, вып. III, 1952.
3. Carter R. O. and Richards D. L., The Incremental magnetic properties of silicon-iron alloys, Proc. Inst. El. Eng., v. 97, p. 11, № 56, 1950.
4. Михайлова Е. К., Труды ВНИИМ, вып. 14 (74), 1953.
5. Негневичий И. Б., Панина И. К., Мищенко В. П., «Электричество» № 3, 1953, стр. 63.
6. Розенблат М. А., ЖТФ, т. XVIII, вып. 6, 1948, стр. 765.
7. Розенблат М. А., Магнитные усилители, Госэнергоиздат, 1949.
8. Sims L. G. A., The specification of magnetic Qualities Engineering, v. 140, 1935, p. 290.
9. Нейман Л. Р., Поверхностный эффект в ферромагнитных телах, Госэнергоиздат, 1949.

Младш. Инженер

Козаря

Козаря
(Козаря).

ИСКАЖЕНИЕ КРИВЫХ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ И Э. Д. С.

При расчете цепей переменного тока с нелинейными элементами (трансформаторы со стальным сердечником, дроссели, ферромагнитные умножители частоты, ферромагнитные стабилизаторы напряжения) необходимо знание спектрального состава кривых тока, потока или э. д. с. в различных режимах намагничивания, при которых находятся сердечники нелинейных индуктивных сопротивлений.

В настоящей статье рассматриваются изменения кривых потока и э. д. с. катушек, содержащих ферромагнитные сердечники, в функции намагничивающего тока, а также дается численная оценка как величины отдельных гармоник искаженных кривых, так и коэффициентов, определяющих степень искажения кривых магнитного потока.

Ввиду того, что магнитная индукция трудно определяется непосредственно, для подсчета ее измерялась э. д. с. само- или взаимной индукции. Эта э. д. с. является, кроме того, практически используемым в ряде электромагнитных механизмов результатом наличия магнитного состояния сердечника и, следовательно, представляет самостоятельный интерес.

При оценке погрешностей измерения (как например, при замене полной кривой ее первой гармонической) необходимо знать спектральные составы кривых магнитной индукции и индуктируемой ею э. д. с. и соотношение между ними.

Учитывая, что наиболее простым является создание условий намагничивания при синусоидальном характере напряженности поля, мы в дальнейшем общими положениями будем иллюстрировать на примере именно этого случая намагничивания.

СВОЙСТВА КРИВЫХ ПРАВИЛЬНОЙ ФОРМЫ. БЛИЗКИХ КРИВЫМ ИНДУКЦИИ И Э. Д. С.

Спектральный состав

Процесс намагничивания переменным полем наиболее просто можно представить себе как непрерывное смещение точки, характеризующей магнитное состояние материала, по гистерезисным петлям в соответствии с характером переменного намагничивающего тока.

Предположим, что в цепи ферромагнетика созданы условия, затрудняющие развитие вихревых токов, и влиянием их можно пренебречь. Рассмотрим случай, когда намагничивающий ток изменяется по гармоническому закону.

В очень слабых магнитных полях, когда магнитная проницаемость может быть принята постоянной величиной, магнитная индукция будет также изменяться по гармоническому закону. В этом идеализированном случае индукция определяется вполне однозначно, и магнитная проницаемость на переменном токе численно совпадает с ее значением на постоянном токе.

Предположим далее, что в слабых магнитных полях при отсутствии гистерезиса проницаемость изменяется пропорционально напряженности поля (рис. 1), т. е.

$$\mu = \mu_0 + aH,$$

где μ_0 — начальная проницаемость;
 a — постоянная Релея.

Если же в слабых полях предположить наличие гистерезиса, то при гармоническом характере изменения напряженности поля выражение для

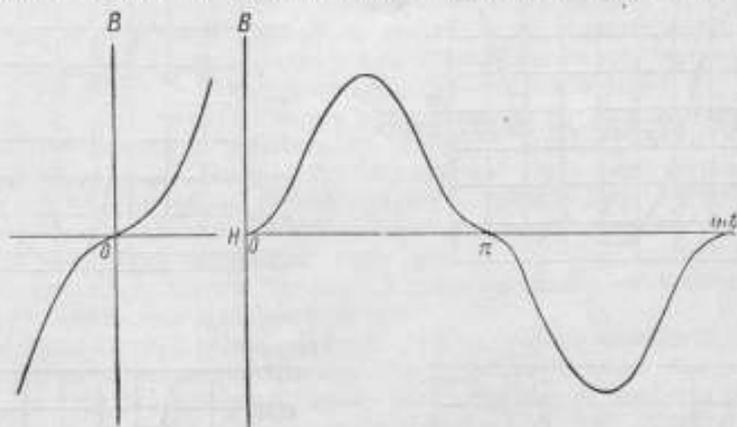


Рис. 1. Кривая магнитной индукции в слабых магнитных полях ($\mu = \mu_0 + aH$).

возрастающей и ниспадающей ветвей петли гистерезиса по закону Релея примет вид:

$$B = \mu H_{\max} \cos \omega t \pm b \sin^2 \omega t,$$

где b — остаточная индукция ланцетовидной петли гистерезиса.

Разложение в ряд дает для магнитной индукции выражение

$$B = \mu H_{\max} \cos \omega t + \frac{8b}{3\pi} \sin \omega t - \frac{8b}{\pi} \frac{1}{1 \cdot 3 \cdot 5} \sin 3\omega t - \\ - \frac{8b}{\pi} \frac{1}{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7} \sin 5\omega t + \dots,$$

что свидетельствует о появлении, по сравнению с предыдущим случаем, высших гармоник.

При безгистерезисном намагничивании форма кривой магнитной индукции в функции времени по мере роста напряженности магнитного поля меняется от синусоидальной формы к трапециoidalной и может быть выражена аналитически на участке до насыщения как

$$B = \frac{B_{\max}}{1,56} \arcsin \frac{H}{H_{\max}}$$

и при насыщении как

$$B = B_{\max}.$$

Таким образом, при отсутствии явлений гистерезиса и вихревых токов с каждым мгновенным значением напряженности магнитного поля может быть однозначно сопоставлено мгновенное значение магнитной индукции.

Наличие гистерезиса изменяет положение и обуславливает отставание момента прохождения кривой потока через нуль от момента прохождения через нуль кривой тока. Угол сдвига при этом пропорционален потерям на гистерезис.

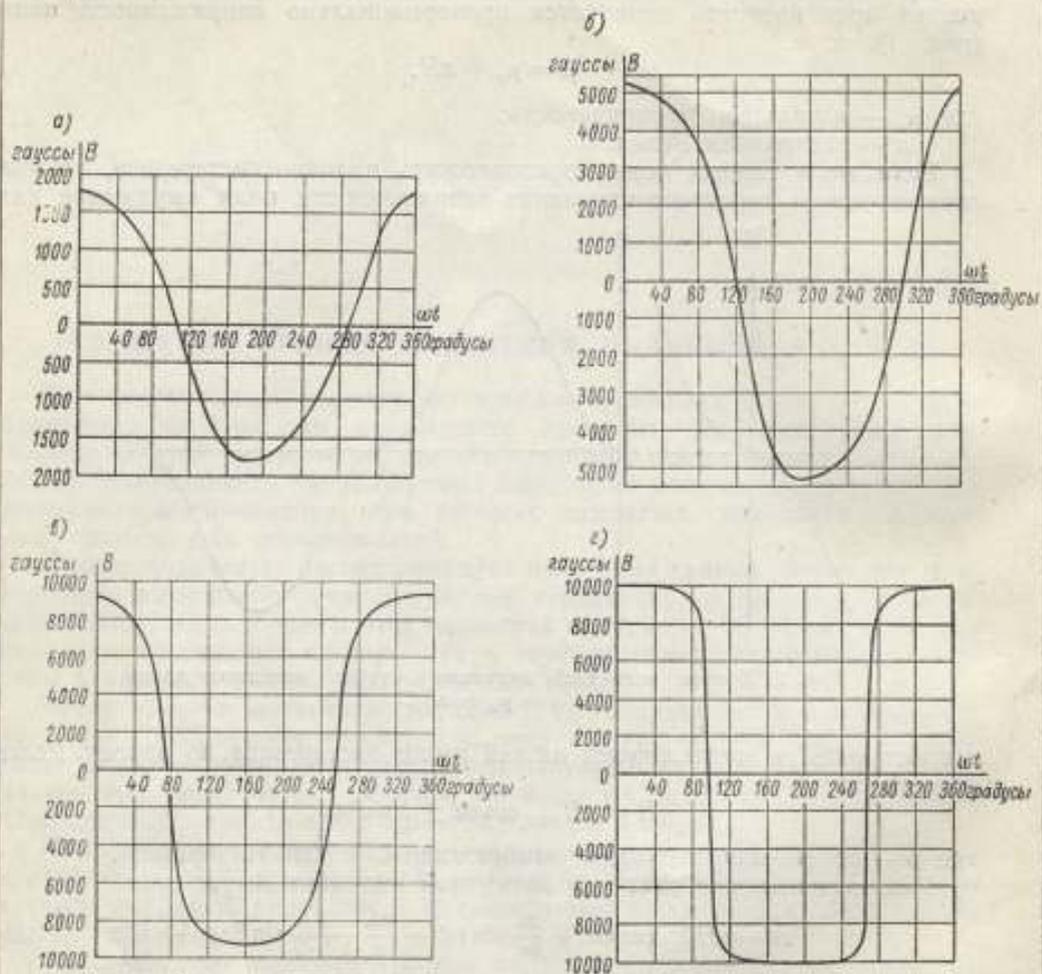


Рис. 2. Кривые магнитной индукции при росте напряженности магнитного поля: а — $H_{max} = 1$ э; б — $H_{max} = 2$ э; в — $H_{max} = 10$ э; г — $H_{max} = 15$ э.

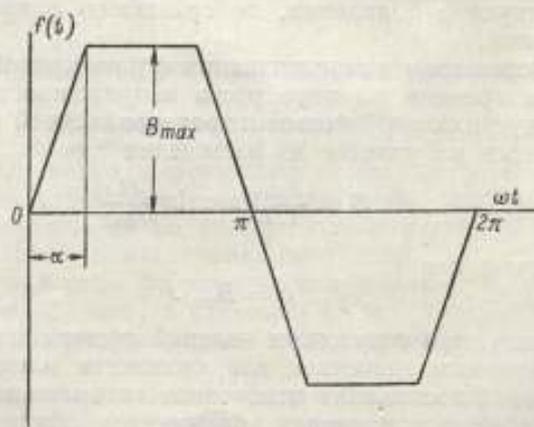


Рис. 3. Трапецидальная кривая.

Ввиду того, что зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля, осложняемая явлениями гистерезиса, имеет нелинейный характер, мы никогда не будем иметь ни синусоидального характера напряженности магнитного поля, ни синусоидального характера индукции. Практически, однако, с достаточной степенью приближения можно осуществить режим намагничивания, когда несинусоидальна одна из этих величин.

Чтобы вернуться к синусоидальным функциям индукции и напряженности магнитного поля, можно разложить сложные кривые тока и потока и, выделив основные составляющие, в дальнейшем оперировать уже с ними. С этой же целью пользуются понятием комплексной или эллиптической проницаемости, которая определяется как отношение между векторами эквивалентной индукции и эквивалентной напряженности поля.

В этом случае истинная кривая гистерезисной петли заменяется некоторым эллипсом, наклон и большая ось которого определяются соотношением между активной и реактивной составляющими тока, коэрцитивной силой и остаточной индукцией, наличием вихревых токов и другими параметрами.

К предельным случаям намагничивания следует отнести синусоидальный режим намагничивающего тока (напряженности магнитного поля) и режим синусоидального потока, а следовательно, и соответствующей ему э. д. с. само- или взаимной индукции.

Рассмотрим первый режим. На рис. 2 представлено изменение кривой магнитной индукции (магнитного потока) в функции времени при разных значениях амплитуды синусоидального намагничивающего тока (напряженности магнитного поля). Сопоставим кривые магнитной индукции и э. д. с. с кривыми, имеющими определенное аналитическое выражение. Как следует из рассмотрения этих кривых, характер их изменяется от формы, приближающейся к трапеции (рис. 3), до прямоугольной формы.

Разложение, соответствующее форме трапеции, имеет вид:

$$f(t) = \frac{4B_{\max}}{\pi} \left(\sin \alpha \cdot \sin \omega t + \frac{1}{9} \sin 3\alpha \cdot \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\alpha \cdot \sin 5\omega t + \dots + \frac{1}{n^2} \sin n\alpha \cdot \sin n\omega t + \dots \right).$$

В частном случае, когда $\alpha = \frac{\pi}{2}$, трапеция превращается в равнобедренный треугольник, для которого

$$f(t) = \frac{8B_{\max}}{\pi^2} \left(\sin \omega t - \frac{1}{9} \sin 3\omega t + \frac{1}{25} \sin 5\omega t + \dots + \frac{1}{n^2} \sin n\omega t + \dots \right).$$

При $\alpha = 0$ имеем прямоугольник, для которого

$$f(t) = \frac{4B_{\max}}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \dots + \frac{1}{n} \sin n\omega t + \dots \right).$$

Спектральный состав этих кривых представлен данными табл. 1 и рис. 4, где приведены амплитуды различных гармоник, выраженные в процентах от амплитуды полной кривой, а также табл. 2 и рис. 5, где те же величины выражены в процентном отношении к первой гармонике.

В своей работе [1] проф. Л. Р. Нейман, определяя соотношение между статическим намагничиванием (постоянный ток) и намагничиванием на переменном токе, устанавливает, что в случае синусоидального характера изменения напряженности магнитного поля

$$\mu_{\theta} = \mu_{cm} \cdot 1,20,$$

где $\mu_{\theta} = \frac{B_{1\max}}{H_{1\max}}$ — комплексная проницаемость;

$\mu_{cm} = \frac{B}{H}$ — проницаемость на постоянном токе.

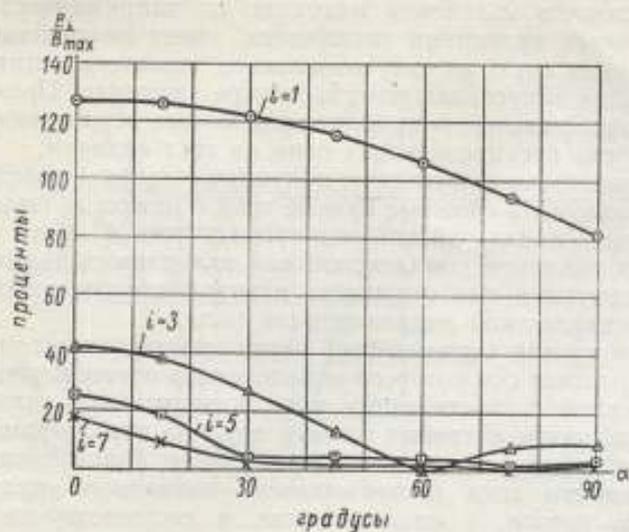


Рис. 4. Кривые отношения амплитуд отдельных гармоник к амплитуде полной кривой индукции в функции угла α для трапецидальных кривых.

Рис. 5. Кривые отношения амплитуд высших гармоник к амплитуде первой гармоники кривой индукции в функции угла α для трапецидальных кривых.

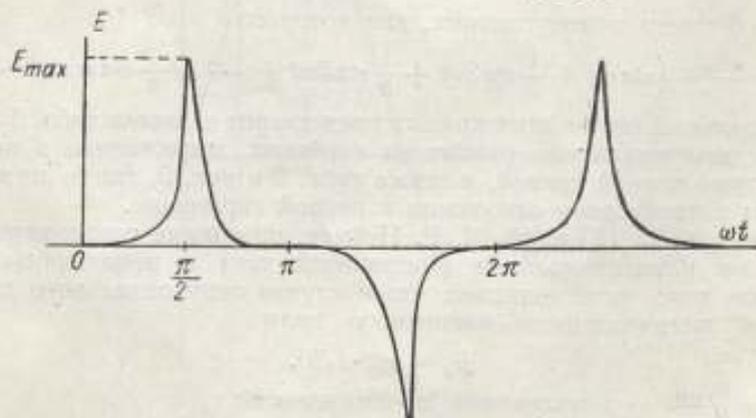
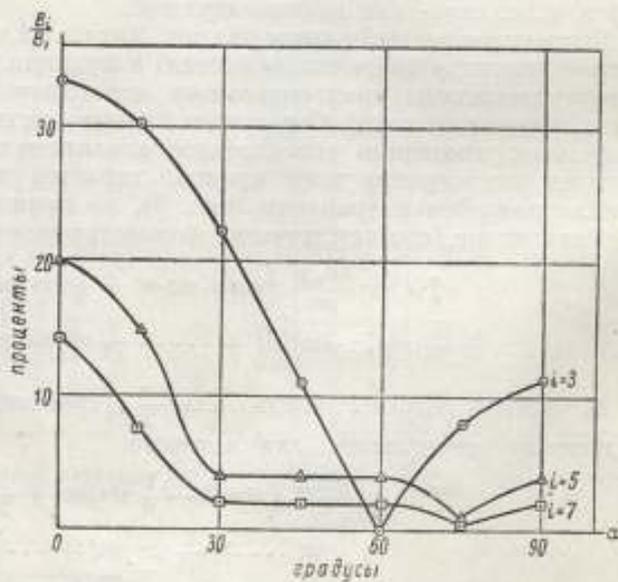


Рис. 6. Кривая э. д. с. в функции времени для одного из образцов.

Проф. Нейман указывает, что это соотношение справедливо лишь в области за «коленом» кривой намагничивания.

Из данных табл. 1, начиная с α порядка 40° и ниже, видно, что относительные амплитуды первой гармоники индукции к амплитуде полной кривой как бы стремятся к насыщению и имеет порядок $1,20 \left(\frac{B_{\max}}{B_{\max}} = 120 \div 127\% \right)$, т. е. совпадает со значением, приведенным выше в формуле.

В отличие от магнитной индукции таких простых соотношений, какие даны проф. Нейманом для э. д. с., установить не удастся, и замена полной э. д. с. ее первой гармонической не может быть проведена даже при скромных требованиях к точности. Это обстоятельство объясняется сглаживанием высших гармонических при интегрировании функции э. д. с.

Ввиду того, что непосредственно измеряемой величиной является не магнитная индукция, а производная от нее — э. д. с., — существенно рассмотреть изменение последней в функции напряженности поля.

По мере роста напряженности поля кривая э. д. с. меняется от синусоидальной формы к заостренной, имеющей вид импульса (рис. 6).

Разложение идеализированной кривой (рис. 7) дает выражение

$$f(t) = \frac{4}{\pi} A_{\max} \left(\cos \beta \cdot \sin \omega t + \frac{1}{3} \cos 3\beta \cdot \sin 3\omega t + \right. \\ \left. + \frac{1}{5} \cos 5\beta \cdot \sin 5\omega t + \dots + \frac{1}{n} \cos n\beta \sin n\omega t + \dots \right), \quad (1)$$

которое в частном случае при $\beta = 0$ соответствует рассмотренному выше случаю, когда $\alpha = 0$.

Задаваясь различными значениями β , получим ряд величин $f(t)$. Амплитуды отдельных гармоник приведены в табл. 3.

В табл. 4 и на рис. 8 даны эти же значения, выраженные в процентах по отношению к первой гармонике.

Уравнение (1), естественно, близко соответствует производной, взятой для функции, графически выражаемой трапецией, т. е.

$$\frac{df}{dt} = \frac{4B_{\max}\omega}{\pi} \left(\sin \alpha \cdot \cos \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\alpha \cdot \cos 3\omega t + \right. \\ \left. + \frac{1}{5} \sin 5\alpha \cdot \cos 5\omega t + \dots + \frac{1}{n} \sin n\alpha \cdot \cos n\omega t + \dots \right).$$

Задаваясь различными значениями α , получаем спектральный состав кривых э. д. с., соответствующий различным формам кривой индукции (табл. 5 и 6 и рис. 9).

Из анализа идеализированных кривых магнитной индукции (кривых трапеции) можно установить, что с ростом напряженности поля (т. е. с уменьшением угла α) удельный вес амплитуды первой гармоники возрастает по сравнению с амплитудой сложной кривой; при значении угла $\alpha = 60^\circ$ эти амплитуды оказываются равными друг другу, а далее амплитуда первой гармоники уже превосходит амплитуду полной кривой.

Амплитуды высших гармонических никогда не превосходят амплитуды полной кривой. Следует отметить особое поведение третьей гармоники, которая имеет значение амплитуды, равное нулю при $\alpha = 60^\circ$.

Рассмотрим также поведение идеализированных кривых э. д. с. Параметром, по изменению которого целесообразно проследить изменение кривых, является величина β (рис. 7). С ее возрастанием амплитуды всех гармоник выравниваются друг по отношению к другу. Амплитуда первой гармоники э. д. с. при малых значениях β превышает амплитуду полной кривой, при

Таблица 1

α , градусы	Форма кривой	Амплитуды отдельных гармоник по отношению к амплитудному значению всей кривой $\frac{B_i \max}{B_{\max}}$, %			
		$i=1$	$i=3$	$i=5$	$i=7$
90	Треугольник	81	9,0	3,2	1,6
75	Трапеция	94	7,6	1,0	0,5
60	Трапеция	105	0	4,2	2,1
45	Трапеция	115	12,7	4,6	2,3
30	Трапеция	121	27,0	4,8	2,5
15	Трапеция	126	38,2	18,8	9,6
0	Прямоугольник	127	42,3	25,4	18,1

Таблица 2

α , градусы	Форма кривой	Амплитуды отдельных гармоник по отношению к амплитуде первой гармоники $\frac{B_i \max}{B_1 \max}$, %		
		$i=3$	$i=5$	$i=7$
90	Треугольник	11,1	4,0	2,0
75	Трапеция	8,1	1,1	0,5
60	Трапеция	0	4,0	2,0
45	Трапеция	11,0	4,0	2,0
30	Трапеция	22,3	4,0	2,0
15	Трапеция	30,3	14,9	7,6
0	Прямоугольник	33,3	20,0	14,2

Таблица 3

β , градусы	Ширина импульса, градусы	Амплитуда отдельных гармоник по отношению к амплитудному значению всей кривой $\frac{A_i \max}{A_{\max}}$, %			
		$i=1$	$i=3$	$i=5$	$i=7$
0	180	127	42,3	25,4	18,1
30	120	110	0	22,0	15,7
45	90	90,0	30,0	18,0	12,8
60	60	63,5	42,5	12,7	9,1
80	20	22,2	21,3	19,5	17,0
85	10	11,1	11,0	10,8	10,5

Таблица 4

β, градусы	Амплитуды отдельных гармоник по отношению к амплитуде первой гармоники $\frac{A_i \max}{A_1 \max}, \%$		
	i = 3	i = 5	i = 7
0	33,3	20,0	14,2
30	0	20,0	14,3
45	33,3	20,0	14,2
60	69,2	20,7	14,3
80	96,0	88,0	77,0
85	99,0	97,0	95,0

Таблица 5

α, градусы	Амплитуды отдельных гармоник по отношению к амплитудному значению всей кривой $\frac{E_i \max}{E_{\max}}, \%$			
	i = 1	i = 3	i = 5	i = 7
0	127	127	127	127
15	126	115	94	67,1
30	121	81	24,2	17,3
45	115	38	23,0	16,1
60	105	0	21,0	14,7
75	94	22,9	5,0	3,5
90	81	27,0	16,2	11,6

Таблица 6

α, градусы	Амплитуды отдельных гармоник по отношению к амплитуде первой гармоники $\frac{E_i \max}{E_1 \max}, \%$		
	i = 3	i = 5	i = 7
0	100	100	100
15	91,3	74,6	53,2
30	66,9	20,0	14,3
45	33,1	20,0	14,0
60	0	20,0	14,0
75	24,4	5,3	3,7
90	33,3	20,0	14,3

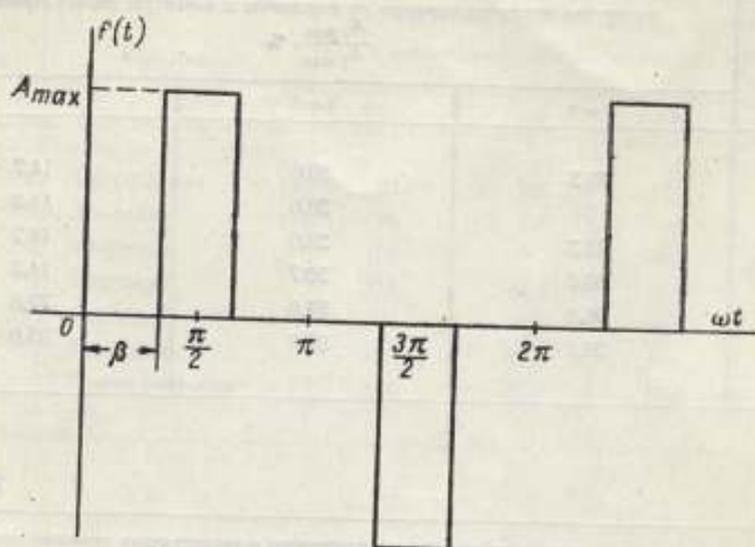


Рис. 7. Прямоугольная импульсная кривая.

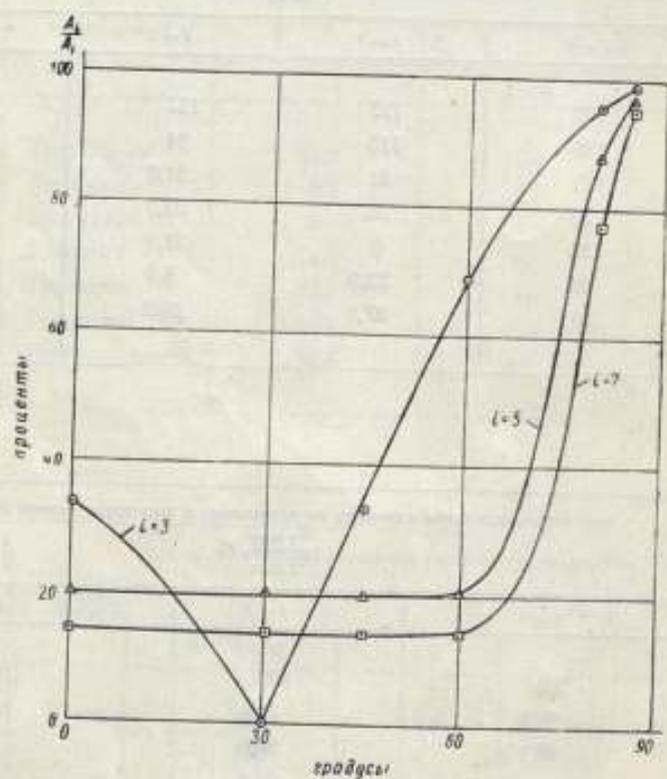


Рис. 8. Кривые отношения амплитуд высших гармоник к амплитуде первой гармоники в функции угла α для прямоугольной импульсной кривой.

значении $\beta \approx 40^\circ$ становится ей равной и далее уменьшается. Следует также отметить наличие особой точки для третьей гармоники, амплитуда которой равна 0 при $\beta = 30^\circ$.

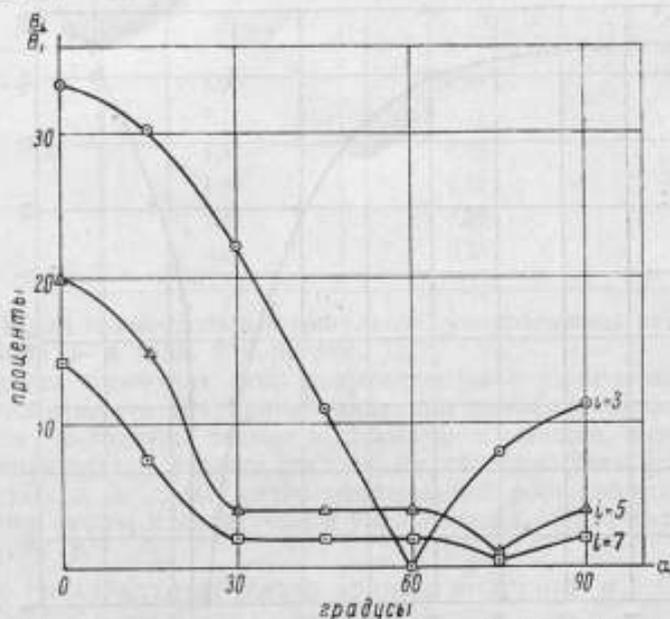


Рис. 9. Кривые отношения амплитуд высших гармоник к амплитуде первой гармоники в функции угла α , полученные дифференцированием трапециодальных кривых.

Сравнение данных табл. 4 и 6 и экспериментально полученных осциллограмм э. д. с. показывает, что при насыщении спектральный состав кривых э. д. с. похож на случай, когда $\beta \approx 85^\circ$ (табл. 4) или $\alpha = 5-10^\circ$ (рис. 9).

Коэффициенты, характеризующие форму кривых

В качестве характеристик формы кривой, как известно, служат коэффициенты формы, амплитуды и искажений¹; в отношении последнего иногда применяется неправильный термин «клир-фактор».

Для упомянутых выше кривых правильной формы, подобных кривым индукции, эти коэффициенты имеют значения, приведенные в табл. 7 и

Таблица 7

α, градусы	Вид кривой	Коэффициент формы $k_f = \frac{B}{B_{cp}}$	Коэффициент искажения $k_d = \frac{B_1}{B}$	Коэффициент амплитуд $k_A = \frac{B_{max}}{B}$
90	Треугольник	1,15	0,98	1,73
75	Трапеция	1,14	1,00	1,49
60	Трапеция	1,12	1,00	1,34
45	Трапеция	1,10	1,03	1,23
30	Трапеция	1,06	0,98	1,13
15	Трапеция	1,03	0,95	1,06
0	Прямоугольник	1,00	0,90	1,00

¹ Отношение действующего значения основной гармоники к действующему значению всей кривой.

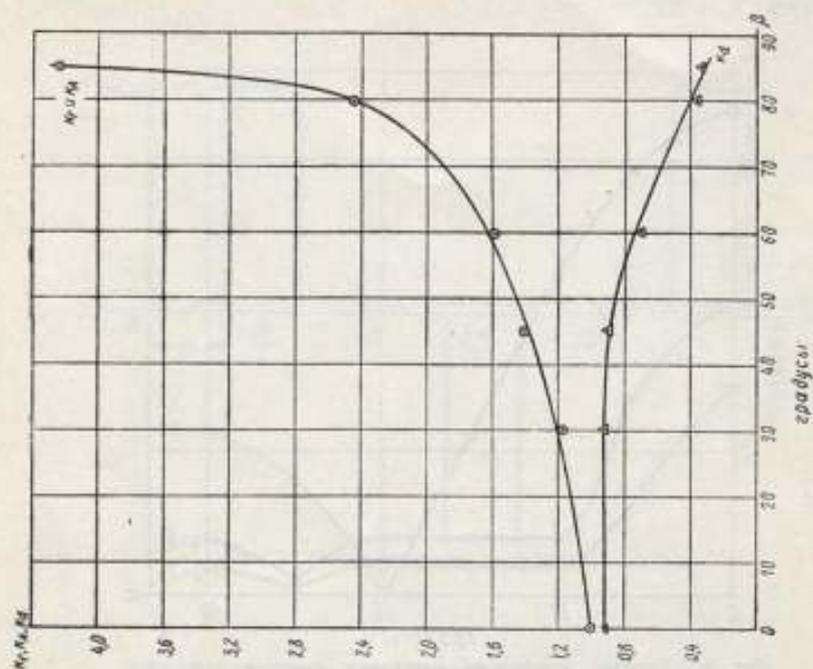


Рис. 11. Кривые зависимости коэффициентов формы, амплитуды и искажения в функции угла β для прямоугольных изгибаемых кривых.

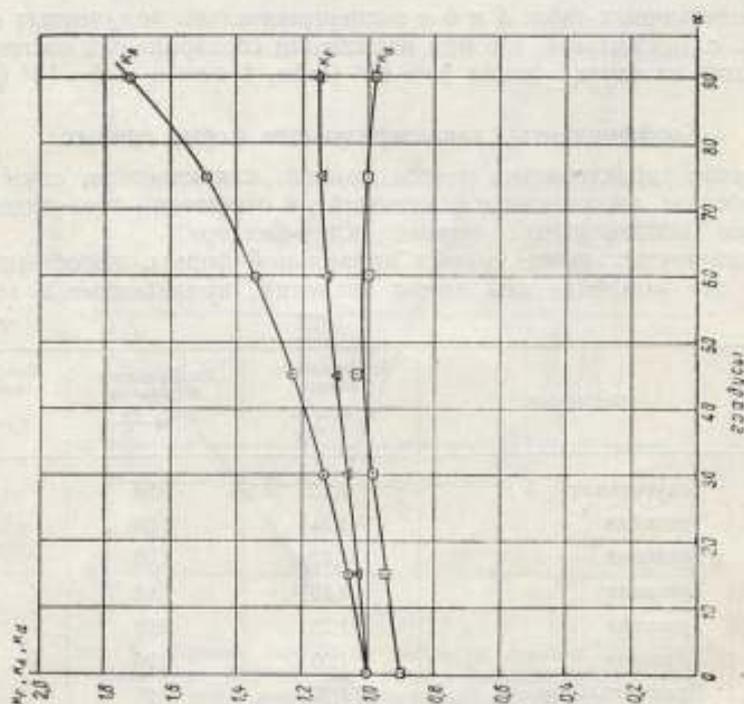


Рис. 10. Кривые зависимости коэффициентов формы, амплитуды и искажения от угла α трапециевидных кривых.

Таблица 8

β , градусы	Коэффициент Формы $k_f = \frac{A}{A_{cp}}$	Коэффициент искажения $k_d = \frac{A_1}{A}$	Коэффициент амплитуды $k_A = \frac{A_{max}}{A}$
0	1,00	0,90	1,00
30	1,18	0,92	1,18
45	1,41	0,90	1,42
60	1,60	0,72	1,60
80	2,45	0,38	2,45
85	4,25	0,33	4,25

на рис. 10, а для прямоугольных импульсов, уподобляемых кривым э. д. с. при насыщении, — в табл. 8 и на рис. 11.

Рассматривая изменение этих коэффициентов с уменьшением угла α , можно установить, что для кривой индукции коэффициент формы кривой и коэффициент амплитуды падают и стремятся к единице, коэффициент же искажения практически остается постоянным, колеблющимся около единицы.

Для кривых э. д. с. мы имеем непрерывный рост равных друг другу коэффициентов формы и амплитуды и уменьшение коэффициента искажений с ростом угла β .

СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ КРИВЫХ ИНДУКЦИИ И Э. Д. С.

Кривые, полученные построением по данным измерений на постоянном токе

Рассмотрим теперь поведение различных материалов при намагничивании их переменным синусоидальным магнитным полем. В качестве таких материалов были выбраны углеродистая сталь (сталь 3), трансформаторная сталь Э4А и пермаллой. Испытуемые образцы имели форму колец, у

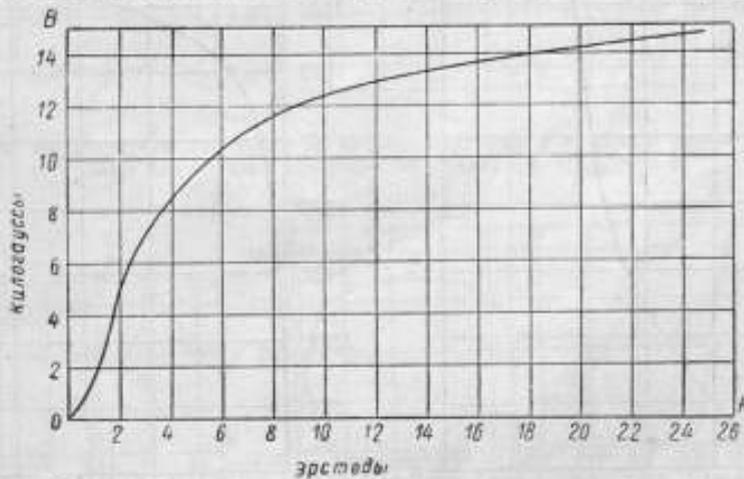


Рис. 12. Основная кривая намагничивания углеродистой стали.

которых, кроме основной кривой намагничивания, были измерены на постоянном токе гистерезисные петли для нескольких значений напряженности максимального намагничивающего поля. Основные кривые намагничивания этих материалов приведены на рис. 12, 13, 14, а гистерезисные кривые для различных значений напряженности поля — на рис. 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22 и 23.

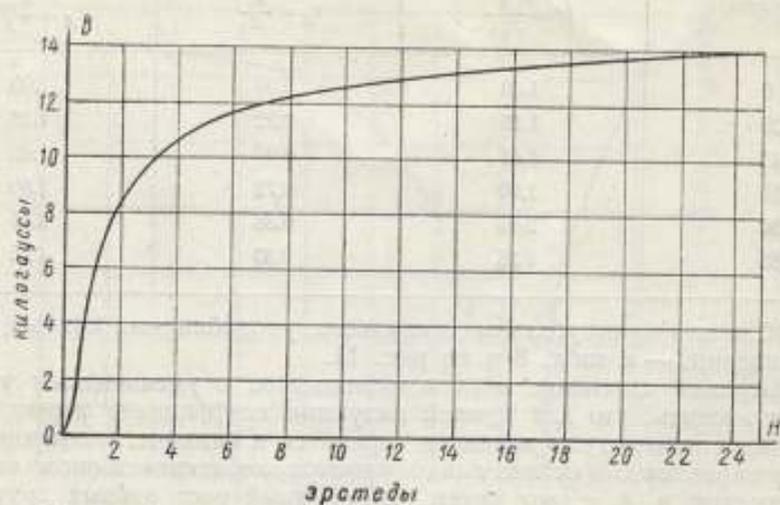


Рис. 13. Основная кривая намагничивания трансформаторной стали.

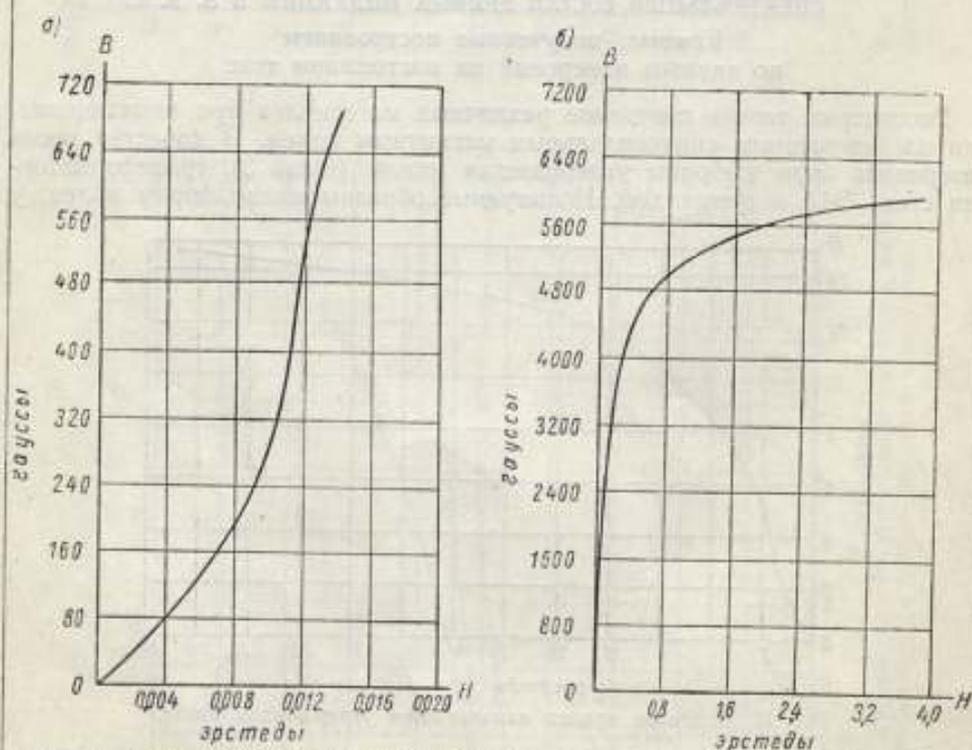


Рис. 14. Основная кривая намагничивания пермаллой: а) $H = 0,020$ э; б) $H = 4,0$ э.

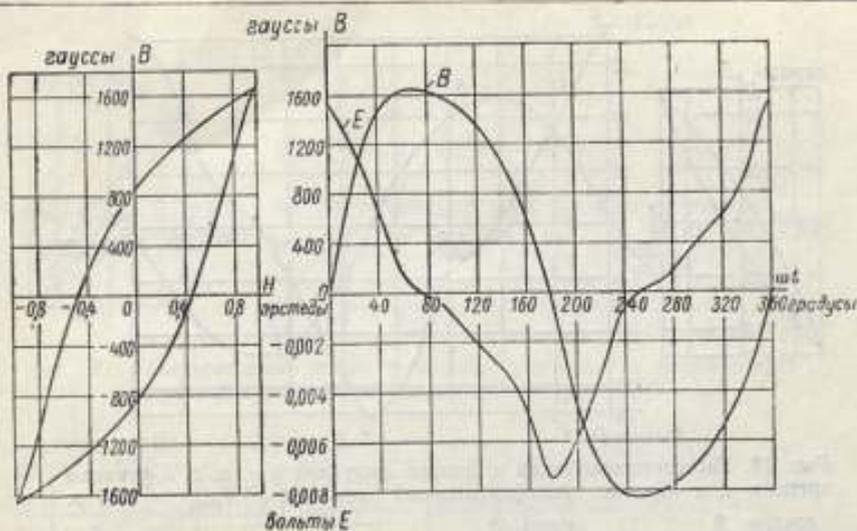


Рис. 15. Гистерезисные петли и кривые индукции и э. д. с. в функции времени для образца углеродистой стали при $H_{\max} = 1$ э.

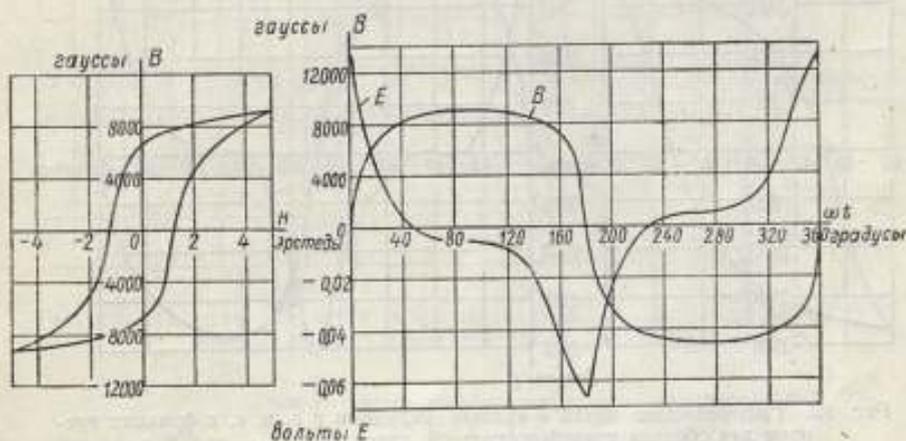


Рис. 16. Гистерезисные петли и кривые индукции и э. д. с. в функции времени для образца углеродистой стали при $H_{\max} = 5$ э.

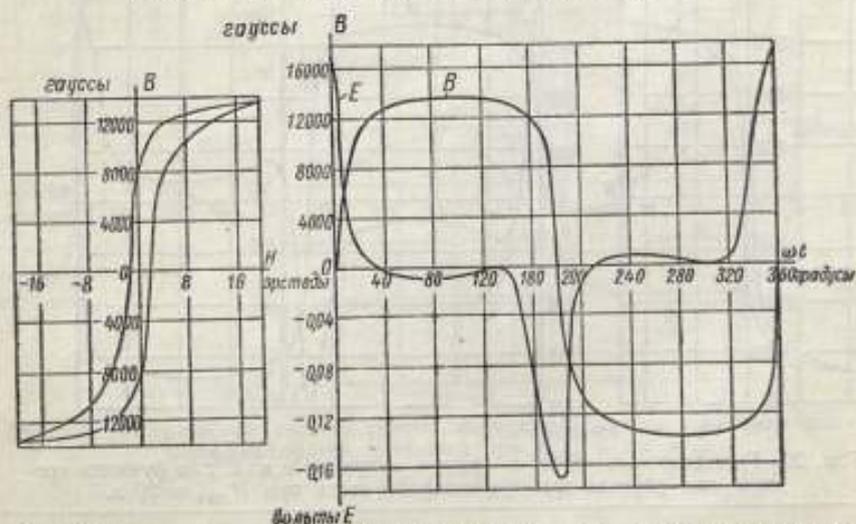


Рис. 17. Гистерезисные петли и кривые индукции и э. д. с. в функции времени для образца углеродистой стали при $H_{\max} = 20$ э.

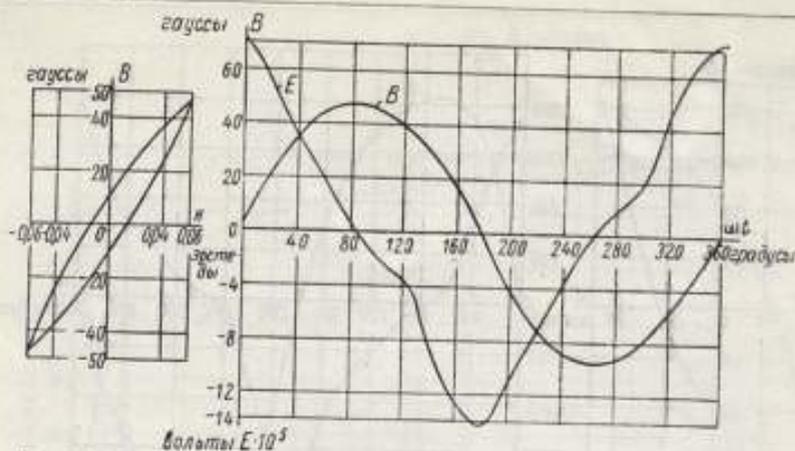


Рис. 18. Гистерезисные петли и кривые индукции и э. д. с. в функции времени для образца трансформаторной стали при $H_{\max} = 0,06$ э.

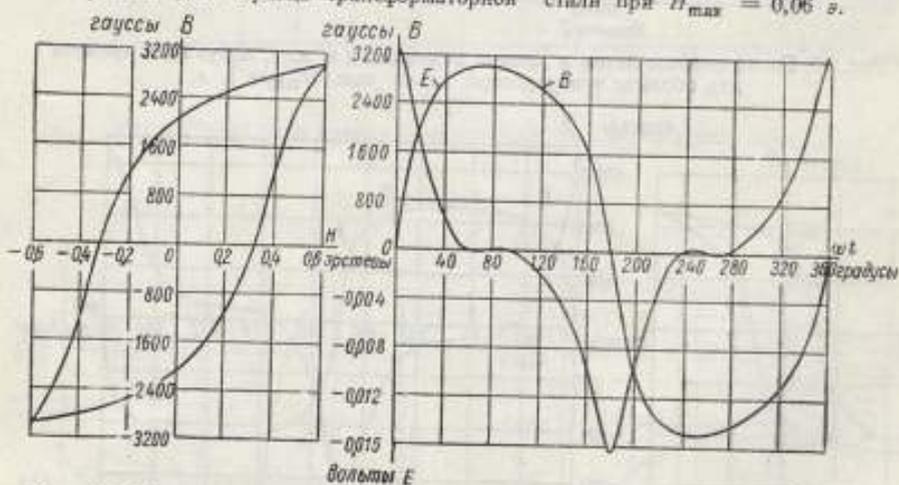


Рис. 19. Гистерезисные петли и кривые индукции и э. д. с. в функции времени для образца трансформаторной стали при $H_{\max} = 0,6$ э.

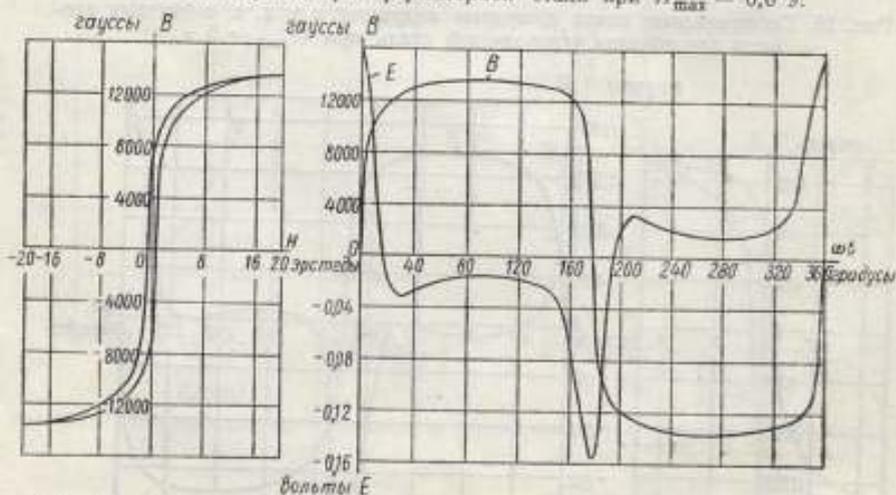


Рис. 20. Гистерезисные петли и кривые индукции и э. д. с. в функции времени для образца трансформаторной стали при $H_{\max} = 20$ э.

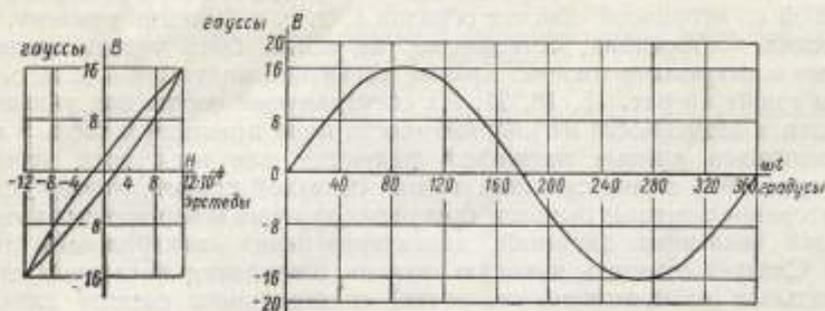


Рис. 21. Гистерезисные петли и кривые индукции в функции времени для образца пермаллой при $H_{\max} = 0,0012$ э.

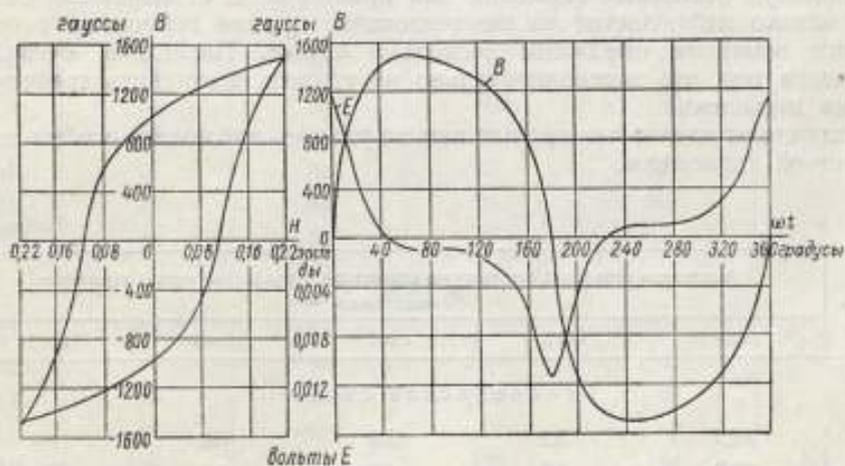


Рис. 22. Гистерезисные петли и кривые индукции и э. д. с. в функции времени для образца пермаллой при $H_{\max} = 0,022$ э.

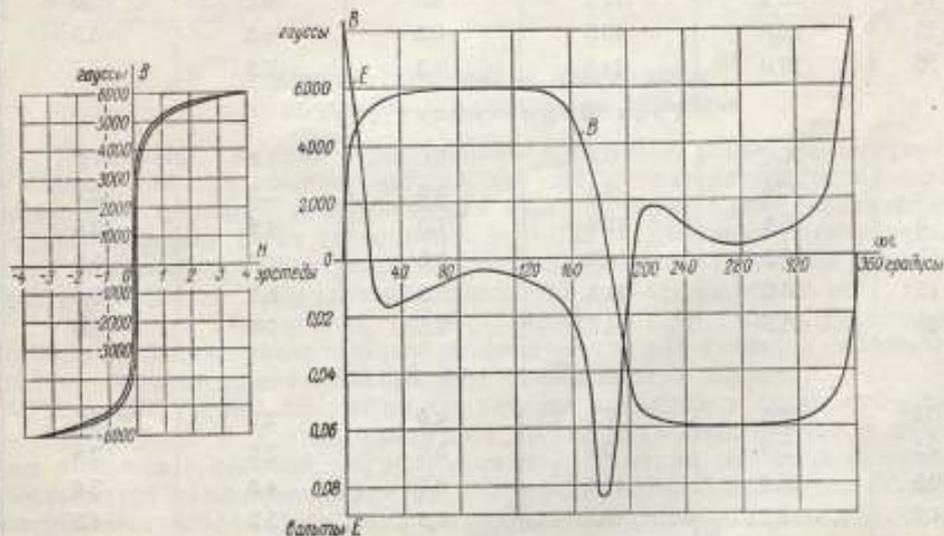


Рис. 23. Гистерезисные петли и кривые индукции и э. д. с. в функции времени для образца пермаллой при $H_{\max} = 3,8$ э.

По этим данным были получены кривые магнитной индукции и индуцированной во вторичной обмотке образца э. д. с. в функции времени. При графических построениях, естественно, не могли быть учтены явления, связанные с вихревыми токами. Кривые магнитной индукции и э. д. с. изображены также на рис. 15, 18, 21. Их спектральный состав для указанных материалов в зависимости от напряженности поля приведен в табл. 9 и 10.

Рассматривая кривые магнитной индукции для всех трех испытанных материалов в соответственных точках основной кривой, можно установить повторение основных выводов, сделанных для идеализированных кривых, и порядка численных значений, характеризующих спектральный состав кривых. Следует отметить высокую степень совпадения численных значений (учитывая соответственность точек) спектрального состава для разных материалов.

Получавшееся в идеализированных кривых уравнивание удельного веса амплитуд отдельных гармоник для кривых э. д. с. выражено не так резко, однако наблюдается та же тенденция, причем гармоники с более высокими номерами выражены несколько слабее. Последнее, очевидно, объясняется тем, что экспериментально не удалось достигнуть требуемого значения насыщения.

В отличие от идеальных кривых нам не удалось наблюдать особых точек для третьей гармоники.

Таблица 9

H_{\max}	Амплитуды отдельных гармоник по отношению к амплитуде первой гармоники $B_i \max / B_1 \max, \%$				
	$i=3$	$i=5$	$i=7$	$i=9$	$i=11$
Углеродистая сталь					
2	17,7	5,2	2,3	0,8	—
5	22,0	8,5	4,3	2,8	2,0
10	24,0	11,0	6,6	5,0	4,0
15	25,2	12,2	8,0	6,1	5,0
20	26,0	13,5	8,8	6,8	5,5
25	27,0	14,0	9,3	7,2	5,7
Трансформаторная сталь					
1	20,0	7,0	3,0	1,8	1,0
2	22,6	9,5	4,3	2,9	2,0
5	25,8	12,4	7,0	4,8	3,6
10	27,3	14,0	8,8	6,3	5,0
15	28,0	14,5	9,3	6,7	5,5
20	28,5	14,8	9,5	7,0	5,8
Пермаллой					
0,1	21,3	7,8	4,0	3,0	2,0
0,2	23,0	9,6	5,0	3,6	2,5
0,5	25,6	11,8	6,7	4,8	3,4
1,0	27,2	13,0	7,8	5,8	4,3
2,0	28,4	14,0	8,6	6,5	4,0
3,0	28,8	14,4	8,8	6,8	5,2
3,8	29,0	14,5	9,0	7,1	5,3

Таблица 10

H_{\max}°	Амплитуды отдельных гармоник по отношению к амплитуде первой гармоники $E_{i \max}/E_{1 \max}, \%$				
	$i=3$	$i=5$	$i=7$	$i=9$	$i=11$
Углеродистая сталь					
2	52	31	17	7	—
5	64	45	33	24	15
10	72	56	49	43	35
15	76	63	56	52	48
20	78	68	61	58	56
25	80	72	65	63	62
Трансформаторная сталь					
1	24	20	4,0	4,0	—
2	36	15	9,0	7,5	—
5	58	31	22	17,5	—
10	75	51	40	35	—
15	82	64	55	50	—
20	86	74	67	62	—
Пермаллой					
0,1	66	46	29	26	—
0,2	70	53	37	31	—
0,5	78	62	48	40	—
1,0	84	69	55	49	—
2,0	86	73	59	54	—
3,0	87	75	61	56	—
3,8	88	76	62	57	—

Кривые, полученные при помощи осциллографа и анализатора гармоник

Наибольший интерес представляет сравнение ранее рассмотренных кривых с непосредственно снятыми для тех же материалов осциллограммами. Спектральный состав кривых был проверен также анализатором гармоник фирмы Dawe Instruments (тип 1401 С). Сопоставление результатов определения спектрального состава кривых различными методами для углеродистой стали (толщина листов 0,5 мм) приводится в табл. 11.

Анализируя данные этой таблицы, можно сказать, что с увеличением номера гармоники увеличивается разница между расчетными и экспериментально определенными показателями спектрального состава.

Если для третьей гармоники эта разница находится в пределах погрешностей приборов и ошибок разложения, то уже для пятой, седьмой и девятой она является и закономерно возрастающей. Причина, по нашему мнению, заключается во влиянии вихревых токов, естественно большем для больших частот. Это наблюдалось нами на материалах типа углеродистой стали, трансформаторной стали и молибденового пермаллоя. В табл. 11 приведены данные только для углеродистой стали, для которой указанное расхождение выражено очень ярко, а погрешности обработки меньше, благодаря широкой петле гистерезиса. Таким образом, можно считать допустимым расчетное

Таблица 11

Напряженность магнитного поля H , эдс	Процентное отношение амплитуд данной гармоники к амплитуде первой гармоники для											
	третьей гармоники			пятой гармоники			седьмой гармоники			девятой гармоники		
	расчет по данным постоянного тока	по обработке осциллограмм	по данным анализатора	расчет по данным постоянного тока	по обработке осциллограмм	по данным анализатора	расчет по данным постоянного тока	по обработке осциллограмм	по данным анализатора	расчет по данным постоянного тока	по обработке осциллограмм	по данным анализатора
5	64	64	64	45	36	30	33	23	16	24	18	5
10	72	73	72	56	52	50	49	33	26	43	24	13
15	76	76	75	63	58	58	56	38	34	52	27	22
20	78	78	77	68	61	63	61	40	41	58	29	30

определение первой и третьей гармоник по данным, полученным на постоянном токе.

Сравнивая экспериментальные данные для магнитной индукции образца углеродистой стали толщиной 0,5 мм (т. е. с меньшим проявлением вихревых токов) на участке, близком к насыщению, с приведенными выше расчетными данными идеализированных кривых, видим, с одной стороны, удовлетворительное их совпадение, а с другой, уменьшение процентного содержания высших гармонических (табл. 12). Сравнение проводилось при одном и том же процентном содержании первой гармоники в полной кривой индукции.

Таблица 12

H_{\max} , эдс	α , градусы	Амплитуды отдельных гармоник по отношению к амплитудному значению осей кривой, $B_i \max / B_{\max}$, %						
		$i=1$	$i=3$		$i=5$		$i=7$	
			расчет	эксперимент	расчет	эксперимент	расчет	эксперимент
10	35	120	23	27	5	11	2,5	4
15	20	124	35	36	14	15	7	7

Переходя к зависимости спектрального состава от толщины проката листов, с чем связано большее или меньшее развитие вихревых токов, мы должны ожидать, при одних и тех же значениях напряженности поля, усиления высших гармонических в кривой э. д. с. при уменьшении толщины проката. Это обстоятельство было проверено для одного из сортов углеродистой стали с толщиной проката от 10 до 0,5 мм.

В табл. 13 приводятся данные, полученные как средние из обработки осциллограмм и результатов измерений анализатором гармоник.

Интегрируя кривые э. д. с., снятые осциллографом, можно было получить аналогичные данные в отношении спектрального состава магнитной индукции.

Это было проведено для углеродистой стали толщиной 0,5 и 10 мм (т. е. для крайних случаев). Данные о спектральном составе магнитной индукции для различных напряженностей магнитного поля приведены в табл. 14.

Таблица 13

Напряженность магнитного поля H_{\max}^* , э	Процентное отношение амплитуд для образца с толщиной листов, мм			
	10	2	1	0,5
третьей гармоники к первой				
5	6	19	30	62
10	12	25	47	73
15	18	30	58	76
20	24	33	65	78
пятой гармоники к первой				
5	4	8	9	35
10	8	11	15,5	51
15	10	13	24,5	58
20	11	15	34	62

Таблица 14

H_{\max}^* , э	Амплитуды отдельных гармоник по отношению к амплитудному значению всей кривой $B_i \max / B_{\max}^*$, %			
	$i=1$	$i=3$	$i=5$	$i=7$
Толщина 10 мм				
1	102	1,5	1,0	
2	102	2,0	1,0	
5	103	4,0	1,5	
10	103	5,0	2,0	
15	103	5,0	2,0	
Толщина 0,5 мм				
1	103	11	2	2
2	106	14	4	3
5	113	20	8	5
10	120	29	12	6
15	125	37	15	7

Как видно, удельный вес высших гармонических с уменьшением толщины проката и здесь возрастает.

Установить зависимость спектрального состава от ширины гистерезисной петли, т. е. от коэрцитивной силы материала, не удалось. Действительно, для углеродистой стали с $H_c \approx 12$ э и трансформаторной стали с $H_c \approx 0,6$ э мы получили состав гармоник, приведенный в табл. 15.

Спектральный состав кривых вторичной э. д. с., полученный с помощью анализатора гармоник для различных материалов, также показал отсутствие зависимости от коэрцитивной силы, и можно считать спектральный состав примерно одинаковым для соответственных точек основных кривых (табл. 16).

Таблица 15

H_{\max}°	Амплитуды отдельных гармоник по отношению к амплитудному значению всей кривой $B_{l \max}/B_{\max}^{\circ} \%$				Амплитуды отдельных гармоник по отношению к амплитуде первой гармоники $B_{l \max}/B_1 \max^{\circ} \%$		
	$l=1$	$l=3$	$l=5$	$l=7$	$l=3$	$l=5$	$l=7$
Углеродистая сталь							
1	103	11	2	2	11	2	2,0
2	106	14	4	3	13	4	3,0
5	113	20	8	5	18	7	4,5
10	120	29	12	6	24	10	5,0
15	125	37	15	7	30	12	5,5
Трансформаторная сталь							
1	112	19	4	1	17	3,5	1,0
2	115	22	7	3	19	6	2,5
5	119	28	12	7	23	10	6,0
10	121	32	15	8	26	12	6,5
15	122	35	17	9	29	14	7,5

Таблица 16

H_{\max}°	Амплитуды отдельных гармоник по отношению к амплитуде первой гармоники $E_{l \max}/E_1 \max^{\circ} \%$						
	$l=3$	$l=5$	$l=7$	$l=9$	$l=11$	$l=13$	$l=15$
Углеродистая сталь							
1	32	8	2,5	1,0	0,5		
2	45	15	6,0	1,5	1,0		
5	64	33	15,5	5,0	1,5	1,0	
10	72	50	26	13	5,5	1,7	1,5
15	75	58	34	22	11	5,5	2,5
20	77	63	41	30	17	11	5,0
Сталь Э4А							
1	43,0	20	8,0	3,5	1,0	—	—
2	47,5	25	13	7,5	3,5	1,0	—
5	55,0	35	24	16	10,0	7,0	5,5
10	63,0	44	33	24	16,5	12,5	10,0
15	66,5	47	39	28	19,5	15,0	11,5
20	68,0	51	43	32	21,5	17,0	12,5
Мо-пермаалой							
0,1	57	26	7,0	3,0			
0,2	74	45	19	7,5			
0,4	80	55	37	16			
0,6	82	60	41	21			
0,8	84	63	42	25			
1,0	85	66	43	27			

$\frac{H_{\max}}{B}$	Амплитуды отдельных гармоник по отношению к амплитуде первой гармоники $E_i \max / E_1 \max, \%$						
	$i=3$	$i=5$	$i=7$	$i=9$	$i=11$	$i=13$	$i=15$
Гиперм 702							
0,1	30	5,0	3,5	2,0			
0,2	59	18	7,0	3,0			
0,4	73	47	16	6,0			
0,6	79	59	27	11,5			
0,8	83	67	39	19			
1,0	85	71	49	28			

КОЭФФИЦИЕНТ ФОРМЫ И АМПЛИТУДЫ

По осциллограммам, снятым для образцов углеродистой и трансформаторной стали, а также Мо-пермаллоя и гиперма при различных значениях напряженности синусоидального намагничивающего поля, были подсчитаны коэффициенты формы и амплитуды вторичной э. д. с. Значения этих коэффициентов приведены в табл. 17 и на рис. 24—27.

Зависимость коэффициента формы кривой э. д. с. от толщины проката была определена на образцах углеродистой стали с толщиной листов от 10

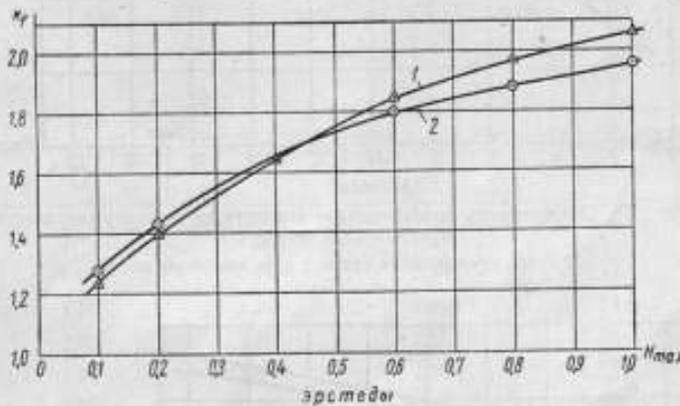


Рис. 24. Зависимость коэффициента формы от напряженности магнитного поля:

1 — гиперм $d = 0,35$ мм; 2 — Мо-пермаллой $d = 0,35$ мм.

до 0,5 мм. В полном соответствии с ранее изложенными соображениями коэффициент формы при данной напряженности поля падает с увеличением толщины проката (табл. 18).

В табл. 19 приведены значения коэффициентов формы кривой э. д. с., индуктированной во вторичной обмотке образцов, составленных из колец одинаковой толщины для разных материалов и индукций при частоте синусоидального намагничивающего тока 400 гц. Данные получены на основании обработки многократно снятых осциллограмм.

Эти данные могут быть использованы при испытаниях материалов по ГОСТ 802—54 на переменном токе частотой 400 гц в условиях синусоидальной напряженности магнитного поля.

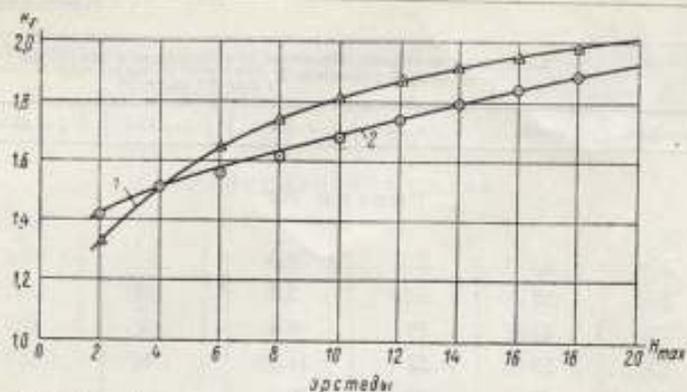


Рис. 25. Зависимость коэффициента формы от напряженности магнитного поля:
 1 — углеродистая сталь $d = 0,5$ мм; 2 — трансформаторная сталь $d = 0,5$ мм.

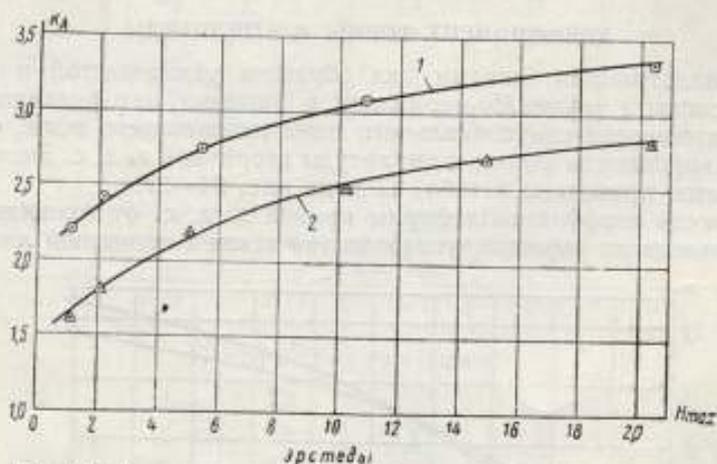


Рис. 26. Зависимость коэффициента амплитуды от напряженности магнитного поля:
 1 — трансформаторная сталь; 2 — углеродистая сталь.

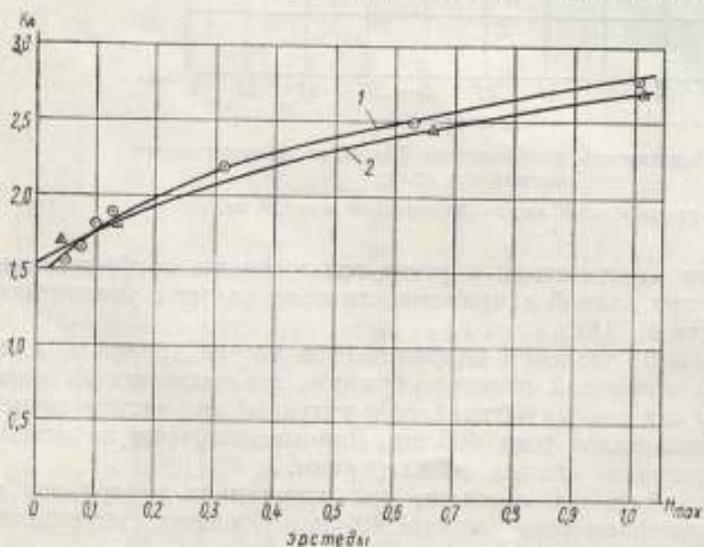


Рис. 27. Зависимость коэффициента амплитуды от напряженности магнитного поля:
 1 — силверм; 2 — Mn-пермаллой.

Таблица 17

H_{\max}°	Углеродистая сталь толщиной 0,5 мм		Трансформаторная сталь Э4А толщиной 0,35 мм	
	k_f	k_A	k_f	k_A
2	1,30	1,80	1,42	2,36
4	1,50	2,05	1,50	2,61
6	1,65	2,24	1,56	2,80
8	1,74	2,40	1,62	2,94
10	1,81	2,53	1,68	3,04
12	1,87	2,61	1,74	3,12
14	1,91	2,68	1,79	3,18
16	1,95	2,74	1,84	3,24
18	1,98	2,80	1,88	3,30
20	2,01	2,84	1,93	3,36
Мо-пермаллой толщиной 0,35 мм			Гиперм 702 толщиной 0,35 мм	
0,1	1,28	1,76	1,24	1,76
0,2	1,43	1,94	1,40	2,00
0,4	1,65	2,20	1,65	2,30
0,6	1,80	2,40	1,85	2,50
0,8	1,88	2,56	1,98	2,66
1,0	1,96	2,70	2,06	2,80

Таблица 18

H_{\max}°	Коэффициент формы кривой э. д. с. при толщине листов, мм				
	0,5	1	2	5	10
1	1,17	1,13	1,12	1,11	1,11
2	1,30	1,19	1,14	1,12	1,12
5	1,58	1,34	1,19	1,14	1,15
10	1,82	1,50	1,22	1,16	1,17
15	1,93	1,60	1,25	1,17	1,19
20	2,01	1,68	1,28	1,18	1,19

Таблица 19

B_{\max}° гс	Коэффициент формы кривой э. д. с. для материалов					
	Э4А	ХВП	Гиперм	50Н	50НХС	80НХС
1000	1,11	1,114	1,118	1,120	1,124	1,125
2000	1,11	1,118	1,127	1,132	1,135	1,139
3000	1,11	1,121	1,136	1,143	1,151	1,156
3500	1,11	1,124	1,141	1,149	1,159	1,167
4000	1,11	1,125	1,147	1,155	1,168	1,171
4500	1,11	1,130	1,153	1,163	1,178	1,206

ВЫВОДЫ

1. Установлена возможность теоретического подсчета спектрального состава первой и третьей гармонических индукции и э. д. с. на основании гистерезисных кривых, полученных на постоянном токе. При таком подсчете может получиться погрешность порядка 3%.

2. Анализатор гармоник или метод разложения осциллограмм могут обеспечить достаточную надежность определения спектрального состава лишь для первой и третьей гармоник (погрешность порядка 2—3%) с дальнейшим же увеличением номера гармоник погрешности становятся весьма значительными (пятая — до 10%, седьмая — до 30% и т. п.).

3. При испытании магнитных материалов на переменном токе могут быть использованы коэффициенты формы кривой, приводимые в статье, причем погрешность в их значениях не превышает 3%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нейман Л. Р., Поверхностный эффект в ферромагнитных телах, Госэнергоиздат, 1949.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДИКИ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В ОБЛАСТИ ЗВУКОВЫХ ЧАСТОТ

При намагничивании магнитных материалов в переменных полях их поведение лучше всего может быть охарактеризовано зависимостью магнитной индукции от напряженности поля и зависимостью потерь на гистерезис и вихревые токи¹ от магнитной индукции.

Лишь в небольшом числе случаев при весьма низких частотах для материалов малой толщины и с малой электропроводностью возможна замена кривой $B = f(H)$, соответствующей переменным полям, основной кривой намагничивания, снятой на постоянном токе.

При этом предполагается, что в переменных полях определяется кривая $B_{\max} = f(H_{\max})$, где B_{\max} и H_{\max} — соответственно максимальные значения индукции и напряженности магнитного поля. В табл. 1 и 2 приводятся данные для трансформаторной стали и стали ХВП, полученные на постоянном и переменном токах разной частоты, при одних и тех же значениях напряженности магнитного поля или индукции.

Как видно из таблиц, удовлетворительное совпадение кривых имеет место лишь для частоты 50 гц и то для полей, не доходящих даже до точки максимальной проницаемости, при которой расхождение составляет уже 12,5%; в дальнейшем, правда, это расхождение вновь несколько уменьшается. При частоте 400 гц замена кривой, полученной на постоянном токе, недопустима уже с самых малых напряженностей поля.

В табл. 3 приводятся аналогичные данные для некоторых железо-никелевых сплавов.

Основной причиной, изменяющей поведение магнитных материалов в переменных магнитных полях, по сравнению с постоянным полем, являются, как известно, вихревые токи и связанное с этим уменьшение напряженности намагничивающего поля и поверхностный эффект. Другие причины, обуславливающие изменение магнитных характеристик, как, например, магнитная вязкость, хотя и вносят свои влияния, но все же не являются определяющими в поведении материала в переменном поле.

Предположим, что материал намагничивается синусоидальным полем. Напряженность магнитного поля, вызванного вихревыми токами, будет пропорциональна максимальному значению индукции и частоте переменного поля. Обозначая среднюю величину амплитуды индукции через B_{\max} , значение напряженности поля, соответствующее намагничению постоянным током, через H_0 и максимальное значение напряженности переменного поля через H_{\max} , будем иметь

$$\frac{H_{\max} - H_0}{B_{\max} f} = k,$$

где k — некоторая постоянная.

¹ В некоторых случаях и на магнитное последствие.

Таблица 1

Напряженность магнитного поля, \mathcal{H}	Магнитная проницаемость в ед. СГС _{эм} при частоте, гц		
	0	50	400
Сталь Э4А (толщина 0,35 мм)			
0,01	740	740	600
0,05	1 220	1 210	1100
0,10	1 650	1 600	1520
0,50	8 050	6 950	
0,60	8 650	7 650	
1,0	7 950	7 500	
2,0	5 250	4 850	
3,0	3 900	3 500	
4,0	2 900	2 600	
Сталь ХВП (толщина 0,35 мм)			
0,01	3 000	2 750	1880
0,05	6 200	4 600	2670
0,10	9 850	6 400	3150
0,20	15 700	9 250	
0,30	18 250	11 450	
0,40	17 700	13 150	
0,50	16 600	14 000	
1,00	11 450	11 000	
1,50	8 300	8 200	
2,00	6 550	6 500	
3,00	4 650	4 650	
4,00	3 550	3 550	
5,00	2 850	2 850	

Такая формула может несколько расширить использование данных, полученных на постоянном токе, с гораздо большим основанием, чем непосредственное их применение, иногда имеющее место до сих пор. Правда, для этого все же необходимо хотя бы одно измерение на переменном токе для получения коэффициента k .

В табл. 4 приводятся данные, полученные для разных материалов, позволяющие судить о постоянстве величины k , а следовательно, и о возможности применения этой формулы.

Из таблиц видно, что коэффициент k сохраняет свое постоянство для данного материала в пределах 20%.

Посмотрим, какую погрешность это может вызвать, если кривые намагничивания рассчитывать вышеуказанным способом в пределах частот до 1000 гц , принимая крайние значения k .

В табл. 5 приводятся данные такого подсчета, проведенного для железоникелевого сплава (для которого расхождение между наибольшим и наименьшим значениями k составляет около 25%), и аналогичные данные для углеродистой стали 3.

Таблица 2

Магнитная индукция, гс	Напряженность магнитного поля, э, при частоте, гц				
	0	50	400	1000	8000
Сталь Э4АА (толщина 0,35 мм)					
50	0,0326	0,0326	0,0477	0,0502	0,0754
100	0,0578	0,0578	0,0754	0,0804	0,143
200	0,0967	0,0967	0,120	0,131	0,283
300	0,128	0,128	0,158	0,176	
400	0,154	0,154	0,191	0,213	
500	0,176	0,176	0,218	0,254	
750	0,218	0,218	0,283	0,348	
1000	0,256	0,256	0,343	0,434	
Сталь ВЧ (толщина 0,2 мм)					
50	0,0276	0,0276	0,0326	0,0440	0,128
100	0,0553	0,0553	0,0628	0,0816	0,256
200	0,100	0,100	0,113	0,147	0,495
300	0,138	0,138	0,158	0,203	
400	0,168	0,168	0,208	0,256	
500	0,193	0,193	0,238	0,305	
750	0,244	0,244	0,326	0,432	
1000	0,291	0,291	0,409	0,563	

Таблица 3

Материал	Сплав 50Н			Сплав 50НХС			Сплав 80НХС			Сплав гипери 702			Молибденовый пермаллой					
	0,35			0,35			0,35			0,35			0,35					
Толщина в мм	Магнитная индукция (максимальное значение), гс, при частоте, гц																	
Напряженность магнитного поля (максимальное значение), э	0		50		400		0		50		400		0		50		400	
	0,005	15	15	14	30	30	24	200	180	60	200	180	70	200	130	55		
0,010	30	30	29	60	60	52	1150	390	120	600	400	130	600	310	120			
0,020	65	65	58	180	164	116	2650	840	250	2550	900	260	3150	770	265			
0,030	115	110	93	420	340	190	3050	1400	400	3400	1470	400	4150	1400	430			
0,050	270	260	180	1470	850	390	3500	2780	730	4350	2660	730	5050	3170	820			
0,070	630	480	280	2570	1500	600	3800	3440	1120	4750	3760	1100	5500	4200	1260			
0,10	2500	970	460	3600	2650	940	4150	3860	1680	5150	4790	1650	5950	5280	1890			
0,15	5550	2430	800	4450	3950	1600	4450	4220	2440	5600	5420	2320	6300	6050	2650			
0,30	8700	7000	2050	5750	5400	3500	4950	4790	3700	6200	6040	3740	6900	6670	4120			
0,60	10400	9850	5200	6850	6400	5800	5450	5390	4960	6500	6420	5640						

Таблица 4

Магнитная индукция, гс	Напряженность магнитного поля, э	Коэффициент $k \cdot 10^3$ при частотах, гц		
		400	1000	2000
Сталь углеродистая (толщина 0,5 мм)				
500	0,50	800	600	580
700	0,62	775	540	580
1000	0,75	750	600	575
1500	0,93	725	600	550
2000	1,08	700	590	550
Железо-никелевый сплав (толщина 0,2 мм)				
300	0,0070	55	50	—
500	0,0105	55	50	—
1000	0,0160	50	48	—
2000	0,0220	52	49	—
3000	0,0268	57	54	—
4000	0,0335	62	55	—
Трансформаторная сталь (толщина 0,2 мм)				
1000	0,213	120	120	—
1500	0,265	120	120	—
2000	0,308	125	120	—
4000	0,515	120	120	—
6000	0,850	124	120	—
6500	0,970	130	120	—

Таблица 5

Магнитная индукция, гс	Частота, гц	Напряженность магнитного поля, э			Погрешность в значении напряженности поля	
		Действительное значение для переменного тока, взятое из кривой намагничивания материала	Действительное значение для постоянного тока, взятое из основной кривой намагничивания материала	Напряженность переменного поля, рассчитанная по крайним значениям коэффициента k	при замене действительной напряженности переменного поля напряженностью постоянного поля	при замене действительной напряженности расчетной, $\%_2$
Железо-никелевый сплав						
300	400	0,0136	0,007	0,0128—0,0144	в 2 раза	6
	1000	0,0220		0,0214—0,0256	в 3 раза	16
3000	400	0,0945	0,0268	0,0844—0,1022	в 3 раза	11
	1000	0,1900		0,1708—0,2128	в 7 раз	12
Углеродистая сталь 3						
500	400	0,66	0,5	0,66—0,60	30% ₀	9
	1000	0,80		0,90—0,75	80% ₀	12
	2000	1,08		1,30—1,00	в 2,5 раза	20

Таким образом, для расчета этот метод более правомерен, чем простая замена кривыми, полученными на постоянном токе. Следует отметить, что для трансформаторной стали результаты будут гораздо более удовлетворительными и погрешность во всяком случае не превысит 5%.

На основании изложенного очевидно,¹ что для большинства практических случаев необходимо непосредственное определение магнитных характеристик на переменном токе той частоты, при которой будет работать материал².

Разрабатывая или анализируя методику магнитных измерений при намагничивании испытуемого материала переменными полями, мы ставили себе задачи — обеспечить определение зависимостей:

$$B_{\max} = f(H_{\max}); \quad B_{1\max} = f(H_{1\max});$$

$$E = f(H_{\max}) \text{ или } E = f(B_{\max}); \quad P = f(B_{\max}),$$

где B_{\max} и H_{\max} — максимальные значения индукции и напряженности поля при искаженной форме кривой;

$B_{1\max}$ и $H_{1\max}$ — то же для первой гармоники;

E — э. д. с., индуцируемая в одном витке, охватывающем магнитопровод из испытуемого материала, когда его сечение равно 1 см²;

P — потери на гистерезис и вихревые токи.

Решение этих задач возможно путем измерения:

- проницаемости и потерь компенсационным или мостовым методами;
- потерь ваттметровым методом и проницаемости при помощи приборов, измеряющих среднее значение э. д. с. переменного тока³.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ $B_{\max} = f(H_{\max})$

При малых искажениях формы кривых⁴ B и H определение их максимальных значений не представляет трудностей и может быть выполнено для H путем измерения действующего значения силы тока⁵. Погрешность такого измерения, очевидно, будет определяться классом прибора.

Максимальное значение синусоидальной индукции может быть определено путем измерения действующего значения э. д. с., индуцируемой в обмотке, с которой сцепляется поток измеряемой индукции, пользуясь формулой

$$E_2 = 4,44 B_{\max} \cdot s \cdot f \cdot w_2 \cdot 10^{-8},$$

где s — сечение испытуемого образца в квадратных сантиметрах;

B_{\max} — магнитная индукция (максимальное значение) в гауссах;

f — частота намагничивающего поля в герцах;

w_2 — число витков измерительной обмотки.

Погрешность определения величины E_2 (пользуясь, например, ламповым вольтметром типа ЛВ-9) можно без труда довести до 1,5—2%. При искажениях формы кривой, которыми нельзя пренебрегать, такого рода приемы уже оказываются неприменимыми. В этом случае наиболее простым методом определения максимального значения напряженности поля является подсчет

¹ См. статью настоящего сборника, стр. 36.

² Вопрос о необходимости измерения потерь на гистерезис и вихревые токи при соответствующей частоте, естественно, не вызывает сомнений.

³ Здесь мы не рассматриваем измерения на «феррометре», подробно описанные в статье, опубликованной в АТМ Z 921-4, arg. 1934, Lieferung 35, mai 1934, J 60. Отметим, что применение феррометра возможно лишь при частоте 50 гц.

⁴ См. статью настоящего сборника, стр. 58.

⁵ Или измерения падения напряжения на безреактивном сопротивлении и дальнейшего подсчета силы тока. В широком диапазоне частот это возможно одним из типов лампового вольтметра.

его значения по измеренной величине максимального значения силы тока. Для этого в цепь измеряемого тока включается первичная обмотка катушки взаимной индуктивности, а во вторичной обмотке измеряется среднее значение э. д. с. E_{cp} . Тогда

$$I_{max} = \frac{E_{cp}}{4M},$$

где M — коэффициент взаимной индуктивности катушки в генри.

Погрешность измерения E_{cp} может быть оценена величиной около 1%¹. Полагая погрешность определения M равной 0,1% и частоты 0,5%, получим, что погрешность в значении I_{max} составит 1,6%.

Того же порядка будут и погрешности определения H_{max} , так как линейные размеры могут быть измерены с большой точностью².

Наиболее просто такие измерения выполняются для частоты 50 гц с помощью магнитоэлектрического прибора с вибрационным выпрямителем³. Для более высоких частот целесообразнее применение ламповых вольтметров⁴. Возможно также применение прибора, непосредственно измеряющего максимальное значение силы тока. Кроме компенсации амплитудного значения э. д. с. известным постоянным напряжением с применением в качестве указателя компенсации катодного осциллографа, как это сделано в вольтметре Т. Л. Залуцкой⁵, может быть, естественно, применен осциллограф, измеряющий амплитудное значение непосредственно.

Для определения максимального значения магнитной индукции практически единственным является подсчет его по среднему значению измеренной э. д. с. само- или взаимной индукции по общеизвестной формуле:

$$E_{cp} = 4B_{max} \cdot s \cdot \omega_s \cdot f \cdot 10^{-8}.$$

Для измерения среднего значения э. д. с. могут, естественно, применяться те же приборы, как и в случае определения максимальной напряженности поля. На опыте измерений магнитной лабораторией ВНИИМ можно установить, что заметное искажение кривой магнитной индукции при синусоидальной напряженности магнитного поля наступает для некоторых материалов уже для индукций порядка 2000 гс (для железо-никелевых сплавов). Это означает, что вольтметр для измерения среднего значения должен измерять напряжения, начиная от величин порядка 1—2 в, если число измерительных витков ограничить пределами от 30 до 300 единиц и площадь сечения образца принять равной 1 см².

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧЕНИЯ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ ЧАСТОТОЙ 50 гц

Методика измерений основывалась на подсчете максимального значения магнитной индукции по измеренному среднему значению э. д. с., индуцированной в обмотке, навитой на испытуемый кольцевой образец. Определение максимального значения напряженности поля при его синусоидальном характере велось при помощи измерения падения напряжения на катушке сопротивления и при помощи измерения среднего значения вторичной э. д. с. катушки взаимной индуктивности, первичная обмотка которой включалась в цепь последовательно с намагничивающей обмоткой образца, если напряженность магнитного поля была несинусоидальной.

При проведении исследований применялся вольтметр как с вибрационным выпрямителем (снабженным вибрирующим постоянным магнитом, поворотом

¹ Применительно к вольтметру, описанному в настоящем сборнике (см. стр. 109).

² Практически погрешность определения максимальной напряженности поля следует считать равной 1,5%.

³ См. например, феррометр.

⁴ См. статью настоящего сборника, стр. 109.

⁵ Вольтметр, предложенный Т. Л. Залуцкой [см. Труды ВНИИМ, вып. 13(73), 1953], имеет пределы измерений по напряжению от 5 до 100 в и по частоте от 50 до 10⁶ гц.

которого достигается регулирование фазы возбуждения), так и с выпрямителем типа МВ-81 изготовления завода «Энергоприбор».

Правильность работы выпрямительных приборов проверялась сравнением их показаний с результатами, полученными при обработке осцилло-

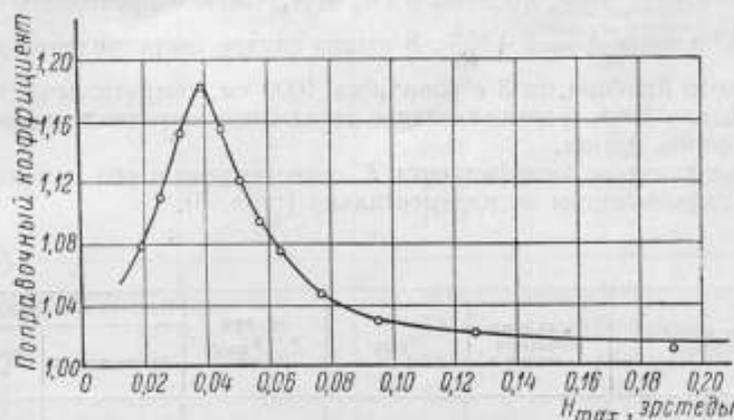


Рис. 1. Кривая поправочного коэффициента к показаниям выпрямительного прибора для образца (80NХС $\sigma_{max} = 56\ 300$ при $H = 0,044$ э и $f = 50$ гц).

грамм и при измерениях на постоянном токе (при правильной настройке выпрямителей показание магнитоэлектрического прибора должно дать половину значения, измеренного прибором без выпрямителя). В отношении времени коммутации выпрямители были отрегулированы с точностью до 1%.

Для того, чтобы учесть падение напряжения в измерительной обмотке при включении магнитоэлектрического прибора с выпрямителями, параллельно ему включался ламповый вольтметр, потреблением мощности которого можно было пренебречь. Результат измерений магнитоэлектрическим прибором с выпрямителем умножался на отношение показания лампового вольтметра до включения магнитоэлектрического прибора с выпрямителем к его показанию после включения.

Было замечено, что зависимость этого отношения (поправочный коэффициент) от напряженности намагничивающего поля представляет собою кривые, (рис. 1 и 2), максимум которых находится в области наибольшей проницаемости испытуемого материала. Объяснение этому мы находим в том, что для получения значения э. д. с. показания прибора необходимо умножить на поправочный множитель

$$K = 1 + \frac{V(\omega L)^2 + (R_0 + R_e)^2}{R_n}^{\frac{1}{2}}$$

¹ Изменение результата того же знака вызывает индуктированный в первичной обмотке ток обратного направления.

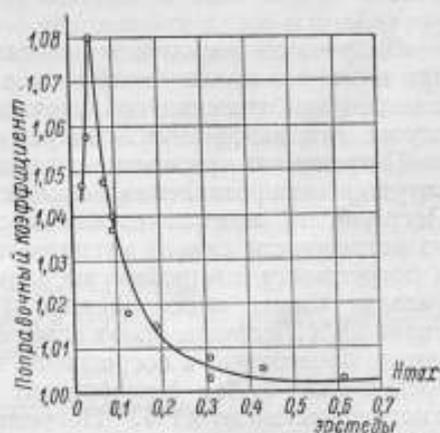


Рис. 2. Кривая поправочного коэффициента к показаниям выпрямительного прибора для образца молибденового пермаллоя ($\sigma_{max} = 66\ 600$ при $H = 0,055$ э и $f = 50$ гц).

где L — индуктивность образца;
 R_0 — активное сопротивление обмотки;
 R_2 — сопротивление вибрационного выпрямителя;
 R_n — сопротивление прибора.

Как показывает опыт, величиной $(R_0 + R_2)^2$ можно пренебречь по сравнению с $\omega^2 L^2$ и тогда $K = 1 + \frac{\omega L}{R_n}$. В нашем случае сопротивление магнитоэлектрического прибора на 3 в равнялось 1000 ом, сопротивление обмотки не превосходило 1 ом, а эквивалентное переходное сопротивление выпрямителя было около 0,5 ом.

Расчетное значение коэффициента K сопоставлено с его максимальным значением, определенным экспериментально (табл. 6).

Таблица 6

Наименование испытуемого материала	Число измерительных витков	I_{\max}	ωL при $I = I_{\max}$ ом	Поправочный коэффициент K	
				подсчитанный	определенный из опыта
80 НХС	120	56 300	141	1,14	1,18
50 НХС	150	27 700	97	1,10	1,09
50 Н	156	24 360	98	1,10	1,13
Молибденовый пермаллой	120	66 600	83	1,08	1,08

Полученные результаты позволяют рекомендовать проведение испытаний при возможно малых числе витков и сопротивлении измерительной обмотки с целью приближения поправочного коэффициента к единице. В противном случае этот коэффициент следует определять опытным путем.

Погрешность при измерении падения напряжения на зажимах образцовой катушки сопротивления ламповым вольтметром имеет порядок 2%. Погрешность при измерении среднего значения э. д. с. складывается из погрешности самого магнитоэлектрического вольтметра (порядка 0,4%) и погрешности настройки вибрационного выпрямителя, которая, как мы указали выше, имеет порядок 1%. Следовательно, общая погрешность равна 1,4%. Погрешностью в определении сопротивления образцовой катушки можно пренебречь, а погрешность в определении частоты — считать не превосходящей 0,5%. Коэффициент взаимной индуктивности определяется с погрешностью до 0,1%.¹ Погрешность в определении площади поперечного сечения для торов из листовых материалов может быть легко доведена до 0,3%.

Таким образом, можно считать, что суммарная погрешность при определении величины H не превышает 2,5%, а для величины B — 2%.

В заключение рассмотрения вопроса об измерениях на частоте 50 гц сопоставим результаты, полученные при измерениях различными методами (табл. 7).

Как показывают данные табл. 7, больших расхождений в результатах измерений не имеется, что подтверждает, если учесть погрешности феррометра, высказанные выше соображения о точности измерений.

¹ Погрешностью от дополнительного намагничивания током в измерительной цепи пренебрегаем, так как сила этого тока в нашем случае имеет порядок 10^{-5} — 10^{-4} а; вообще же она должна учитываться.

Таблица 7

Материал	Напряженность магнитного поля, э	Магнитная индукция, гс, при частоте, гц		
		0	50	
			измеренная магнитоэлектрическим прибором с вибрационным выпрямителем	измеренная феррометром
Трансформаторная сталь	0,2	860	850	830
	0,3	1900	1750	1700
	0,5	3900	3950	3900
	0,6	4700	4700	4700
Железо-никелевый сплав	0,01	440	410	400
	0,03	3300	2300	2150
	0,05	4600	4400	4150
	0,07	5020	5000	4750

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВЫХ НАМАГНИЧЕНИЯ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ ЗВУКОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

При измерениях в области начальной проницаемости до индукций в 1000 гс испытания удается проводить в условиях практически синусоидальной формы кривой индукции и напряженности поля. При этом для определения максимального значения напряженности магнитного поля можно пользоваться определением силы тока по падению напряжения на известном активном сопротивлении, включенном последовательно с намагничивающей обмоткой испытуемого образца¹.

Для определения максимальной индукции может быть использован обычный ламповый вольтметр. В случае наличия искаженной формы кривой требуется создание специального вольтметра² для измерения среднего значения напряжения как при определении напряженности поля, так и индукции. Погрешность измерений в обоих случаях имеет порядок 2—3%.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИВОЙ $B_{1 \max} = f(H_{1 \max})$

Для определения указанной зависимости нами были исследованы компенсационный и мостовой методы.

КОМПЕНСАЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

Применение компенсационного метода ограничивается сравнительно низкими частотами (порядка 1000—1500 гц), в диапазоне которых и проводились исследования.

Измерения велись на прямоугольнокоординатных и полярнокоординатных компенсаторах³, принципиальная схема измерений изображена на рис. 3.

Первая гармоническая магнитной индукции вычислялась по формуле:

$$B_{1 \max} = \frac{E_2 \cdot 10^6}{4,44 \cdot s \cdot f \cdot w_2}$$

¹ Нами применялся вольтметр типа ЛВ-1 (завода «Эталон»), который по основной погрешности можно было отнести к классу 1,0.

² См. статью настоящего сборника стр. 109.

³ Были применены компенсаторы Гейгера (фирма Гартман и Браун), Драйздела (фирма Тинслей) и Голла (завод «Эталон»).

Напряженность магнитного поля $H_{1 \max}$ определялась по падению напряжения на безреактивном сопротивлении R_N . Зависимость $B_{1 \max} = f(H_{1 \max})$, естественно, будет различной при синусоидальном изменении напряженности поля и при синусоидальной индукции.

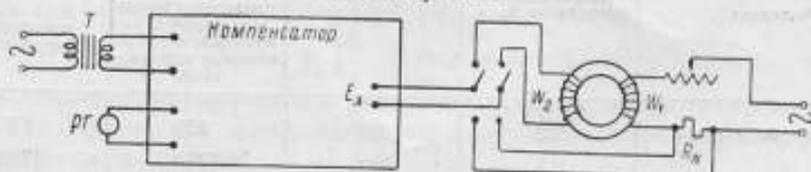


Рис. 3. Схема магнитных измерений с компенсатором: T — питающий трансформатор; PG — резонансный гальванометр; E_d — измеряемая э. д. с.; R_N — образцовая катушка сопротивления; w_1 и w_2 — первичная и вторичная обмотки испытуемого образца.

В некоторых случаях может оказаться, что среднее значение первой гармоники э. д. с. будет даже больше среднего значения всей кривой.

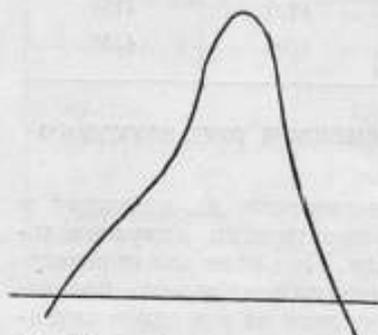


Рис. 4. Характер искажения кривой.

Таблица 8

Вид характеристики	Значение э. д. с., в		
	максимальное	действующее	среднее
Вся кривая	650	380	315
1-я гармоническая	523	370	333

э. д. с. всей кривой и ее 1-й гармонической (табл. 8).

Для того же образца в табл. 9 приводятся средние значения э. д. с., полученные при испытании в различных полях.

Таблица 9

Вид характеристики	Напряженность магнитного поля, э	Среднее значение э. д. с., в
Вся кривая	2	0,0101
1-я гармоническая		0,0106
Вся кривая	5	0,0156
1-я гармоническая		0,0165
Вся кривая	10	0,0260
1-я гармоническая		0,0275
Вся кривая	15	0,0268
1-я гармоническая		0,0283
Вся кривая	20	0,0288
1-я гармоническая		0,0310

значение э. д. с. На этом же рисунке изображена кривая, полученная в результате обработки осциллограммы. Для этого осциллограмма вторичной э. д. с. разлагалась в ряд Фурье и интегрировалась, в результате чего получалась кривая индукции, максимальное значение которой определялось.

Так, например, для кривой, изображенной на рис. 4, для образца углеродистой стали при $H = 1$ э, мы имеем следующие соотношения между различными значениями

Таким образом, при определении амплитуды первой гармоники индукции мы можем получить кривую намагничения на переменном токе, идущую выше такой же кривой на постоянном токе, что противоречит обычным представлениям о процессе намагничивания, и такая характеристика может быть принята лишь как формальная.

На рис. 5 приводятся для сопоставления кривые зависимости $B_{\max} = f(H_{\max})$, снятые на образцах листовой углеродистой стали толщиной 0,5 мм компенсатором переменного тока и прибором, измеряющим среднее

Погрешность измерения компенсационным методом значений индукции B имела порядок 1,5%, напряженности поля H — порядок 1,0%, так как

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta E_2}{E_2} + \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta s}{s} = 0,5 + 0,5 + 0,3 = 1,3\%$$

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{\Delta U_{RN}}{U_{RN}} + \frac{\Delta R_{cp}}{R_{cp}} + \frac{\Delta R_N}{R_N} = 0,5 + 0,2 + 0 = 0,7\%$$

где R_{cp} — средний радиус тороидального образца;
 R_N — сопротивление катушки сопротивления;
 U_{RN} — падение напряжения на зажимах катушки сопротивления.

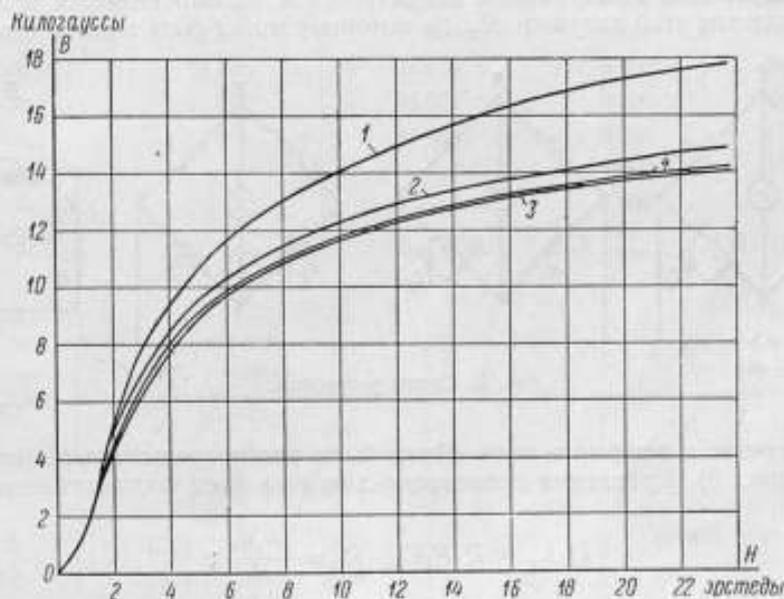


Рис. 5. Кривые намагничивания, снятые различными методами:

1 — компенсатором; 2 — осциллографом; 3 — электронным вольтметром; 4 — основная кривая (постоянный ток).

Как видно из сопоставления кривых рис. 5, при слабом развитии вихревых токов (относительно малая толщина проката) кривые, полученные на постоянном токе и методом измерения среднего значения э. д. с., расходятся не очень значительно (не более 2%). Несколько большее расхождение (до 5%) было между результатами, полученными при измерении по методу определения среднего значения э. д. с. и при обработке осциллограмм вторичной э. д. с. Источники дополнительных погрешностей здесь следует искать в графических неточностях, в неполноте разложения в ряд Фурье и, следовательно, в неполном учете интегрального значения магнитной индукции. Существенные расхождения, вытекающие из природы спектрального состава кривых магнитной индукции, имеются и в результатах измерений компенсатором переменного тока и другими методами.

Таким образом, если не рассматривать случаи, когда первая гармоническая индукции является целью измерений, рекомендовать применение компенсатора для оценки магнитных характеристик, сопоставимых с характеристиками, получаемыми на постоянном токе, нельзя. Расхождение здесь может достигнуть 20—25%.

МОСТОВОЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ

Мостовой метод определения проницаемости основан на измерении индуктивности катушки, содержащей в качестве сердечника образец испытуемого материала. Для тороидального сердечника, как известно, существуют следующие зависимости:

$$L_x = 2\mu\omega^2 h \ln \frac{R_1}{R_2} 10^{-9}; \quad H = \frac{0,4\omega l}{R_1 + R_2}; \quad P = \frac{I^2 R_x}{m},$$

где h — высота испытуемого тора в сантиметрах;
 R_1 и R_2 — внешний и внутренний радиусы тороида в сантиметрах;
 m — масса образца в килограммах;
 P — потери на гистерезис и вихревые токи в ваттах на килограмм.

Одновременно с измерением индуктивности L_x определяется и активное сопротивление этой катушки R_x , по которому могут быть подсчитаны потери

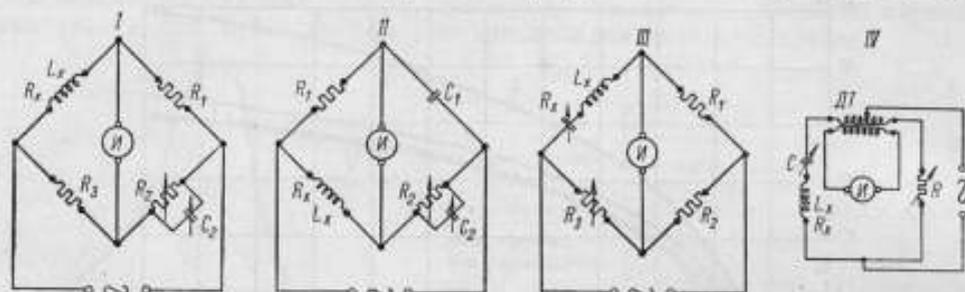


Рис. 6. Схемы установки.

на гистерезис и вихревые токи. Нами были рассмотрены четыре различные схемы (рис. 6). Уравнения равновесия для этих схем соответственно имеют вид:

$$I) L_x = R_1 R_3 C_2; \quad R_x = \frac{R_1 R_2}{R_2};$$

$$II) L_x = \frac{R_1 C_1 R_2}{1 + \omega^2 R_2^2 C_2^2}; \quad R_x = \omega^2 R_2 C_2 L_x;$$

$$III) L_x = \frac{1}{\omega^2 C_1}; \quad R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2};$$

$$IV) L_x = \frac{1}{\omega^2 C}; \quad R_x = R.$$

Для определения напряженности поля необходимо производить измерение силы тока в том плече, которое содержит испытуемый образец. Для этого можно включить последовательно безреактивное сопротивление и измерить высокоомным вольтметром падение напряжения на нем.

При работе по мостовой схеме измерения проводятся в режиме синусоидальной формы напряженности магнитного поля, если активные составляющие плеч велики по сравнению с реактивными, и в режиме синусоидальной индукции при обратном соотношении.

Формула, связывающая индуктивность L испытуемого образца с проницаемостью ($L = 2\mu\omega^2 h \ln \frac{R_1}{R_2} 10^{-9}$), не учитывает наличия тех контуров, по которым протекают вихревые токи. Таким образом, при сколько-нибудь заметном развитии вихревых токов необходимо отказаться от этой формулы и вести расчет проницаемости иным путем.

Это положение иллюстрируется данными табл. 10 и 11, в которых приведены значения проницаемости образцов, полученные при испытании на переменном токе на двух разных частотах как методом измерения среднего значения э. д. с. — μ_B , так и мостовым методом — μ_L .

Таблица 10

B_{\max} эс	$f = 137$ эц		$f = 1000$ эц	
	μ_L	μ_B	μ_L	μ_B
Пермаллой				
100	19 000	22 400	10 300	16 000
200	21 300	25 600	10 100	16 400
300	24 300	30 500	9 900	17 000
400	27 800	36 000	9 700	17 300
500	31 500	41 000	9 600	17 700
1000	—	—	9 000	19 300
2000	—	—	7 800	21 000

Таблица 11

B_{\max} эс	$f = 137$ эц		B_{\max} эс	$f = 1000$ эц	
	μ_L	μ_B		μ_L	μ_B
Трансформаторная сталь Э4А					
75	1540	1550	100	1650	1650
154	1960	1940	200	1900	1950
431	2760	2750	300	2080	2160
706	3300	3360	400	2160	2260
1090	3790	4110	500	2200	2330
2460	5350	6320	—	—	—

Для устранения этих расхождений требуются специальные расчеты. Описываемый ниже метод расчета был рекомендован Кемпбеллом [1] в 1910 г. без вывода. Далее Вебб [2] дал приводимый ниже вывод зависимости между B_{\max} и измеренным по методу Кемпбелла значением индуктивности, однако указанные авторы не обобщили предложенного приема на случай определения проницаемости мостовым методом.

Если в обмотке испытуемого образца индуцируется э. д. с. E , то при силе тока в ней, равной I , справедливо соотношение

$$E^2 = I^2 R_x^2 + I^2 \omega^2 L_x^2.$$

С другой стороны, предполагая синусоидальное изменение потока, будем иметь

$$E = \frac{\omega \Phi_{\max}}{\sqrt{2}} \cdot 10^8.$$

Тогда

$$B_{\max} = \frac{\sqrt{I^2 R_x^2 + I^2 \omega^2 L_x^2} \cdot \sqrt{2}}{\omega \omega_0 S} \cdot 10^8.$$

Для случая несинусоидальной индукции должны быть введены соответствующие ограничения и результаты $B_{1\max}$ следует относить к первой гармонике.

Напряженность поля подсчитывается по силе намагничивающего тока I , а проницаемость — по формуле $\mu_B = \frac{B_{\max}}{H_{\max}}$. В табл. 12 приводятся сравнительные данные такого пересчета для образца молибденового пермаллоя, показывающие, что при мостовых измерениях совершенно необходимо учитывать это обстоятельство.

Таблица 12

Напряженность магнитного поля, э	Магнитная проницаемость в ед. CGS _μ		
	Измерения прибором для среднего значения в д. с.	Измерения мостом по схеме 1 (рис. 6)	
		расчет непосредственно по индуктивности L	расчет с учетом активного сопротивления R
0,0077	16 100	10 100	16 800
0,0155	16 900	9 900	17 400
0,0258	17 300	9 700	18 600
0,0517	19 300	9 200	19 900
0,0801	20 000	8 300	22 000
0,0956	20 900	7 700	23 000

Естественно, что разница в значениях проницаемости, рассчитанной по измеренному мостовым методом значению индуктивности и по максимальным значениям магнитной индукции и напряженности поля, будет тем больше, чем меньше удельное сопротивление ферромагнитного материала, больше толщина листа и выше частота.

Как было уже сказано, нами были исследованы четыре схемы. Три из них конструктивно оформлены в одну установку¹, описание которой дается ниже.

Схема измерительной установки состоит из генераторного, указательного и измерительного блоков.

Генераторный блок состоит из генератора ЗГ2А (рис. 7) мощностью порядка 2 *вт* и усилителя, доводящего мощность всего устройства до 200—300 *вт*. Усилитель содержит три отдельные части, две из которых дают предварительное и мощное усиление, а третья — предназначена для выпрямления сетевого переменного тока, питающего усилителя. Все устройство питается от сети переменного тока напряжением 127 *в* (возможно переключение на 220 *в*). Питание измерительной части может происходить либо непосредственно от генератора или от усилителя.

Указательный блок (рис. 8) состоит из осциллографа типа ЭО4, лампового вольтметра с приставкой и фильтра с усилителем. Схема их взаимного включения изображена на рис. 9. Осциллограф дает представление о форме кривых намагничивающего тока и кривой вторичной э. д. с., а также служит нулевым прибором в начальной стадии уравновешивания моста.

¹ Изготовление мостовой установки и разработка фильтра СФ-1 производились механиками завода «Эталон» Н. П. Бобковым, М. Л. Фейтельсоном, А. Е. Душиным и Д. И. Малюшиным.

Ламповый вольтметр используется для измерения падения напряжения на образцовой катушке сопротивления и вторичной э. д. с., а также в качестве нулевого прибора при уравнивании моста в конечной стадии работы.

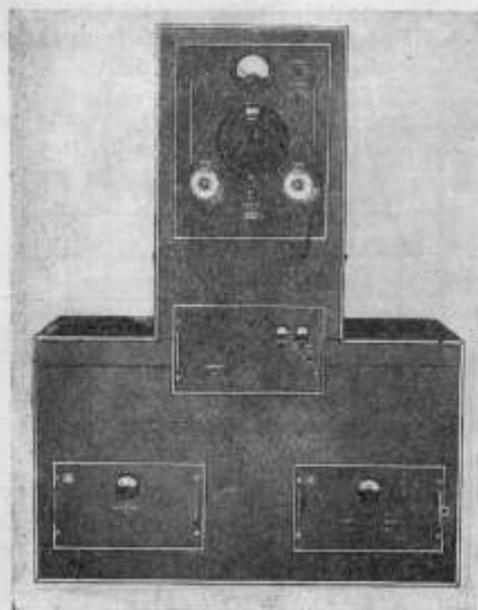


Рис. 7. Внешний вид генератора.

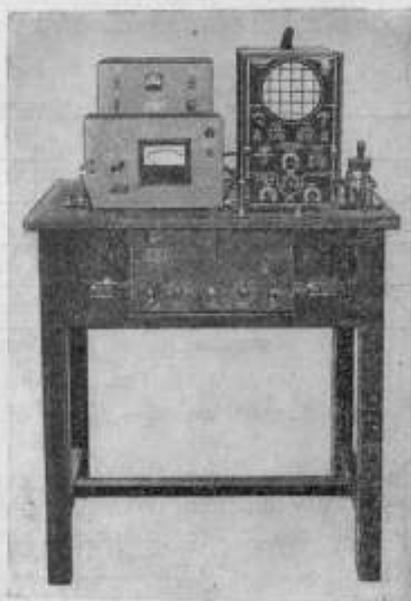


Рис. 8. Указательная часть.

Селективный фильтр на восемь фиксированных частот (125, 400, 800, 1000, 5000, 10 000, 15 000, 20 000 гц) предназначен для выделения основной

Таблица 13

Номинальное значение частоты, гц	Действительное значение частоты, гц
125	122
400	403
800	850
1 000	1 007
5 000	4 730
10 000	9 850
15 000	14 900
20 000	20 100

частоты из сложной кривой напряжения на диагонали мостовой схемы и одновременного усиления сигнала. Коэффициент усиления порядка 10000—20000, добротность контуров порядка 50. Кривые резонанса фильтра для нескольких фиксированных частот приведены на рис. 10. Действительные значения резонансных частот отличались от номинальных и приводятся в табл. 13.

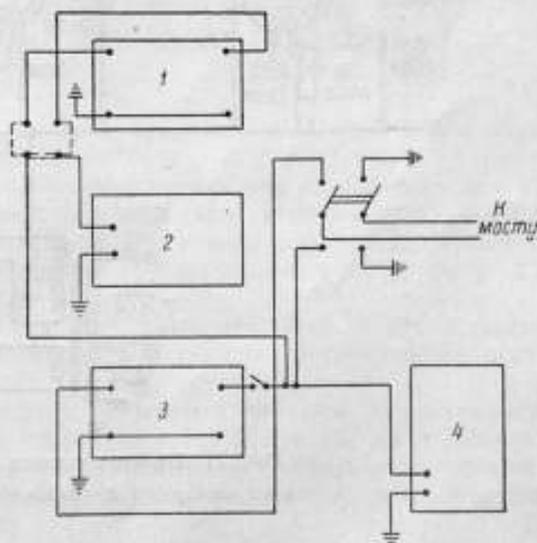


Рис. 9. Скелетная схема указателя:

1 — усилительная приставка; 2 — ламповый вольтметр;
2 — фильтр; 4 — осциллограф.

Вследствие того, что мост состоит из высокоомных сопротивлений, непосредственное присоединение на выход могло бы сильно снизить избирательность фильтра, поэтому для связи фильтра с нагрузкой применен еще каскад усилителя с катодным выходом, играющий роль выходного трансформатора. Входное сопротивление такого каскада очень велико и не оказывает никакого шунтирующего действия. Вместе с тем его выходное сопротивление очень мало.

Питание фильтра осуществляется от сети переменного тока напряжением 127 в, частотой 50 гц через силовой трансформатор. Анодное питание ламп производится через двухполупериодный выпрямитель, работающий на лампе 4 и фильтрующей П-образной ячейке.

МОСТОВАЯ УСТАНОВКА И ЕЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Мостовая установка предназначена для определения зависимости проницаемости и потерь на гистерезис и вихревые токи от напряженности магнитного поля при частотах 125, 400, 800, 1000, 5000, 10 000, 15 000 и 20 000 гц.

Конструктивное выполнение мостовой установки позволяет путем несложных переключений ключей K_1, K_2, K_3, K_4 и K_5 в гнезда 2, 3, 4, 5, 6, 10 и 11 осуществлять в соответствии с табл. 14 одну из трех схем, указанных на рис. 6.

Приципиально-монтажная схема установки, соответствующим образом экранированная, приведена на рис. 12, а ее внешний вид — на рис. 13.

Переключатель указателя равновесия позволяет подавать на блок указателя либо падение напряжения на зажимах образцовой катушки сопротивления, либо вторичную э. д. с., индуктированную в измерительной обмотке образца, либо напряжение на диагонали моста при его уравнивании.

Ввиду того, что мостовая установка предназначена для определения индуктивности L и активного сопротивления R_x , то для проверки ее в первую очередь было проведено измерение образцовых мер индуктивности с известным активным сопротивлением¹. Это испытание в то же время должно было установить пределы значений L_x и R_x , в которых они одновременно могут быть измерены с минимальной погрешностью (по L_x не более 2% и по R_x — не более 5%²).

Чтобы проводить измерения L_x и R_x с погрешностями одного порядка, необходимо иметь значения активных и реактивных сопротивлений испытываемых мер также одного порядка.

В табл. 15 приведены результаты испытания катушек индуктивности в 1,0 гн с собственным активным сопротивлением 216 и 157 ом и катушки в 0,001 гн с сопротивлением 1,93 ом, последовательно с которыми включалось дополнительное сопротивление (магазин с малой остаточной реактивностью типа МСП-4 завода «Эталон»).

Как видно из таблицы, не при любых соотношениях L_x и R_x возможно измерение этих величин совместно и одновременно, если даже ограничиться относительно невысокой точностью (в 2% при измерении индуктивности и в 5% при измерении потерь).

¹ При частотах до 5000 гц и при относительно невысоких требованиях к точности за активное сопротивление принималось сопротивление постоянному току.

² Несколько большая погрешность в R_x допускается вследствие того, что $R_x = L_x \omega^2 CR$.

Таблица 14

Ключ	Номера гнезд, соответствующие		
	схеме I	схеме II	схеме III
K_1	2	3	2
K_2	4	5	5
K_3	6	5	6
K_4	10	10	—
K_5	11	11	—

Таблица 15

Реактивная составляющая измераемого сопротивления ωL_x , ом	Частота f , гц	Активное сопротивление катушки индуктивности R_N , ом	Добавочное сопротивление R_D , ом	Измеренное значение суммарного сопротивления $R_x = R_N + R_D$, ом	Индуктивность катушки $L_x \cdot N^2$, гн	Измеренное значение индуктивности L_x , гн	Погрешность при измерении, %	
							сопротивления $\frac{\Delta R_x}{R_x}$	индуктивности $\frac{\Delta L_x}{L_x}$
2510	400	157	0	159	1,0	0,996	1,3	0,4
2510	400	157	40	204	1,0	0,997	3,5	0,3
2510	400	157	140	306	1,0	0,996	4,3	0,4
2510	400	157	240	409	1,0	0,996	4,0	0,4
2510	400	157	840	1016	1,0	0,994	1,9	0,6
6280	1 000	157	0	138	1,0	1,000	12,5	0
6280	1 000	157	40	186	1,0	1,000	5,5	0
6280	1 000	157	140	283	1,0	1,000	4,6	0
6280	1 000	157	840	979	1,0	1,000	1,8	0
6280	1 000	157	5840	6001	1,0	1,005	0,1	0,5
2510	400	216	0	199	1,0	1,007	7,7	0,7
2510	400	216	400	590	1,0	1,008	4,2	0,8
5020	800	216	0	181	1,0	1,015	16,2	1,5
5020	800	216	400	569	1,0	1,016	7,7	1,6
5020	800	216	800	964	1,0	1,016	5,2	1,6
6280	1 000	216	0	130	1,0	1,020	40	2,0
6280	1 000	216	500	617	1,0	1,023	14	2,3
6280	1 000	216	1000	1058	1,0	1,023	14	2,3
6280	1 000	216	2000	2057	1,0	1,028	12	2,8
6280	1 000	216	5000	4900	1,0	1,028	6	2,8
6,28	1 000	1,93	0	1,93	0,001	0,001008	0	0,8
6,28	1 000	1,93	2	3,93	0,001	0,001008	0	0,8
6,28	1 000	1,93	5	6,93	0,001	0,001008	0	0,8
6,28	1 000	1,93	10	11,93	0,001	0,001008	0	0,8
6,28	1 000	1,93	20	21,93	0,001	0,001007	0	0,7
6,28	1 000	1,93	100	101,98	0,001	0,001006	0	0,6
125,6	20 000	1,93	0	8,2	0,001	0,000968	300	3,2
125,6	20 000	1,93	50	55,5	0,001	0,000965	6,5	3,5
125,6	20 000	1,93	100	95,4	0,001	0,000960	6,5	4,0
125,6	20 000	1,93	500	485	0,001	0,000956	3,4	4,4
125,6	20 000	1,93	1000	968	0,001	0,000859	3,3	14,1

Однако измерение малых индуктивностей (порядка 0,001—0,01 μH) с соответствующими им потерями возможно во всем диапазоне звуковых частот с указанной выше погрешностью.

Дополнительно на изготовленной установке были определены индуктивности и сопротивления потерь различных катушек при разных частотах. Данные эти приведены в табл. 16. Номинальное значение индуктивности катушек отличалось от действительного не более 0,2%, а за действительное значение сопротивления потерь было взято сопротивление, измеренное на постоянном токе.

Таблица 16

Номинальное значение индуктивности, μH	Частота, гц	Номинальное значение сопротивления на постоянном токе, ом	Измеренное значение индуктивности, μH	Измеренное значение активного сопротивления, ом	Погрешность при измерении, %	
					сопротивления	индуктивности
0,001	125	1,93	0,001016	1,90	1,5	1,6
	400	1,93	0,001007	1,89	2,1	0,7
	800	1,93	0,001007	1,89	2,1	0,7
	1 000	1,93	0,001008	1,89	2,1	0,8
	5 000	1,93	0,001009	1,89	2,1	0,9
	10 000	1,93	0,001008	1,86	3,7	0,8
	15 000	51,9 ¹	0,001015	50,0	4,0	1,5
	20 000	51,9 ¹	0,000994	51,2	1,4	0,6
0,01	125	5,96	0,00983	5,72	4,0	1,7
	400	5,96	0,00992	5,71	4,2	0,8
	800	5,96	0,00991	5,69	4,5	0,9
	1 000	56,0 ¹	0,00996	55,5	0,9	0,4
	5 000	106 ¹	0,00998	104	2,0	0,2
	10 000	206 ¹	0,01002	195	5,3	0,2
	20 000	1006 ¹	0,01024	954	5,2	2,4
	0,1	125	39,6	0,1004	39,8	0,5
400		39,6	0,1007	40,0	1,0	0,7
800		39,6	0,1005	37,5	5,3	0,5
1 000		89,6 ¹	0,1005	86,0	4,0	0,5
1,0	125	217	0,996	216	0,5	0,4
	400	217	1,001	206	5,1	0,1
	800	1217 ¹	1,004	1165	4,3	0,4

¹ С добавочным сопротивлением.

Как видно из данных табл. 15 и 16, всегда можно подыскать такое соотношение L_x и R_x , чтобы на данном мосте при измерении этих величин одновременно получить погрешность не выше 2% для индуктивности и 5% для сопротивления.

В табл. 17 для интервала частот 100—20 000 гц даны такие соотношения.

Требования, приведенные в табл. 17, легко могут быть удовлетворены при испытании образцов магнитных материалов соответственным изменением размеров образца, числа витков и намагничивающего тока.

В качестве примера ниже приводятся данные об индуктивности и сопротивлении образцов трансформаторной стали и пермаллоя (максимальная проницаемость на постоянном токе 120 000 ед. CGS μ_0).

Таблица 17

Трансформаторная сталь. Кольцевой образец: $R_2 = 60$ мм, $R_1 = 45$ мм, высота $h = 11$ мм, число витков 500. Напряженность намагничивающего поля изменяется от 0,02 до 0,2 э при частоте 1000 гц. Соответственно индуктивность изменяется от 0,2 до 0,4 гн и сопротивление потерь — от 300 до 1300 ом. Напряженность намагничивающего поля изменяется от 0,04 до 0,4 э при частоте 100 гц и соответственно индуктивность — от 0,2 до 0,9 гн, а сопротивление потерь — от 20 до 500 ом.

Частота, гц	Возможный предел измерений по индуктивности, гн	Возможный предел измерений по сопротивлению, ом
100	0,001—1	1—200
400	0,001—1	2—1000
1 000	0,001—0,1	20—500
5 000	0,001—0,01	50—200
20 000	0,001—0,01	50—1000

Пермаллой. Кольцевой образец: $R_2 = 20$ мм, $R_1 = 15$ мм, $h = 9$ мм, число витков 30. Напряженность намагничивающего поля изменяется в пределах от 0,002 до 0,1 э при частоте 1000 гц. Соответственно индуктивность

Таблица 18

Напряженность магнитного поля, э	Магнитная индукция, гс, измеренная при частоте, гц				
	0	1000		135	
		на мостовой установке	по среднему значению э. д. с.	на мостовой установке	по среднему значению э. д. с.
0,02	24	23	24	24	24
0,06	125	99	98	100	100
0,10	265	198	191	218	217
0,14	455	306	290	360	360
0,18	710	408	389	548	555
0,20	860	457	438	650	665

изменяется от 0,006 до 0,004 гн и сопротивление потерь — от 40 до 70 ом. Напряженность намагничивающего поля изменяется от 0,001 до 0,01 э при частоте 100 гц и соответственно индуктивность изменяется от 0,004 до 0,07 гн, а сопротивление потерь — от 12 до 26 ом.

В табл. 18 приводятся результаты сравнительных испытаний трансформаторной стали мостовой установкой и методом измерения среднего значения э. д. с. при частотах намагничивающего поля 1000 и 135 гц.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНОЙ СХЕМЫ

Одновременно с разработкой мостовой установки по схемам I, II, III (рис. 6) было проведено исследование резонансной схемы IV, основанной на применении дифференциального трансформатора. К средней точке первичной обмотки дифференциального трансформатора ДТ подводится напряжение от источника питания. Последовательно с одной половиной первичной обмотки включается измеряемое сопротивление ($L_x; R_x$) и конденсатор C , а последовательно с другой половиной — уравновешивающее сопротивление R .

Вторичная обмотка трансформатора подключена к нулевому указателю. Равновесие схемы достигается при компенсации магнитного потока в сердечнике трансформатора, т. е. тогда, когда во вторичной обмотке трансформатора не будет индуцироваться э. д. с. При идентичности обмоток это будет иметь место, очевидно, по достижении равенства модулей и фаз токов, проходящих по обеим половинам первичной обмотки, что произойдет при достижении равенств

$$R = R_x \text{ и } \frac{1}{\omega C} = \omega L_x.$$

При применении дифференциальной схемы уменьшается потребляемая мощность, так как в момент равновесия моста имеют место лишь небольшие

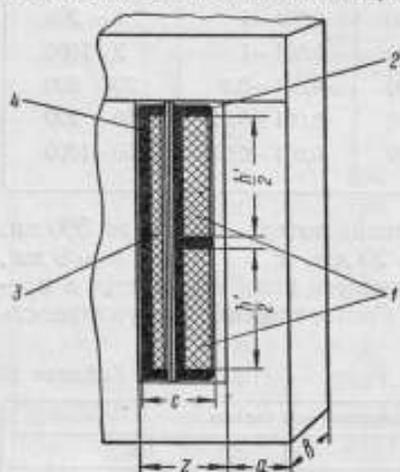


Рис. 14. Ядро дифференциального трансформатора:

1 — первая обмотка; 2 — каркас первой обмотки; 3 — вторая обмотка; 4 — каркас второй обмотки.

потери, вызываемые активным сопротивлением первичной обмотки дифференциального трансформатора. Дифференциальный мост является тем более чувствительным, чем меньше рассеяние трансформатора. Для повышения чувствительности иногда применяют переменный конденсатор, включенный параллельно первичной обмотке трансформатора и служащий для настройки на частоту питающего тока.

Схема с дифференциальным трансформатором, подвергавшаяся исследованию в лаборатории и служившая для измерения магнитных характеристик на повышенных частотах, имела следующие элементы:

1. Дифференциальный трансформатор, данные о котором приведены на рис. 14 и в табл. 19, где a , b — размеры сечения магнитопровода; Z — ширина окна магнитопровода; h — высота окна магнитопровода; v_c — объем стали; l_c — средняя длина магнитопровода; ω_1 — число витков первичной обмотки; ω_2 — число витков вторичной обмотки; d — диаметр провода; c — толщина обеих обмоток трансформатора с учетом толщины стенок каркаса (из латуни).

Таблица 19

Тип сердечника	a , см	b , см	Z , см	h , см	v_c , см ³	l_c , см	ω_1	ω_2	Провод	d , мм	c , см
Ш-11	1,1	1,0	1,15	3,4	11	10	1200	400	ПЭШО	0,33	1,13

2. Трехдекадный магазин емкостей типа МЕ-3 ($0,1 \times 10$; $0,01 \times 10$; $0,001 \times 10$) мкф.

3. Воздушный конденсатор переменной емкости ($0,0007-0,0036$) мкф.

4. Шестидекадный магазин сопротивления для переменного тока типа МСП-4 изготовления завода «Эталон» (10000×10 ; 1000×10 ; 100×10 ; 10×10 ; 1×10 ; $0,1 \times 10$) ом.

5. Ламповый вольтметр, служащий для измерения средних значений э. д. с., типа ЛВ-1 изготовления завода «Эталон».

6. Селективный фильтр.

7. Образцовая катушка сопротивления на 1 ом.

8. Блок генератора с усилителем.

Как уже было сказано выше, для уничтожения результирующего потока, создаваемого первичной обмоткой, необходимо, кроме равенства измеряемого и образцового сопротивлений, точно подогнать обе половины первичной

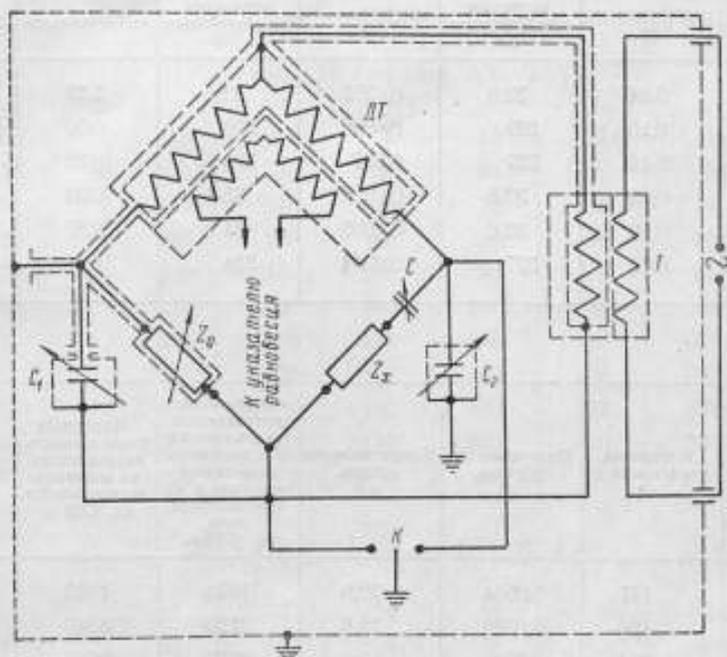


Рис. 15. Схема с дифференциальным трансформатором:

ДТ — дифференциальный трансформатор; Т — разделительный трансформатор;
 Z_0 — магазин сопротивлений; С — магазин емкостей; Z_x — испытуемый образец;
 К — ключ; C_1 и C_2 — емкости симметрирующей ветви.

обмотки по индуктивным и активным сопротивлениям, а также добиться равенства индукции в правой и левой ветвях сердечника трансформатора. Погрешность измерений устанавливалась на основании данных измерения катушек индуктивности, имеющих параметры L и R того же порядка, что и образцы испытуемых материалов.

Как показали исследования, наиболее существенным является экранирование элементов схемы и, в первую очередь, дифференциального трансформатора, а также тщательное симметрирование половин трансформатора. Наиболее удовлетворительные результаты были получены на схеме рис. 15.

Данные испытания трансформатора приводятся в табл. 20, где U_1 — напряжение, приложенное к первичной обмотке трансформатора,

а U_2 — напряжение на выходе дифференциального трансформатора.

Погрешность дифференциальной схемы при измерении L и R также зависит от соотношения между активным и индуктивным сопротивлениями испытуемого образца. В табл. 21 приведены данные измерения индуктивности и активного сопротивления вариометра.

Таблица 20

$f, \text{ кГц}$	$U_1, \text{ В}$	$U_2, \text{ В}$	$\frac{U_2}{U_1} \cdot 100, \%$
500	6,0	0,00016	0,0108
1 000	6,0	0,0010	0,0167
2 000	6,0	0,0016	0,0268
4 000	6,0	0,0020	0,0334
5 000	6,0	0,0029	0,0380
10 000	6,0	0,0210	0,0450

Таблица 21

Частота, гц	Номинальные значения измеряемых		Измеренные значения		Относительная погрешность при измерении, %	
	индуктивности, гн	активного сопротивления, ом	индуктивности, гн	активного сопротивления, ом	индуктивности	активного сопротивления
1000	0,04	32,8	0,0395	32,0	1,25	2,44
1000	0,10	327	0,0995	326	0,50	0,30
1000	0,40	327	0,397	320	0,20	2,14
3000	0,03	32,8	0,0299	33,4	0,33	1,85
4000	0,03	32,8	0,0298	34,0	0,67	3,65
5000	0,10	327	0,0984	334	1,60	2,14

Таблица 22

Напряженность магнитного поля, э	Магнитная индукция, гс^1	Индуктивность образца, гн	Сопротивление потерь, ом	Магнитная проницаемость, подсчитанная по измеренным значениям индукции и напряженности поля, ед. CGS μ_e	Магнитная проницаемость, подсчитанная по значению индуктивности, ед. CGS μ_e	Потери на гистерезисе и вихревые токи, вт/кг
0,059	117	0,0564	32,6	1990	1950	0,00206
0,071	120	0,0589	35,6	2120	2040	0,00230
0,100	284	0,0724	60,0	2600	2500	0,0132
0,325	1 485	0,108	89,9	4560	3730	0,167
0,536	3 010	0,123	284	5610	4250	1,49
0,690	4 010	0,128	326	5820	4420	2,84
1,060	6 680	0,145	307	6310	5010	6,35
1,255	7 510	0,139	280	6010	4800	8,10
2,610	10 360	0,113	150	4130	3920	17,3

¹ H_{max} — подсчитывалась по измеренному среднему значению э , з. с.

Как видно из этих данных, точность определения индуктивности и активного сопротивления для частот до 5000 гц является достаточно удовлетворительной.

Таблица 23

Значения магнитной проницаемости, ед. CGS μ_e	
мостовая схема	дифференциальная схема
1810	1950
1980	2030
2260	2500

В табл. 22 приведены результаты испытания трансформаторной стали ВЧ при частоте 400 гц на описанной выше дифференциальной установке.

В табл. 23 приведены результаты сравнения дифференциального и мостового методов в той области, где они дают перекрывающиеся друг друга значения. Данные относятся к образцу трансформаторной стали марки ВЧ толщиной 0,2 мм, испытанному при частоте 400 гц в условиях синусоидального намагничивающего поля.

В заключение приведем результаты определений магнитных характеристик некоторых листовых материалов (табл. 24).

Таблица 21

Напряженность намагничивающего поля, э	Магнитная индукция, эс, при частоте, гц						
	0	50	400	1000	5000	10 000	20 000
Сплав 50 Н (толщина 0,35 мм)							
0,005	15	15	14	12	5,0	3,0	2,0
0,010	30	30	29	24	10	6,5	4,0
0,030	115	110	93	72	29	19	13
0,050	270	260	180	130	48	30	24
0,070	630	480	280	190	70	45	30
0,080	1 030	620	340	220	80	53	35
0,10	2 500	970	460	290	100	65	43
0,15	5 550	2 430	800	460	165	105	70
0,20	7 150	4 150	1 150	650	230	150	100
0,40	9 500	8 500	3 150	1 620	480	300	200
1,00	11 300	10 900	7 600	4 800	1 700	1 050	750
Сплав 50 НХС (толщина 0,35 мм)							
0,005	30	30	24	19	8,0	5,5	4,0
0,010	60	60	52	39	15	10	7,0
0,020	180	164	116	84	30	19	12
0,030	420	340	190	132	48	30	19
0,050	1470	850	390	240	80	50	32
0,070	2570	1500	600	350	115	72	47
0,10	3600	2650	940	510	167	107	70
0,20	5000	4670	2250	1180	380	280	140
0,40	6200	5800	4600	2550	800	470	330
0,80	7250	6800	6300	4650	1700	1050	700
1,00	7550	—	6600	5600	2100	1300	850
Сплав 80 НХС (толщина 0,35 мм)							
0,005	200	180	60	33	12	7,5	5,0
0,007	380	260	85	48	17	11	7,0
0,010	1150	390	120	68	24	15	10
0,020	2650	840	250	140	49	32	20
0,030	3050	1400	400	220	75	49	31
0,050	3500	2780	730	390	140	83	54
0,070	3800	3440	1120	600	200	120	80
0,100	4150	3860	1680	950	290	190	120
0,20	4650	4460	2940	1740	650	410	270
0,40	5150	5020	4250	2860	1190	820	580
1,0	5800	5550	5280	4850	2250	1 550	1 120

Напряженность намагничивающего поля, э	Магнитная индукция, гс, при частоте, мд						
	0	50	400	1000	5000	10 000	20 000
Гиперм 702 (толщина 0,35 мм)							
0,005	200	180	70	30	12	8,0	5,5
0,010	600	400	130	70	25	17	11
0,020	2550	900	260	150	53	34	23
0,030	3400	1470	400	230	80	52	35
0,050	4350	2660	730	410	140	88	58
0,070	4750	3760	1100	600	200	130	90
0,10	5150	4790	1650	920	300	190	140
0,20	5900	5700	2850	1760	660	410	280
0,40	6350	6240	4480	2920	1200	820	560
0,80	6650	6550	6150	4450	1950	1350	970
1,00	6750	6600	6300	5000	2200	1550	1120
Мо-пермаллой (толщина 0,35 мм)							
0,005	200	130	50	38	15	8,0	5,0
0,010	600	310	120	75	29	17	12
0,020	3150	770	265	155	58	36	24
0,030	4150	1400	430	250	90	56	37
0,050	5050	3170	820	440	155	98	64
0,070	5500	4200	1260	660	220	143	92
0,10	5950	5280	1890	1000	330	210	140
0,20	6550	6400	3220	1950	720	470	300
0,40	7100	—	4830	3170	1300	780	600
1,00	7700	—	—	5150	2350	1650	1180

ВЫВОДЫ

1. Наиболее простой методикой определения зависимости $B_{\max} = f(H_{\max})$ является метод «среднего вольтметра», обеспечивающий возможность снятия указанных кривых в широком диапазоне индукций для различных материалов при частотах звукового диапазона.

Погрешность метода оценивается величиной порядка 5%.

2. Для определения зависимости $B_{1\max} = f(H_{1\max})$ может быть рекомендован для различных материалов в широком диапазоне частот мостовой метод. Диапазон индукций при мостовых измерениях не превышал в наших условиях 2000 гс, однако литературные данные говорят и о более высоких значениях. Погрешности измерений мостовым методом составляют для проницаемости величину порядка 2%, для потерь — 6%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Campbell A., „On the Use of Mutual Inductometers“. Proc. of the Phys. Soc. of London, 1910, p. 207.
2. Webb C. E., Principles of Electric and Magnetic Measurements, London, 1946.

**МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ
НАМАГНИЧИВАНИИ ПОСТОЯННЫМ И ПЕРЕМЕННЫМ
ПОЛЯМИ**

В последнее время в различных областях техники все большее распространение приобретают устройства, содержащие ферромагнитные сердечники, намагничиваемые одновременно переменным и постоянным полями. Несмотря на это, магнитные характеристики материала, получаемые в условиях двойного намагничивания, не нормализованы и не установлена методика их определения.

Как показано в статье Е. Т. Чернышева и Е. Н. Чечуриной, при таких условиях намагничивания можно рекомендовать два семейства зависимостей средней проницаемости μ_{Δ} от напряженности постоянного поля H_0 .¹ При этом одно из семейств определяется в условиях синусоидального² характера изменения переменной составляющей напряженности поля H_{\sim} , а другое — в условиях синусоидального изменения переменной составляющей индукции B_{\sim} . Средняя проницаемость определяется выражением

$$\mu_{\Delta} = \frac{B_{\max} + B_{\min}}{H_{\max} + H_{\min}}, \quad (1)$$

где B_{\max} и H_{\max} — максимальные значения переменных составляющих индукции и напряженности поля;

B_{\min} и H_{\min} — минимальные значения тех же величин.

Асимметрия кривых индукции и напряженности поля не позволяет упростить формулу (1), заменив в ней отношение сумм амплитуд просто отношением амплитуд, как это обычно делается при определении проницаемости на переменном токе. Поэтому при экспериментальном определении средней проницаемости необходимо либо непосредственно определять сумму амплитуд, либо измерять максимальные и минимальные значения отдельно. Последний метод далеко не всегда удобен, так как он прежде всего требует двух измерений. Кроме того, если каждое из амплитудных значений переменной составляющей напряженности поля (в случае изменения индукции по синусоидальному закону) может быть достаточно просто определено, то измерение каждого из амплитудных значений несимметричной переменной составляющей индукции (когда напряженность поля изменяется по синусоидальному закону) представляет большие трудности. В этом случае необходима сложная обработка кривой э. д. с., полученной осциллографическим путем.

Все сказанное выше заставило определять непосредственно сумму амплитуд индукции и напряженности поля.

¹ См. статью настоящего сборника, стр. 51.

² Под синусоидальными понимаются величины, практически близкие к синусоидальным.

Суммы амплитуд индукции B_{Δ} и напряженности поля H_{Δ} связаны со средними значениями индуктированных э. д. с. в измерительной обмотке на образце E_{2cp} и во вторичной обмотке катушки взаимной индуктивности E_{McP} , включенной в намагничивающую цепь переменного тока, нижеследующими выражениями:

$$E_{2cp} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} (\omega_2 \cdot s \cdot \frac{\partial B}{\partial t}) dt = 2\omega_2 \cdot f \cdot s \cdot B_{\Delta} \cdot 10^{-8}, \quad (2)$$

$$E_{McP} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} (M \frac{di}{dt}) dt = \frac{10f \cdot M \cdot r_h}{w_-} \cdot H_{\Delta}, \quad (3)$$

где f — частота намагничивающего тока в герцах;
 M — коэффициент взаимной индуктивности катушки в генри;
 s — площадь поперечного сечения образца в кв. сантиметрах;
 r_h — средний гармонический радиус образца в сантиметрах (для кольцевого образца);
 ω_2 и ω_- — число витков измерительной и намагничивающей обмоток переменного тока.

При выборе схемы установки, предназначенной для испытания материалов в условиях двойного намагничивания, возникает вопрос о способе намагничивания постоянным полем: создавать ли это поле постоянным током, протекающим через специальную обмотку, расположенную на образце, или через обмотку переменного тока.

Применение схем с раздельным питанием обмоток постоянным и переменным токами удобнее, нежели схем с общим питанием. Включение в цепь переменного тока аккумуляторов приводит к быстрой разрядке их, а для плавного изменения постоянного тока требуется включение регулировочных реостатов, что недопустимо при испытании небольших образцов в условиях синусоидальной индукции. Наконец, даже в случае испытания образцов в условиях синусоидального поля при регулировании постоянного тока реостатами, находящимися в цепи переменного тока, нарушается требование постоянства амплитудного значения напряженности переменного поля, которое должно выполняться для получения характеристики вида $\mu_{\Delta} = f(H_0)$ при $H_{\sim} = H_{max} \cdot \sin \omega t$. Схема с раздельным питанием имеет лишь один существенный недостаток — она требует наличия в цепи постоянного тока большой индуктивности для ограничения индуктированных переменных токов.

На рис. 1 приведена принципиальная схема с раздельным питанием, предназначенная для определения средней проницаемости кольцевых образцов путем измерения средних значений индуктированных э. д. с. в измерительной обмотке на образце и во вторичной обмотке катушки взаимной индуктивности. Для подкрепления результатов определения средней проницаемости методом измерения средних значений индуктированных э. д. с. они были сопоставлены с результатами графо-аналитического расчета средней проницаемости и с результатами измерений баллистическим методом на постоянном токе. Графо-аналитическим способом подсчитывались сумма амплитуд напряженности переменного поля и индукции непосредственно по кривой напряженности поля и по кривой переменной составляющей индукции. Последняя кривая строилась, как показано на рис. 2, для заданного значения напряженности постоянного поля H_0 по гистерезисным петлям и кривым возврата, предварительно полученным для испытуемого образца, т. е. по частной несимметричной гистерезисной петле, по которой в данном случае происходило изменение магнитного состояния материала.

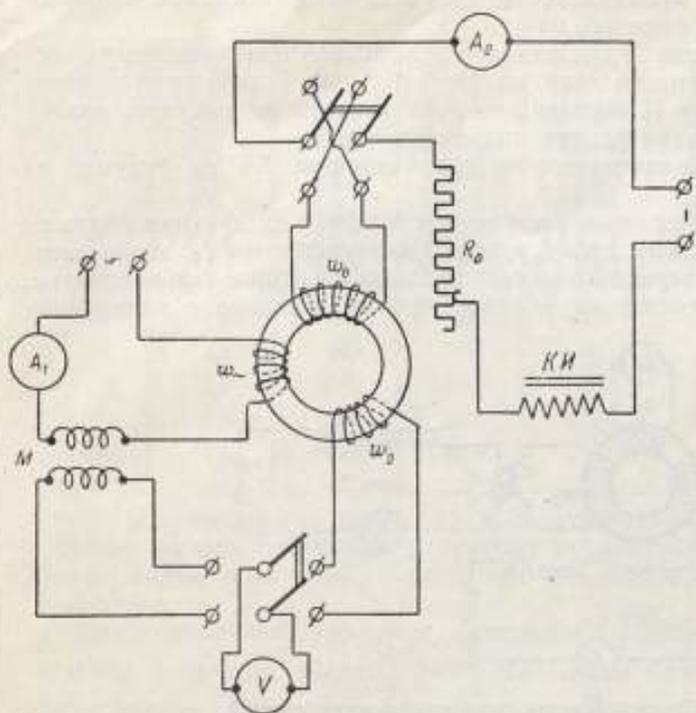


Рис. 1. Принципиальная схема определения средней проницаемости материала кольцевых образцов при намагничивании переменным и постоянным полями.

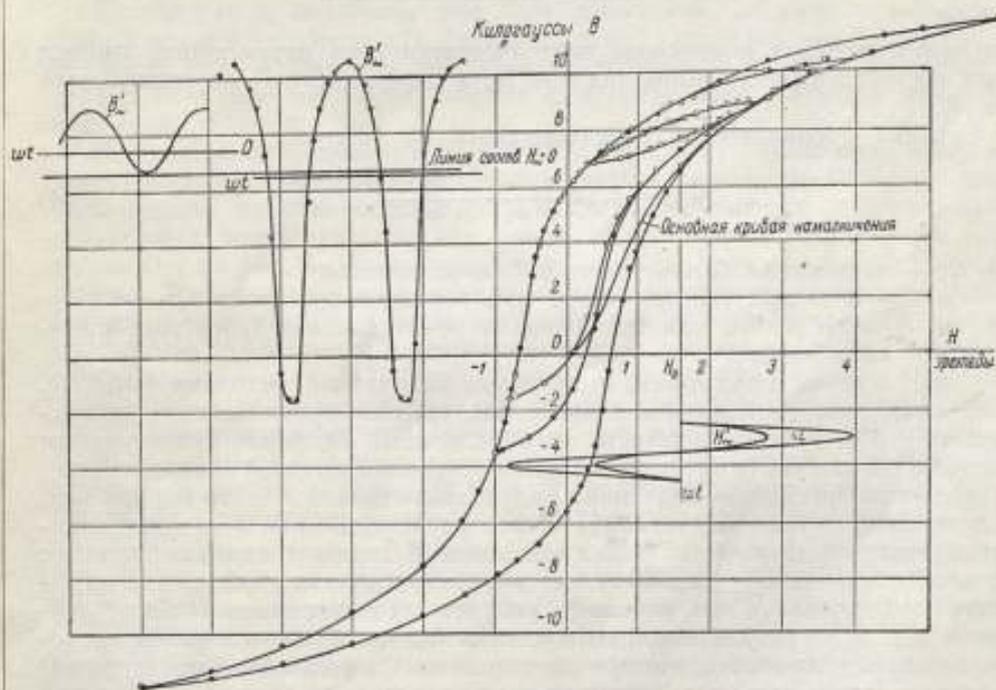


Рис. 2. Построение переменной составляющей индукции по гистерезисным петлям и кривым возврата.

Измерения средней проницаемости баллистическим методом производились по схеме, изображенной на рис. 3.

Здесь обозначения цепи II постоянного тока полностью совпадают с обозначениями цепи постоянного тока на рис. 1. Цепь I переменного тока (рис. 3) аналогична цепи II постоянного тока на этом же рисунке, только в ней отсутствует ограничительная индуктивность.

Цепь градуировки баллистического гальванометра БГ на рисунке не показана.

Измерения баллистическим методом осуществлялись следующим образом. После установки постоянного тока I_0 в цепь I включался ток I_1 , эквивалентный переменному, и при переключении его наблюдался отброс гальванометра. Изменение магнитного состояния образца при этом сходно с изменением

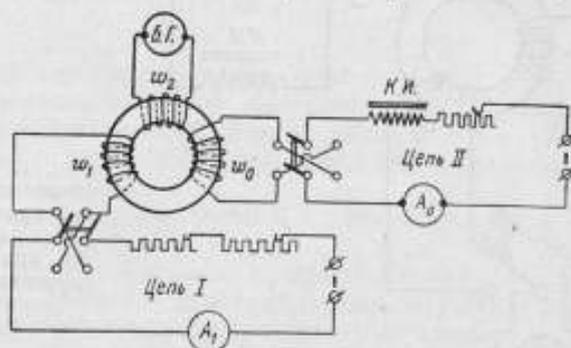


Рис. 3. Принципиальная схема определения средней проницаемости баллистическим методом.

при наложении на постоянное поле симметричного переменного, причем роль постоянного тока выполнял ток I_0 , а переменного — переключаемый ток I_1 .

Средняя проницаемость подсчитывалась по формуле:

$$\mu_{\Delta} = \frac{B_{\Delta}}{H_{\Delta}} = \frac{C_{\text{г}} \cdot \alpha}{s \cdot w_2} \cdot \frac{r_{\text{н}}}{0,4 \cdot w_1 \cdot I_1}, \quad (4)$$

где $C_{\text{г}}$ — постоянная баллистического гальванометра;

α — отклонение гальванометра при переключении тока I_1 ;

w_2 — число витков намагничивающей обмотки постоянного тока (переключаемого).

Сопоставление результатов, полученных различными методами (табл. 1), показывает, что расхождение в значениях средней проницаемости не превышает $\pm 5\%$, т. е. погрешности их определений. Особенно существенным является совпадение (в пределах точности измерений) средней проницаемости, определенной по средним значениям индуцированных э. д. с., со значениями, полученными путем графо-аналитического расчета, так как последний исходит из частной несимметричной гистерезисной петли и отражает процесс изменения магнитного состояния материала в условиях двойного намагничивания. Совпадение же значений, полученных измерением средних значений э. д. с., с результатами определения баллистическим методом позволяет сделать заключение, что при симметричном (относительно оси времени) характере изменения напряженности переменного поля низкой частоты для материалов, обладающих небольшой электропроводностью, испытания при наложении постоянного поля на переменное можно заменять испытаниями на постоянном токе по схеме, изображенной на рис. 3.

Возвращаясь к схеме, приведенной на рис. 1, можно заметить, что она пригодна при испытании материала как в условиях синусоидального изме-

Таблица 1

Напряженность постоянного поля, э	Амплитудное значение напряженности переменного поля, э	Средняя проницаемость, определенная баллистическим методом, ед. СГСЭ	Средняя проницаемость, определенная приборами среднего значения э. д. с. на переменном токе, ед. СГСЭ	Расхождение между средней проницаемостью, определенной на переменном и постоянном токах, %	Средняя проницаемость, определенная графо-аналитическим методом, ед. СГСЭ	Расхождение между средней проницаемостью, определенной графо-аналитическим и баллистическим методами, %	Расхождение между средней проницаемостью, определенной графо-аналитическим методом и методом измерения средних значений э. д. с., %
1,6	0,6	620	650	+4,3	630	+1,6	2,7
1,6	1,2	940	910	-3,1	960	+2,2	5,2
1,6	2,4	2520	2480	-1,5	2500	-0,7	0,8
0,4	2,6	3280	3380	+3,0	3290	0,0	3,0
0,4	1,4	3980	4020	+1,0	—	—	—

нения напряженности поля, так и синусоидального изменения индукции. Переход от одного режима к другому осуществляется изменением соотношений индуктивного (ωL) и активного (R) сопротивлений цепи переменного тока.

Синусоидальный характер изменения напряженности поля обычно удается получить, когда $\frac{R}{\omega L} > 70$. Изменение же индукции по синусоидальному закону достигается обычно при $\frac{\omega L}{R} > 70$.

Исследования показали, что при испытании различных материалов весьма несложно обеспечить синусоидальный характер изменения напряженности поля в широком диапазоне постоянных и переменных полей, но трудно получить на низкой частоте синусоидальный характер изменения индукции.

В отличие от испытаний материалов только на переменном токе, при одновременном намагничивании постоянным и переменными полями величина средней проницаемости весьма существенно зависит от формы волны переменных составляющих. Последнее иллюстрируется графиками, приведенными на рис. 4, из которых видно, что при синусоидальной индукции (кривая 2) в некотором диапазоне полей средняя проницаемость значительно меньше, чем при синусоидальной напряженности поля (кривая 1). Явление это обычно объясняется подмагничивающим действием четных гармоник напряженности поля [1]. Подобно тому, как это было сделано при синусоидальном поле, целесообразно сопоставить также результаты определения средней проницаемости при синусоидальной индукции методом измерения средних значений индуктированных э. д. с. с результатами, полученными каким-либо другим методом. В табл. 2 дано такое сопоставление со значениями μ_s , подсчитанными по сумме амплитуд напряженности поля, определенной осциллографированием напряжения на малом активном сопротивлении, включенном в цепь переменного тока.

Схема для соответствующего эксперимента представлена на рис. 5.

Значение напряжения, соответствующее отклонению луча на экране электронного осциллографа на 1 мм, определялось по известному падению напряжения на R_{N_2} :

$$C = \frac{2(U_{\max})N_2}{n}, \quad (5)$$

где n — длина световой полосы на экране осциллографа при включении его на R_{N_2} .

При переключении осциллографа в положение 1 на экране его (при наличии развертки во времени) воспроизводится кривая напряжения на сопротивлении R_{N_1} . Если же развертка не дается, то на экране наблюдается световая полоса, эквивалентная сумме амплитуд переменного напряжения U_{N_1} , измеряя длину которой n' в миллиметрах можно подсчитать сумму амплитуд напряжения на сопротивлении R_{N_1} :

$$(U_{\max})_{N_1} + (U_{\min})_{N_1} = n' C = \frac{2(U_{\max})_{N_2}}{n} n',$$

и сумму амплитуд напряженности поля:

$$H_{\max} + H_{\min} = \frac{0,2\omega}{r_h} \cdot \frac{(U_{\max})_{N_1} + (U_{\min})_{N_1}}{R_{N_1}}. \quad (6)$$

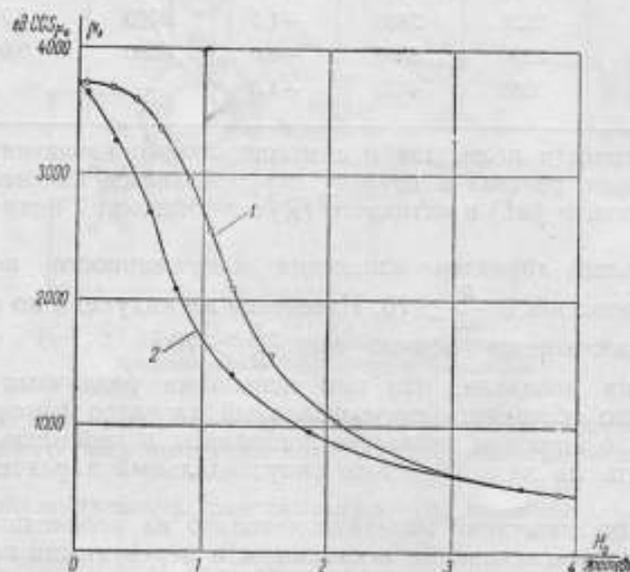


Рис. 4. Кривые зависимости средней проницаемости от напряженности постоянного поля:

1 - $H_{\sim} = H_{\max} \cdot \sin \omega t$ при $H_{\max} = \text{const}$; 2 - $B_{\sim} = B_{\max} \cdot \sin \omega t$ при $H_{\Delta} = \text{const}$. Начальное значение сумм амплитуд напряженности поля для всех кривых $H_{\Delta} = 4,0$ э.

Амплитудное значение синусоидальной индукции определяется по значению синусоидального напряжения, измеренному в измерительной обмотке на образце.

Анализ данных табл. 2 показывает, что расхождения значений μ_{Δ} , полученных различными методами, не превышают $\pm 5\%$. Таким образом, метод измерения средних значений индуктированных э. д. с. вполне применим при испытании материалов как в условиях синусоидального изменения поля, так и синусоидальной индукции.

Для сравнения были получены также значения проницаемости, определенной по первым гармоникам индукции и напряженности поля

$$\mu_1 = \frac{B_{1\max}}{H_{1\max}}.$$

Значения первых гармоник э. д. с. измерялись компенсатором переменного тока.

Таблица 2

Напряженность постоянного поля, э	Амплитудное значение напряженности переменного поля, э	Средняя проницаемость, определенная по средним значениям э. д. с., ед. CGS ₁₀	Средняя проницаемость, определенная осциллографированием напряжения на сопротивлении в цепи переменного тока, ед. CGS ₁₀	Расхождение в значениях средней проницаемости, определенных различными методами, %
1,6	1,56	1020	1000	1,9
	1,76	1100	1100	0,4
	2,04	1205	1220	1,2
	2,30	1315	1340	2,2
	2,61	1450	1450	0,0
	2,94	1590	1600	0,9
2,5	1,12	450	440	1,1
	1,27	610	630	4,1
	1,65	690	720	4,3
	2,82	930	950	1,6
	3,40	1050	1030	1,9
	4,00	1180	1130	4,6
	4,50	1280	1210	5,0

Данные, полученные компенсационным методом в области больших переменных полей, как показал опыт, могут значительно (до 20%) превышать величину средней проницаемости, определенной по действительным амплитудам поля и индукции, причем это наблюдается как при синусоидальном изменении напряженности поля, так и при синусоидальной индукции.

Анализ выражений среднего значения э. д. с. при наличии в них только четных гармонических составляющих или только нечетных выявил, что в первом случае среднее значение полной кривой э. д. с. соответствует среднему значению первой гармоники. С увеличением же удельного веса нечетных гармоник среднее значение первой гармоники растет по сравнению со средним значением полной кривой. Отсюда следует, что лишь при небольшом удельном весе нечетных гармоник в кривых индуктированных э. д. с. измерение вольтметром с выпрямителем можно заменить измерением компенсатором.

Предпочтение было отдано компенсационному методу по сравнению с мостовым, потому что первый может быть применен как при синусоидальной напряженности поля, так и при синусоидальной индукции.

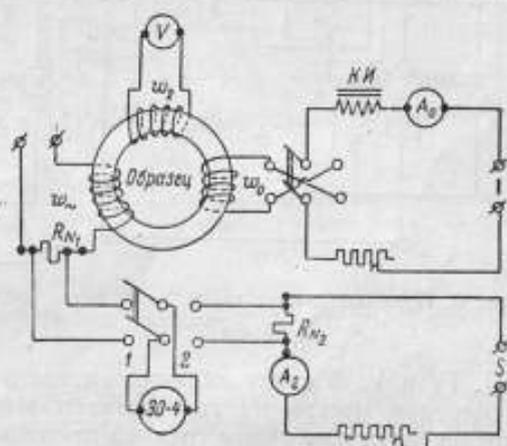


Рис. 5. Принципиальная схема определения средней проницаемости при измерении сумм амплитуд намагничивающего тока осциллографическим путем.

ЭО-4 — электронный осциллограф; R_N — индуктивное образцовое сопротивление; R_N — образцовое сопротивление; A_2 — образцовый амперметр.

Как установлено Н. М. Рудым в его диссертации «Исследование ваттметрового метода измерения потерь на гистерезис и вихревые токи при промышленной и повышенной частотах», погрешность вольтметра с вибрационным выпрямителем связана, главным образом, со временем свободного пробега якоря. Подсчет этой погрешности при измерении напряжений, имеющих различную форму кривой, показал что с увеличением коэффициента формы погрешность, обусловленная свободным пробегом якоря, уменьшается. Последнее подтверждается данными табл. 3, полученными для вибрационного выпрямителя типа МВ-81.

Таблица 3

Коэффициент формы кривой измеряемого напряжения	1,0	1,11	1,15	1,48
Погрешность, в процентах от данного показания	-7,9	-0,8	-0,7	-0,2

Итак, применение вольтметра с вибрационным выпрямителем целесообразно только при измерении напряжений, имеющих коэффициент формы 1,11 и более.

Несмотря на то, что вольтметры с вибрационными выпрямителями дают удовлетворительную точность при измерениях в условиях комбинированного намагничивания, они не всегда удовлетворяют требованиям, предъявляемым практикой. Прежде всего, такие вольтметры обладают значительной частотной погрешностью, в связи с конечным временем свободного пробега якоря, и применимы в узком частотном диапазоне. Кроме того, процесс измерения в этом случае длительнее, чем при применении прибора непосредственной оценки. Эти соображения заставили обратиться к схемам диодных вольтметров, с помощью которых можно производить измерения в более широком диапазоне частот.

На рис. 7 представлена схема диодного вольтметра, разработанного автором, для измерения средних значений искаженных напряжений. Отличие этого вольтметра от существующих конструкций заключается в возможности регулирования положения рабочей точки на начальном участке динамической характеристики диода.

Проведенные исследования показали, что можно подобрать такое положение рабочей точки, при котором и погрешность, вызванная кривизной начального участка характеристики, и погрешность, обусловленная наличием начального тока диода, не будут существенно сказываться на результатах измерений.

Погрешность от нелинейности характеристики весьма подробно исследована Р. И. Янусом [2], проведенные же дополнительно опыты показали, что с увеличением коэффициента формы кривой измеряемого напряжения заметно возрастает погрешность, причем она имеет отрицательный знак.

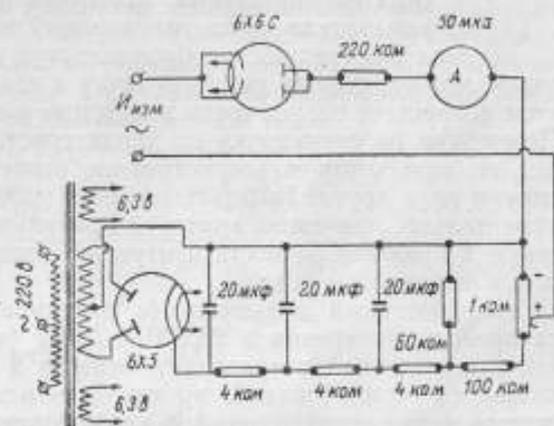


Рис. 7. Принципиальная схема вольтметра с регулируемым положением рабочей точки на характеристике диода.

Для уменьшения влияния этой погрешности на результаты измерения в цепь диода включено нагрузочное сопротивление в 220 ком.¹

Обычно в схемах диодных вольтметров либо вообще пренебрегают начальным током диода, либо компенсируют начальное отклонение указателя измерителя пропусканием через него тока обратного направления. Последнее, по сути дела, аналогично механическому смещению нуля, и положение рабочей точки на характеристике остается неизменным, начальный же ток в цепи диода имеет некоторую конечную величину.

Погрешность, обусловленная наличием начального тока, зависит от формы волны измеряемого напряжения. С увеличением коэффициента формы эта погрешность возрастает, причем она имеет положительный знак. Формула (7) характеризует зависимость указанной погрешности от различных причин. Она выведена в предположении однополупериодного выпрямления и линейности характеристики диода при измерении синусоидальных напряжений:

$$\gamma = 1 - \cos \frac{2\pi}{T} \theta + \frac{U_0}{U_{cp}} \left(1 + \frac{4\theta}{T} \right), \quad (7)$$

где U_0 — напряжение смещения, устраняющее начальный ток диода;

U_{cp} — среднее значение измеряемого напряжения;

T — период измеряемого напряжения;

θ — «угол отсечки», т. е. промежуток времени, в течение которого (при отрицательных значениях измеряемого напряжения) в цепи измерителя проходит анодный ток.

Устранить погрешность, обусловленную наличием начального тока в цепи диода, можно, сместив рабочую точку к началу характеристики, однако при этом возрастает погрешность вследствие нелинейности начального участка. Перемещая рабочую точку по характеристике, можно найти такое положение ее, при котором рассмотренные выше погрешности частично компенсируют друг друга. Выбор положения рабочей точки осуществлялся экспериментально, причем за критерий правильности выбора принималось совпадение, в пределах точности измерений, градуировочных кривых на постоянном и переменном токах.

Разработанный вольтметр (с регулированием напряжения смещения) на пределы измерения в 20, 60 и 120 в был изготовлен заводом «Эталон» и по приведенной погрешности отнесен к классу 1,0. Прибор позволяет, пользуясь общей шкалой, производить измерение средних значений переменных напряжений, имеющих коэффициент формы до двух, и постоянных напряжений, причем относительная погрешность как на постоянном, так и на переменном токах не превышает 1%, если указатель отклоняется не менее чем на 25% шкалы. Кроме того, им можно измерять небольшие напряжения (начиная с 1 в) с относительной погрешностью не более 2,5%. Последнее обеспечивается выбором соответствующего положения рабочей точки на характеристике, выпрямлением последней путем включения в цепь диода значительных нагрузочных сопротивлений, а также применением магнитоэлектрического прибора высокого класса точности.

ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ

Погрешность определения средней проницаемости складывается из погрешности, вызванной измерительным прибором, а также из ряда дополнительных погрешностей, обусловленных различными причинами: погрешности от недостаточного индуктивного сопротивления цепи постоянного тока,

¹ Чрезмерно увеличивать сопротивление нецелесообразно, так как при этом потребуются весьма чувствительные измерители, которые не обладают достаточной точностью.

от искажения кривых напряженности переменного поля или магнитной индукции, погрешностей, обусловленных неполным предварительным размагничиванием образца, влиянием внешних полей, температурными влияниями и др. Рассмотрим эти погрешности и определим условия их исключения.

Погрешность, вызванная собственными погрешностями измерительных приборов

Следуя выводам, данным в работе Е. Г. Шрамкова [3], и пользуясь законом сложения средних погрешностей, можно вывести формулу (8) относительной погрешности определения средней проницаемости с учетом нелинейных функциональных зависимостей последней от напряженности постоянного и переменного полей:

$$R_{\mu_{\Delta}} = \sqrt{R_{B_{\Delta}}^2 + \left[f_1(H_0) \cdot R_{H_0} \cdot \frac{H_0}{\mu_{\Delta}} \right]^2 + \left[f_2(H_{\Delta}) R_{H_{\Delta}} \cdot \frac{H_{\Delta}}{B_{\Delta}} \right]^2}. \quad (8)$$

где $R_{B_{\Delta}}$, R_{H_0} и $R_{H_{\Delta}}$ — относительные погрешности определения суммы амплитуд индукции (B_{Δ}), напряженности постоянного поля (H_0) и суммы амплитуд напряженности переменного поля (H_{Δ});

$f_1(H_0)$ — производная функции $\mu_{\Delta} = f(H_0)$, полученной при $H_{\max} = \text{const}$ (в случае синусоидального характера изменения напряженности поля), либо при $B_{\max} = \text{const}$ (в случае синусоидальной индукции);

$f_2(H_{\Delta})$ — производная функции $B_{\Delta} = f(H_{\Delta})$ при $H_0 = \text{const}$, полученной либо при синусоидальной индукции, либо при синусоидальном поле;

$$R_{B_{\Delta}} = \sqrt{\left(\frac{\partial E_{\text{ср}}}{E_{\text{ср}}} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{f} \right)^2 + \left(\frac{\partial s}{s} \right)^2},$$

$$R_{H_{\Delta}} = \sqrt{\left(\frac{\partial E_{\text{ср}}}{E_{\text{ср}}} \right)^2 + \left(\frac{\partial f}{f} \right)^2 + \left(\frac{\partial r_h}{r_h} \right)^2 + \left(\frac{\partial M}{M} \right)^2},$$

$$R_{H_0} = \sqrt{\left(\frac{\partial I_0}{I_0} \right)^2 + \left(\frac{\partial r_h}{r_h} \right)^2}.$$

На основании опыта магнитной лаборатории ВНИИМ можно принять следующие значения для относительных погрешностей измерения коэффициента взаимной индуктивности M , среднего гармонического радиуса образца r_h , площади поперечного сечения образца s и частоты намагничивающего тока f :

$$\frac{\partial M}{M} = 0,2\%; \quad \frac{\partial r_h}{r_h} = 0,2\%; \quad \frac{\partial s}{s} = 0,3\%; \quad \frac{\partial f}{f} = 0,5\%.$$

Если при этом измерение средних значений искаженных индуктированных э. д. с. производить с помощью описанного выше диодного вольтметра, причем предполагать, что указатель измерителя диодного вольтметра отклоняется не менее чем на 25% шкалы, то $\frac{\partial E_{\text{ср}}}{E_{\text{ср}}} = \frac{\partial E_{\text{ср}}}{E_{\text{ср}}} = 1,0\%$.

В связи с тем, что в формулу (8) входят значения производных $f_1(H_0)$ и $f_2(H_{\Delta})$, величина погрешности при испытании различных материалов может быть различной.

Результаты испытания образцов стали Э4 и молибденового пермаллоя при частоте 50 гц показали, что величина относительной погрешности определения средней проницаемости для этих материалов приблизительно одинакова и не превышает 3,5%, даже при таких значениях H_0 и H_{Δ} , при которых соответствующие производные достигали максимума.

Рассмотренная выше формула (8) учитывает только инструментальную погрешность, но не учитывает случайных погрешностей, обнаруживаемых при повторных измерениях одной и той же величины.

Окончательная формула относительной погрешности определения средней проницаемости имеет вид:

$$R_{\mu_{\Delta}} = \sqrt{R_{\delta_{\Delta}}^2 + \left[f_1'(H_0) R_{H_0} \cdot \frac{H_0}{\mu_{\Delta}} \right]^2 + \left[f_2'(H_{\Delta}) R_{H_{\Delta}} \cdot \frac{H_{\Delta}}{B_{\Delta}} \right]^2} + \frac{\rho^2}{n}, \quad (9)$$

где ρ — вероятная относительная погрешность ряда измерений;
 n — число измерений.

Погрешность, вызванная недостаточным реактивным сопротивлением цепи постоянного тока

Рассматриваемая погрешность связана с протеканием по цепи постоянного тока индуктированного переменного тока, который создает дополнительное поле, не учитываемое при измерении и последующих подсчетах величины H_{Δ} .

Погрешность определения напряженности поля при этом может быть выражена формулой:

$$\gamma = 1 - \cos \delta + \sqrt{\cos^2 \delta - 1 + \frac{H_2^2 \max}{H_1^2 \max}},$$

где $H_{1\max}$ — напряженность поля, создаваемого током, протекающим в цепи переменного тока;

$H_{2\max}$ — напряженность поля, создаваемого индуктированным током, протекающим в цепи постоянного тока;

δ — сдвиг фаз между напряженностью поля $H_{1\max}$ и напряженностью результирующего поля.

Исследования показали, что величина этой погрешности зависит от индуктивности, включенной в цепь постоянного тока, числа витков обмотки постоянного тока и от напряженностей постоянного и переменного полей.

Включенные большой, но мало изменяющейся в процессе измерения индуктивности делает пренебрежимо малой погрешность, обусловленную недостаточным индуктивным сопротивлением цепи постоянного тока. В схеме установки, изображенной на рис. 6, применялась катушка с разомкнутой магнитной цепью индуктивностью порядка 80 мГн .¹

Погрешность, вызванная несинусоидальным характером изменения напряженности намагничивающего поля или магнитной индукции

Исследования показали, что в условиях наложения постоянного поля на переменное величина проницаемости при синусоидальном характере индукции может существенно отличаться от проницаемости при синусоидальной напряженности поля. Вследствие этого искажение кривой напряженности поля (или индукции) приводит к появлению погрешности определения средней проницаемости.

Изучение этой погрешности показало, что для снижения ее до величин, которыми можно пренебречь, необходимо, чтобы коэффициент формы кривой синусоидального намагничивающего тока (или индуктированной э. д. с. в измерительной обмотке на образце) отклонялся не более чем на 2% от значения 1,11. Это можно обеспечить соответствующим подбором соотношений активного и реактивного сопротивлений цепи переменного тока.

¹ При этом на образец наматывалось небольшое число витков намагничивающей обмотки постоянного тока (не более 100 при испытании кольцевых образцов диаметром от 5 до 10 см).

Погрешность, вызванная неполным предварительным размагничиванием образца

Как показали опыты, эта погрешность становится пренебрежимо малой при размагничивании образцов наиболее распространенных материалов переменными полями частотой 50 гц с плавно уменьшающейся амплитудой. При этом амплитуда напряженности размагничивающего поля должна уменьшаться от десятикратной величины коэрцитивной силы материала до напряженности поля в несколько раз меньшей, чем напряженность намагничивающего поля, при которой производится измерение.

Все сказанное выше относится к случаю, когда постоянное поле весьма мало; по мере его увеличения уменьшается погрешность, обусловленная неполным предварительным размагничиванием.

Погрешность, вызванная временным спадом проницаемости

Для того, чтобы можно было пренебречь временным спадом проницаемости для материалов, у которых этот спад наиболее сильно проявляется (типа трансформаторной стали), следовало бы установить длительный промежуток времени после изменения магнитного состояния материала до начала измерения. Ввиду того, что практически это крайне затруднительно, была установлена выдержка в 20 сек. перед каждым измерением, так как наиболее интенсивный спад проницаемости происходит именно в течение этого времени. Возможная погрешность определения проницаемости для кремнистых сталей, вызванная различным спадом проницаемости, в этом случае достигала 0,3%. Величина погрешности снижается при многократных измерениях, при этом она входит составной частью в погрешность результата ряда измерений.

Погрешность, вызванная влиянием внешних магнитных полей

Опыты показали, что влияние внешних полей наиболее заметно сказывается при малых амплитудах переменного поля и при малом постоянном поле. Практически можно пренебрегать влиянием внешних полей (переменных низкой частоты и постоянных) напряженностью до 5 э, если кольцевые образцы помещать в многослойный магнитный экран. Влиянием постоянных полей можно пренебречь, даже не применяя экрана, если плоскость сечения кольцевого образца расположить перпендикулярно направлению вектора напряженности внешнего поля.

Погрешность, вызванная изменением магнитного состояния материала, вследствие отклонения частоты намагничивающего тока от номинального значения

Появление этой погрешности связано с тем, что для материалов, обладающих значительной электропроводностью, величина проницаемости существенно изменяется с изменением частоты. Исследования показали, что частотная погрешность заметнее сказывается при малых индукциях. В области же, близкой к насыщению материала, частотная погрешность не превышает погрешности воспроизведения результатов измерения на данной установке.

При питании схемы от источника с устойчивой частотой (например, от эталона частоты) рассматриваемая погрешность становится пренебрежимо малой. В то же время отклонение частоты 50 гц от номинальной на 1%

сопровождается изменением величины средней проницаемости приблизительно на 0,6%.¹

Погрешность, вызванная изменением температурных условий

Величину средней проницаемости, соответствующую нормальной температуре (в тех случаях, когда можно считать температурный коэффициент постоянным), можно подсчитать по формуле:

$$\mu_{\Delta_m} = \mu_{\Delta_t} [1 + \beta(t - 20)]^{-1},$$

где μ_{Δ_m} — средняя проницаемость, отнесенная к температуре 20° С;

μ_{Δ_t} — средняя проницаемость, измеренная при температуре t .

Применение этой формулы целесообразно лишь при постоянстве температурного коэффициента в заданном диапазоне температур. Практически же величина температурного коэффициента зависит не только от диапазона температур, в котором он определяется, но и от величины магнитной индукции и от термической предистории образца. Поэтому целесообразнее не вводить поправок за счет изменения температуры, а стремиться к термостатированию образца. Приближенный подсчет погрешности, обусловленный изменением температуры образца трансформаторной стали на $\pm 5^\circ$ С, показал, что дополнительная погрешность может составить 0,2—0,3%.

В зависимости от вида испытуемого материала некоторые из рассмотренных выше погрешностей могут принимать различные значения. Так, например, при испытании пермаллоя, вследствие малого влияния временного спада проницаемости на точность измерений, уменьшается погрешность ряда измерений, но увеличиваются погрешности от влияния внешних полей и вследствие отклонения частоты от номинального значения. При испытании же трансформаторной стали становятся пренебрежимо малыми погрешности, обусловленные отклонением частоты от номинальной и влиянием внешних полей, но возрастает погрешность, вызываемая временным спадом проницаемости.

Исследование погрешностей определения средней проницаемости на повышенной частоте показало, что характер зависимости рассмотренных погрешностей от различных причин аналогичен характеру изменений погрешностей на низкой частоте.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ АМПЛИТУДНОГО ЗНАЧЕНИЯ ВТОРОЙ ГАРМОНИКИ ИНДУКЦИИ ОТ НАПРЯЖЕННОСТИ ПОСТОЯННОГО ПОЛЯ

Для расчета удвоителей частоты и зондов, основанных на удвоении частоты, требуется знание зависимостей амплитудного значения второй гармоники индукции $B_{2\max}$ от напряженности постоянного поля H_0 . Подобные кривые целесообразно определять при синусоидальном характере изменения напряженности магнитного поля. Получать зависимости $B_{2\max} = f(H_0)$, пользуясь мостовым методом, нельзя, так как в этом случае при изменении напряженности постоянного поля изменяется проницаемость и, следовательно, индуктивное сопротивление плеча моста, что ведет к изменению намагничивающего тока, т. е. к изменению амплитуды напряженности синусоидального поля, которая по условию должна быть в процессе эксперимента неизменной.

Использование компенсаторов в рассматриваемом случае усложняется тем, что намагничивающая обмотка испытуемого образца и рабочая цепь компенсатора должны питаться токами разной частоты. Питатель цепи от разных источников нельзя, так как при этом весьма сложно получить высокостабильные частоты, кратные друг другу.

¹ При испытании молибденового пермаллоя, имеющего толщину пластины 0,35 мм.

В то же время необходимо использовать такие измерители, которые были бы пригодны для измерений на нескольких частотах.

Все сказанное выше заставило выбрать в качестве измерительного устройства диодный вольтметр в сочетании с резонансным фильтром и усилителем. Фильтр настраивался на частоту второй гармоники измеряемой индуктированной э. д. с., и ее среднее значение измерялось диодным вольтметром.

Подсчет амплитудного значения второй гармоники производился по формуле:

$$B_{2 \max} = \frac{E_{2fcp} \cdot 10^6}{8f \cdot s \cdot w_2},$$

где f — основная частота в герцах;

E_{2fcp} — среднее значение второй гармоники индуктированного напряжения в вольтах.

В качестве резонансного фильтра использовались фильтры типа СФ-1, (на частотах 100 и 200 гц) и СФ-2 (на частотах 400, 800, 1000 и 5000 гц) изготовленные заводом «Эталон»¹.

Работы с прибором требовали настройки частоты генератора в резонанс с частотой фильтра и тщательного контроля момента резонанса по максимуму отклонения указателя вольтметра.

Погрешность определения второй гармоники напряжения зависит, во-первых, от неточности настройки в резонанс частоты генератора с собственной частотой фильтра и нестабильности источников питания², во-вторых, от наличия на выходе фильтра, помимо измеряемой второй гармоники, еще других гармоник, частично пропущенных фильтром. Последнее существенно сказывается в том случае, если на выходе фильтра имеются значительные третья и пятая гармоники, так как при измерении среднего значения второй гармоники напряжения вольтметром с выпрямителем именно высшие нечетные гармоники могут дать погрешность в определении среднего значения, первая же гармоника не искажает полученных результатов.

Относительная погрешность определения второй гармоники индукции подсчитывалась по формуле

$$R_{B_2} = \sqrt{\left| \frac{\partial E_{2fcp}}{E_{2fcp}} \right|^2 + \left(\frac{\partial f}{f} \right)^2 + \left(\frac{\partial s}{s} \right)^2}$$

и достигала 8—9%.

Для подтверждения результатов, полученных описанным выше способом, в табл. 4 произведено сравнение их с результатами графо-аналитического расчета, полученными путем разложения кривой переменной составляющей индукции.

Таблица 4

Напряженность постоянного поля, э	0,4	0,8	1,6	1,6	
Амплитудное значение напряженности переменного поля, э	1,5	1,2	1,2	2,4	
Амплитудное значение второй гармоники индукции, гс	измеренное по вольтметру	1100	310	100	1220
	полученное расчетным путем	1300	360	96	1450

¹ Указанные фильтры отличаются малой зоной прозрачности, не превышающей 2% от частоты, на которую настроен фильтр.

² Опыт показал, что изменение на 1,5% напряжения питания накала ламп фильтра СФ-2 вызывало изменение показаний вольтметра до 5%.

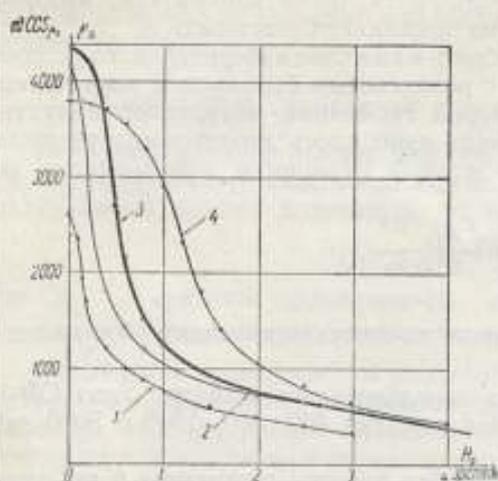


Рис. 8. Семейство кривых зависимости средней проницаемости от напряженности постоянного поля:

1 - $H_{\max} = 0,5$ э; 2 - $H_{\max} = 0,66$ э; 3 - $H_{\max} = 1,1$ э; 4 - $H_{\max} = 1,9$ э.

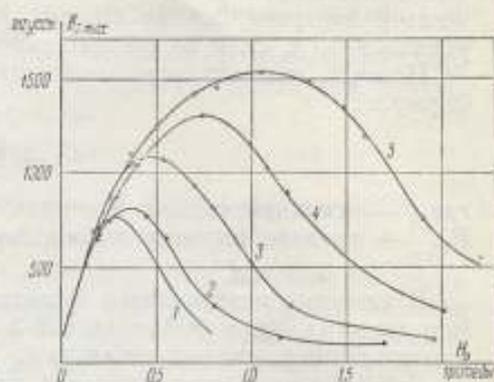


Рис. 9. Семейство кривых зависимости амплитудного значения второй гармоники индукции от напряженности постоянного поля:

1 - $H_{\max} = 0,9$ э; 2 - $H_{\max} = 1,2$ э; 3 - $H_{\max} = 1,5$ э; 4 - $H_{\max} = 1,9$ э; 5 - $H_{\max} = 2,4$ э.

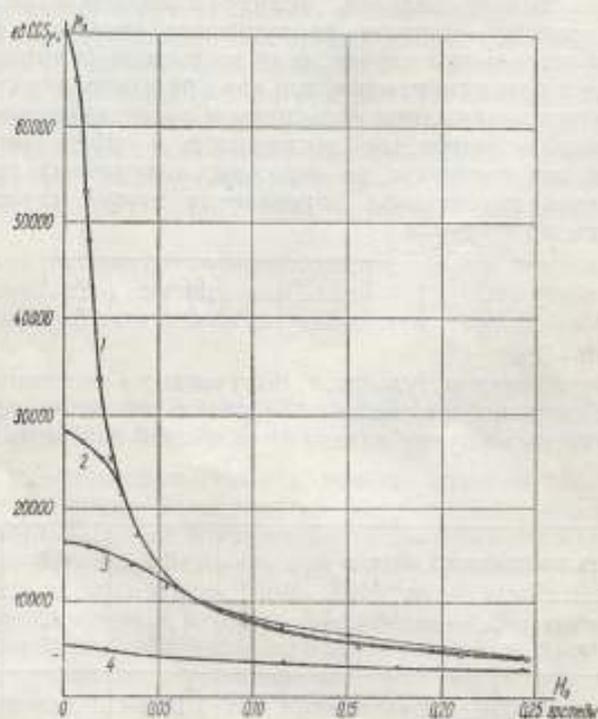


Рис. 10. Семейство оптимальных кривых на частотах 50, 400, 1000 и 5000 гц для образца Мо-пермаллоя при синусоидальном характере напряженности переменного поля:

1 - $H_{\max} = 0,07$ э при $f = 50$ гц; 2 - $H_{\max} = 0,10$ э при $f = 400$ гц; 3 - $H_{\max} = 0,13$ э при $f = 1000$ гц; 4 - $H_{\max} = 0,15$ э при $f = 5000$ гц.

Погрешность определения амплитуды второй гармоники индукции можно снизить до 5—6%, если использовать измеритель напряжений типа АН-1-50, выпускаемый отечественной промышленностью [4].

На рис. 8 приведены полученные для стали Э4 зависимости средней проницаемости от напряженности постоянного поля при синусоидальном характере изменения напряженности переменного поля и частоте 50 гц.

На рис. 9 изображены кривые зависимости амплитудного значения второй гармоники индукции от напряженности постоянного поля для того же образца стали и той же частоты.

Анализ этих зависимостей показал, что в отдельных случаях для характеристики материала достаточно снять только «оптимальную» кривую, т. е. кривую, соответствующую такой напряженности синусоидального поля (или такой синусоидальной индукции), при которой в отсутствие постоянного поля проницаемость достигает максимума. Иногда эта кривая достаточно для расчета простейших устройств, имеющих сердечник, подмагничиваемый постоянным полем.

Особенно удобно использование оптимальных кривых при изучении свойств материала в условиях наложения постоянного поля на переменное поле различных частот. В последнем случае определяется семейство оптимальных кривых, подобное изображенному на рис. 10, которое и является достаточно полной частотной характеристикой магнитного материала при комбинированном намагничивании.

ВЫВОДЫ

1. Методом, обеспечивающим требования практики при определении средней магнитной проницаемости, является определение сумм амплитуд индукции и напряженности поля по средним значениям э. д. с., индуктированных в измерительной обмотке на образце и во вторичной обмотке катушки взаимной индуктивности.

2. В качестве прибора, измеряющего средние значения индуктированных э. д. с., целесообразно использовать диодный вольтметр с регулированием напряжения смещения, который позволяет измерять средние значения сильно искаженных э. д. с., а также постоянные э. д. с. с погрешностью не более 1%.

3. При испытании на низкой частоте (до 50 гц) материала, обладающего малой электропроводностью, можно в условиях синусоидальной напряженности поля метод измерения средних значений э. д. с. заменить баллистическим методом.

4. В тех случаях, когда требуется знание зависимости проницаемости, определенной по первым гармоникам индукции и напряженности поля, от напряженности постоянного поля, целесообразно пользоваться компенсационным методом, который может быть применен как при измерениях в условиях синусоидальной индукции, так и синусоидальной напряженности поля.

5. Погрешность определения средней проницаемости методом измерения средних значений э. д. с., подсчитанная по формуле закона сложения средних погрешностей, может не превышать $\pm 2,5\%$ при использовании надлежащей измерительной аппаратуры.

6. Исследование ряда дополнительных погрешностей, вызванных различными причинами, показало, что погрешности, обусловленные недостаточным индуктивным сопротивлением цепи постоянного тока, несинусоидальным характером изменения напряженности поля или индукции, неполным предварительным размагничиванием образца и др., могут быть практически устранены.

7. Для определения зависимости амплитудного значения второй гармоники индукции от напряженности постоянного поля может быть использован

метод измерения средних значений второй гармоники индуктированных э. д. с., причем в качестве измерительного прибора целесообразно применить диодный вольтметр в сочетании с резонансным фильтром и усилителем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Розенблат М. А., ЖТФ т. XVIII, вып. 6, 1948.
2. Янус Р. И., ЖТФ т. III, вып. 8, 1933.
3. Шрамков Е. Г., Труды ВНИИМ, вып. 1 (61), 1947, стр. 55.
4. Альтерман Я. Л., Бальсон М. Р. и Вальковская Н. А., «Вестник связи», 1953, № 7, стр. 10.
5. Нестеренко А. Д., Труды института электротехники АН УССР, вып. 8, 1952, стр. 25.

А. И. БУЛАНОВА, А. З. ВЕКСЛЕР и Н. М. РУДНЫЙ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАТТМЕТРОВОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕРЬ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ НАМАГНИЧИВАНИИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ ПОСТОЯННЫМ И ПЕРЕМЕННЫМ ПОЛЯМИ

Многочисленные исследования, связанные с оценкой листовых магнитных материалов, подвергающихся одновременному намагничиванию постоянным и переменным полями, в большей или меньшей степени страдают одним, с нашей точки зрения, существенным недостатком — обычно в них отсутствует оценка систематических и случайных погрешностей измерений и, следовательно, выбор методики измерений не всегда является достаточно обоснованным.

Настоящая работа посвящена исследованию с этой точки зрения ваттметрового метода измерения потерь в листовых магнитных материалах при одновременном намагничивании постоянным и переменным полями (в дальнейшем применяется термин «двойное намагничивание»).

Важнейшим преимуществом ваттметрового метода перед другими (компенсационным, мостовым, резонансным и т. п.) является правильный учет той части потерь в стали, которая вызвана наличием высших гармоник в кривой индукции и намагничивающего тока. Использование многопредельного ваттметра позволяет измерять потери как на малых, так и на больших образцах в широком диапазоне значений магнитной индукции. Применение ваттметрового метода для определения потерь в стали при одновременном намагничивании постоянным и переменным полями было изучено в ряде работ [1, 2, 3], однако некоторые вопросы методики измерения до сих пор оставались неисследованными. Так, до настоящего времени не разработана методика измерения потерь и разделения их на составляющие при повышенных частотах и двойном намагничивании. Погрешности ваттметрового метода измерения потерь при двойном намагничивании также ранее не изучались. Все эти вопросы нашли отражение в настоящей работе.

СХЕМЫ УСТАНОВОК

При измерениях на промышленной частоте наилучшие результаты дает схема с последовательным включением источника постоянного тока, представленная на рис. 1. Питание переменным током осуществляется с помощью разделительного трансформатора T , благодаря чему постоянный ток не подмагничивает якорь генератора. Однако схема обладает одним недостатком — переменный ток проходит через батарею аккумуляторов. Его можно значительно уменьшить, если зашунтировать батарею B , реостат R и амперметр A_2 конденсатором, имеющим достаточно большую емкость. Как показали измерения, искажения формы волны индукции при этих условиях сравнительно невелики.

Возможен другой вариант схемы, в котором источник постоянного тока включается параллельно намагничивающей обмотке образца, причем для уменьшения переменного тока, протекающего через аккумуляторы, используется катушка с железным сердечником L (рис. 2). Для уменьшения постоянного тока, протекающего через вторичную обмотку разделительного трансформатора

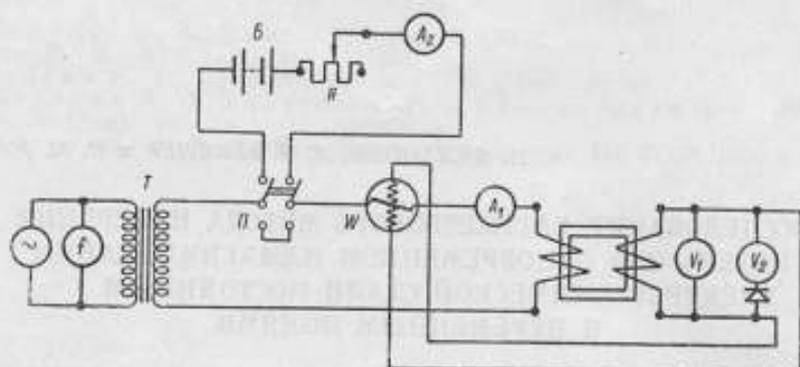


Рис. 1. Схема ваттметровой установки для измерения потерь при двойном намагничивании с последовательным включением источника постоянного тока.

матора T , включается конденсатор C , шунтированный сопротивлением R_1 . Использование конденсатора без сопротивления часто приводит к феррорезонансу: при плавном возрастании напряжения на зажимах первичной обмотки разделительного трансформатора амплитуда магнитной индукции

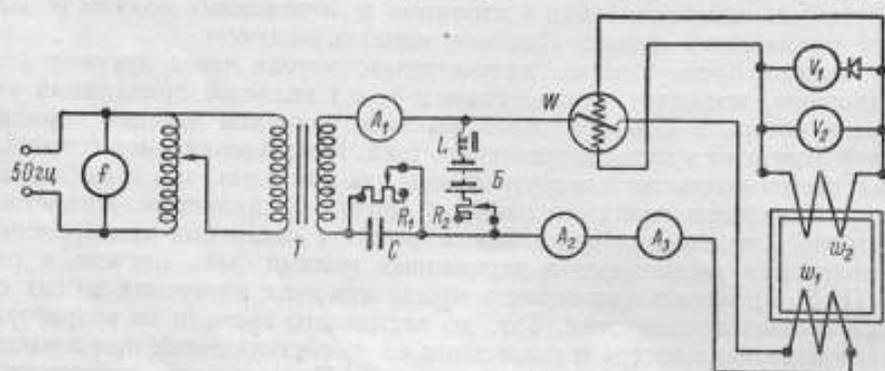


Рис. 2. Схема ваттметровой установки для измерения потерь при двойном намагничивании с параллельным включением источника постоянного тока.

в образцах изменяется скачкообразно. При этом форма волны магнитного потока, как правило, сильно искажается.

Были исследованы также схемы, в которых постоянный и переменный токи протекают по разным обмоткам. Одна из таких схем [4] представлена на рис. 3. Она обладает преимуществом перед ранее рассмотренными, заключающемся в отсутствии каких-либо добавочных сопротивлений в цепи генератора переменного тока, благодаря чему форма кривой магнитного потока искажается весьма незначительно. Однако применение специальной обмотки для постоянного тока приводит к появлению дополнительной погрешности, вызванной расходом мощности переменного тока в цепи аккумуляторов, которая может быть учтена. Однако точность определения этой поправки очень низкая, так как часть переменного тока, несмотря на наличие катушки индуктивности L , протекает через батарею B . Кроме того, сопротивление

реостата R и обмотки w_2 может сильно изменяться с изменением температуры. Последнее обстоятельство весьма трудно учесть, так как повышение температуры происходит непосредственно во время измерений.

При измерении потерь на повышенных частотах использование какой-либо из рассмотренных выше схем нецелесообразно. Так, применение схем,

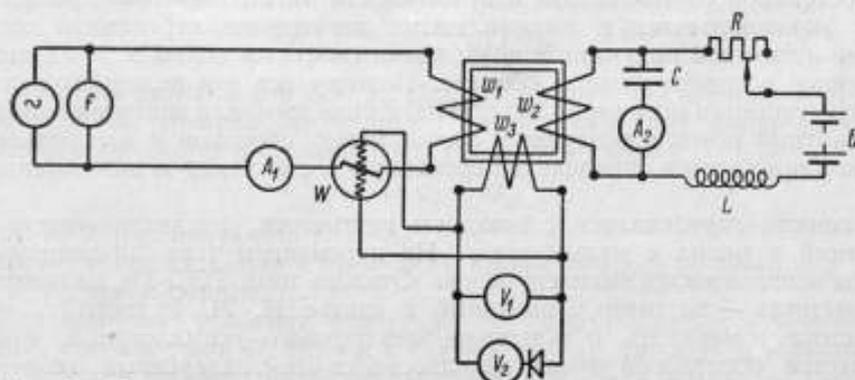


Рис. 3. Схема ваттметровой установки для измерения потерь при двойном намагничивании с отдельными цепями питания.

изображенных на рис. 1 и 2, на повышенных частотах связано с большим расходом мощности в разделительном трансформаторе, поэтому генератор переменного тока должен иметь большую мощность. Использование же схемы, приведенной на рис. 3, связано с большими погрешностями измерения.

Схема, изображенная на рис. 4, не имеет этих недостатков, так как расход мощности в конденсаторе C_1 ничтожно мал.

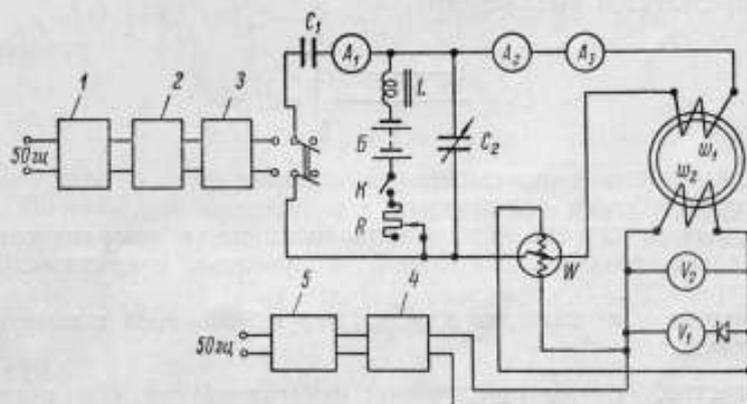


Рис. 4. Схема ваттметровой установки для измерения потерь при двойном намагничивании в области повышенных частот:

1 — стабилизатор напряжения; 2 — звуковой генератор; 3 — усилитель типа У-50 или У-300-М; 4 — электронный осциллограф; 5 — образцовый вольскварцевый генератор.

Изменяя емкость разделительного конденсатора C_2 , удается в ряде случаев улучшить форму волны магнитной индукции. В этих условиях обычно получается резонанс напряжений и нагрузка генератора становится активной. Таким образом, использование разделительного конденсатора приводит к уничтожению нежелательного подмагничивания постоянным током выходного трансформатора усилителя и улучшению коэффициента мощности нагрузки. Поэтому все измерения при повышенных частотах (до 2 кГц) производились на установке, собранной по схеме, приведенной на рис. 4.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ ВАТТМЕТРОВОЙ УСТАНОВКИ

Исследование закономерностей изменения потерь в зависимости от различных параметров показало, что в условиях двойного намагничивания мощность, расходуемая на гистерезис и вихревые токи, определяется частотой, постоянной составляющей напряженности магнитного поля, разностью между максимальными и минимальными значениями переменной составляющей магнитной индукции и коэффициентом формы волны э. д. с., индуктированной в измерительной обмотке. Поэтому все эти величины должны быть измерены при испытании материала. Кроме того, для введения поправки на магнитный поток в воздушном зазоре между образцом и измерительной обмоткой приходится определять переменную составляющую напряженности поля.

Мощность определялась с помощью ваттметров, предназначенных для измерений в цепях с малым $\cos \varphi$. На переменном токе промышленной частоты использовался ваттметр завода «Эталон» типа ВЭД-3¹, на повышенных частотах — ваттметр, описанный в статье Н. М. Рудного².

Частота измерялась с помощью электронного осциллографа, причем в качестве образцовой меры использовался пьезокварцевый генератор.

Действующее значение э. д. с., индуктированной в измерительной обмотке, определялось электродинамическим вольтметром, если измерения производились на промышленной частоте, или электростатическим вольтметром — при измерениях в области частот 200—2000 гц.

Для измерения разности между максимальным и минимальным значениями магнитной индукции можно использовать магнитоэлектрический вольтметр с выпрямителем. Показание вольтметра пропорционально разности указанных значений независимо от формы волны магнитной индукции.

Действительно, показание U'_2 вольтметра с однополупериодным выпрямителем определяется выражением:

$$U'_2 = \frac{1 - \frac{r_2}{RV + r_2}}{T} \int_0^{T_1} e_2 dt, \quad (1)$$

где r_2 — сопротивление измерительной обмотки;

RV — сопротивление вольтметра;

T_1 — время, в течение которого проходит ток в выпрямителе (время прохождения положительной «полуволны» напряжения);

T — период;

e_2 — мгновенное значение э. д. с., индуктированной в измерительной обмотке.

Как известно, $T_1 \neq \frac{T}{2}$ при двойном намагничивании, если в цепи переменного тока имеется активное сопротивление [1].

Ввиду отсутствия постоянной составляющей в э. д. с., индуктированной в измерительной обмотке, площади двух полуволн должны быть одинаковыми:

$$\int_0^{T_1} e_2 dt = \int_{T_1}^T e_2 dt. \quad (2)$$

Благодаря этому для измерения среднего за период значения напряжения можно использовать вольтметр с однополупериодным выпрямителем.

¹ См. статью настоящего сборника, стр. 139.

² См. статью настоящего сборника, стр. 150.

Так как

$$e_2 = -\omega_2 \frac{d\Phi}{dt},$$

где ω_2 — число витков измерительной обмотки,
то

$$U_2' = -\omega_2 f \left(1 - \frac{r_2}{R_V + r_2}\right) [\Phi|_{t=T_1} - \Phi|_{t=0}]. \quad (3)$$

Поскольку при $t=0$ и $t=T_1$, $U_2 = 0$, то значения магнитных потоков в эти моменты времени будут по абсолютной величине наибольшими.

Магнитный поток Φ можно разбить на две части:

$$\Phi = \Phi_c + \Phi_a,$$

где Φ_c — поток индукции в стали;

Φ_a — поток индукции в воздушном зазоре между измерительной обмоткой и образцом.

При обычных условиях измерения $\Phi_c \gg \Phi_a$, поэтому в момент времени T_1 поток в стали Φ_c близок к максимальному. Обозначим моменты времени, соответствующие наибольшему потоку в стали и воздухе, через T_c и T_a . Очевидно, T_c мало отличается от T_1 , что можно записать следующим образом:

$$\omega(T_1 - T_c) \ll 1. \quad (4)$$

Преобразуем выражения для $\Phi|_{t=T_1}$,

$$\begin{aligned} \Phi|_{t=T_1} &= \Phi_c(\omega T_c) + \Phi_c(\omega T_1) - \Phi_c(\omega T_c) + \Phi_a(\omega T_a) + \\ &+ \Phi_a(\omega T_1) - \Phi_a(\omega T_a) = \Phi_c(\omega T_c) + \Phi_a(\omega T_a) + \Delta, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\Delta = -[\Phi_c(\omega T_c) - \Phi_c(\omega T_1)] - [\Phi_a(\omega T_a) - \Phi_a(\omega T_1)].$$

Обозначим

$$\omega(T_c - T_1) = \alpha_c$$

и

$$\omega(T_a - T_1) = \alpha_a.$$

Обычно угол α_a , обусловленный главным образом потерями в стали, невелик. Поэтому при определении Δ можно использовать разложение функций Φ_c и Φ_a в ряды по степеням α_c и α_a . Ограничиваясь тремя членами рядов, находим:

$$\Delta = -\frac{1}{2} \left\{ \left[\frac{\partial^2 \Phi_c}{\partial (\omega t)^2} \right]_{T_c} \alpha_c^2 + \left[\frac{\partial^2 \Phi_a}{\partial (\omega t)^2} \right]_{T_a} \alpha_a^2 \right\}.$$

Так как

$$\left| \frac{\partial^2 \Phi_c}{\partial (\omega t)^2} \right| \sim \Phi_{c \max} \quad \text{и} \quad \left| \frac{\partial^2 \Phi_a}{\partial (\omega t)^2} \right| \sim \Phi_{a \max},$$

в чем нетрудно убедиться путем дифференцирования синусоидальной функции, то поправка Δ по порядку величины равна

$$\Delta \sim \Phi_{c \max} \alpha_c^2 + \Phi_{a \max} \alpha_a^2.$$

Пусть

$$\frac{\Phi_{a \max}}{\Phi_{c \max}} = 0,01; \quad \alpha_a = 0,2; \quad \alpha_c = 0,01.$$

Тогда

$$\Delta \sim 0,0005 \Phi_{c \max}$$

Пренебрегая столь малой поправкой, находим:

$$U_2' = 2\omega_2 f \left(1 - \frac{r_2}{R_V + r_2}\right) [B_{\Delta S} + \Phi_{a \max}], \quad (6)$$

где $B_{\Delta} = \frac{B_{c \max} - B_{c \min}}{2}$;

$\Phi_{\sigma \max}$ — амплитуда магнитного потока в воздушном зазоре.

Среднее за период значение напряжения вдвое больше U_2' .
Тогда

$$U_{2cp} = 2U_2' = 4f\omega_2 \left(1 - \frac{r_2}{K_V + r_2}\right) [B_{\Delta} s + \Phi_{\sigma \max}].$$

Таким образом, зная поправку на поток в воздухе и измерив среднее значение напряжения, можно найти B_{Δ} .

Определение этой поправки может быть произведено известными способами [5], для чего необходимо измерить переменную составляющую намагничивающего тока. Следует отметить, что при подмагничивании постоянным

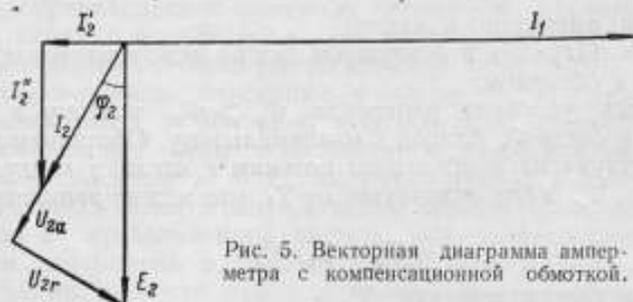


Рис. 5. Векторная диаграмма амперметра с компенсационной обмоткой.

током магнитная проницаемость в большинстве случаев резко уменьшается, поэтому поправка на поток в воздухе может заметно возрасти по сравнению со случаем, когда намагничивают образец переменным током.

Точное измерение переменной составляющей намагничивающего тока необходимо не только для определения поправки на магнитный поток в воздухе, но и для получения кривых намагничивания, а также зависимости магнитной проницаемости от постоянной и переменной составляющих напряженности поля.

Переменная составляющая тока может быть измерена несколькими способами.

Первый способ состоит в том, что последовательно с магнитоэлектрическим амперметром, используемым для измерения постоянной составляющей намагничивающего тока, включается электромагнитный или электродинамический амперметр. В этом случае действующее значение переменной составляющей намагничивающего тока I будет определяться выражением:

$$I = \sqrt{I_{\sigma 0}^2 - I_0^2}, \quad (7)$$

где $I_{\sigma 0}$, I_0 — показания приборов, электродинамического и магнитоэлектрического.

Возможен и способ непосредственного измерения переменной составляющей тока без каких-либо пересчетов. Если по одной из неподвижных катушек электродинамического амперметра пропустить постоянный ток, равный по величине и направленный противоположно постоянной составляющей намагничивающего тока, протекающего по другой неподвижной катушке, то угол поворота подвижной части определится действующим значением переменной составляющей тока.

Следует отметить, что такой прибор имеет дополнительную погрешность, вызванную взаимодействием измеряемого тока с переменным током, индуктированным в компенсационной катушке.

Оценим величину этой погрешности с помощью векторной диаграммы (рис. 5).

Э. д. с., индуцированная в компенсационной обмотке E_2 , сдвинута по фазе относительно измеряемого тока I_1 на 90° . Эта э. д. с. вызовет в компенсационной цепи (катушка амперметра, аккумулятор, реостат) ток I_2 , который отстает на угол φ_2 от E_2 . Ток I_2 можно разложить на две составляющие, одна из которых I_2' совпадает по направлению с E_2 , а другая I_2'' — перпендикулярна E_2 .

Дополнительный момент сил, действующих на подвижную рамку, определяется формулой:

$$M_1 = k \cdot I_1 I_2' \sin \gamma, \quad (8)$$

где k — коэффициент пропорциональности;

I_1, I_2' — действующие значения эквивалентных синусоид для токов, протекающих по подвижной и компенсационной катушкам;

γ — угол между плоскостями катушек.

Момент сил, вызванный взаимодействием токов в подвижной и неподвижной измерительной катушках амперметра, может быть записан следующим образом:

$$M_2 = k I_1^2 \sin \gamma. \quad (9)$$

Отсюда относительная погрешность, вносимая индуцированным током, равна

$$\delta = \frac{M_1}{M_2} = \frac{I_2'}{I_1}. \quad (10)$$

Найдем зависимость I_2' от I_1 . Э. д. с. E_2 связана с током I_1 соотношением

$$E_2 = \omega M I_1, \quad (11)$$

где M — коэффициент взаимной индуктивности.

Сила тока, индуцированного в компенсационной обмотке, равна

$$I_2 = \frac{\omega M I_1}{\sqrt{r_2^2 + (\omega L_2)^2}}, \quad (12)$$

где r_2 и L_2 — сопротивление и индуктивность подвижной катушки.

Из векторной диаграммы находим:

$$I_2' = I_2 \sin \varphi_2 = \frac{\omega^2 M L_2}{r_2^2 + (\omega L_2)^2} I_1. \quad (13)$$

Тогда

$$\delta \approx \frac{\omega^2 M L_2}{r_2^2 + (\omega L_2)^2}. \quad (14)$$

Для частоты $\omega = 314$ эц, $r_2 = 5$ ом, $L_2 = 1$ мег, $M = 0,1$ мег находим, что $\delta = 0,04\%$.

Этот результат хорошо подтверждается экспериментальными данными, которые показали, что величина δ меньше $0,1\%$. В том же случае, когда погрешность δ будет заметной, ее можно уменьшить, включив в цепь компенсационной обмотки, по которой протекает постоянный ток, добавочное сопротивление.

Для измерения разности максимального и минимального значений намагничивающего тока можно использовать катушку взаимной индуктивности и вольтметр с выпрямителем, включенный во вторичную обмотку этой катушки.

ЗАВИСИМОСТЬ ПОТЕРЬ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ

На ваттметровой установке была изучена зависимость потерь от постоянной составляющей напряженности поля, переменной составляющей магнитной индукции, частоты и коэффициента формы э. д. с., индуцированной в измерительной обмотке.

Результаты измерения зависимости потерь от постоянной составляющей напряженности магнитного поля при частоте 50 гц представлены на рис. 6 и 7. Аналогичные кривые были получены и при измерениях на повышенных частотах.

Полученные результаты показывают, что наиболее сильная зависимость потерь от постоянной составляющей напряженности поля наблюдается при

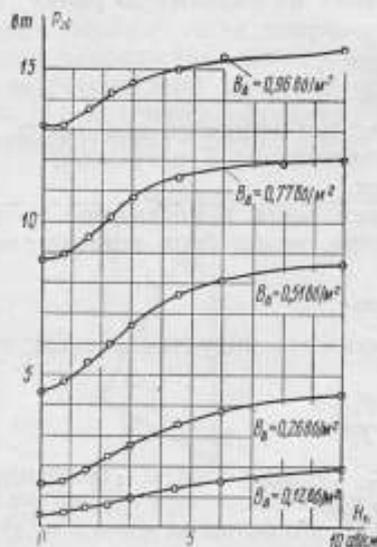


Рис. 6. Зависимость полных потерь в стали от постоянной составляющей напряженности магнитного поля.

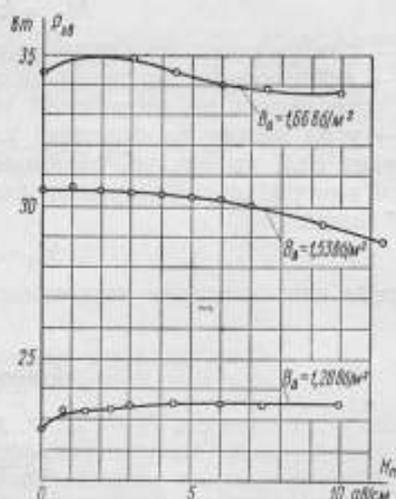


Рис. 7. Зависимость полных потерь в стали от постоянной составляющей напряженности магнитного поля.

малых значениях переменной составляющей индукции B_{Δ} . При некотором значении индукции B_{Δ} потери почти не зависят от H_n . Это значение называют критической индукцией [1]. При индукции большей чем критическая потери убывают с ростом H_n .

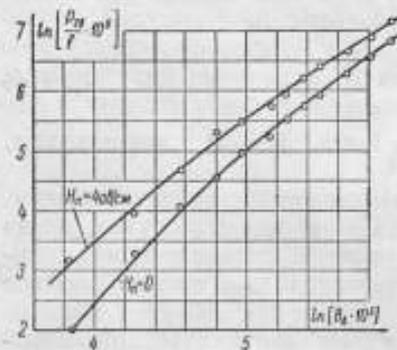


Рис. 8. Зависимость полных потерь в стали от амплитуды переменной составляющей индукции.

Исследование зависимости потерь от переменной составляющей индукции позволяет уточнить эти выводы. На рис. 8 представлены кривые, характеризующие зависимость логарифма потерь от логарифма переменной составляющей индукции B_{Δ} при частоте 2000 гц. Как видно из графика, эта зависимость достаточно точно описывается прямой, начиная с индукции $B_{\Delta} = 0,2$ вб/м². Это значит, что при $B_{\Delta} > 0,2$ вб/м² полные потери могут быть найдены из формулы:

$$P = k B_{\Delta}^2. \quad (15)$$

Кривая, соответствующая $H_n = 4$ а/см, имеет меньший наклон, чем кривая с $H_n = 0$.

При некотором значении индукции B_{Δ} кривые должны пересекаться. Это значение B_{Δ} , очевидно, соответствует критической индукции, при которой потери от H_n не зависят. На основании этого можно считать, что потери в электротехнической стали при подмагничивании зависят от B_{Δ} слабее, чем без подмагничивания.

Кривые, характеризующие изменение потерь с частотой и коэффициентом формы, представлены на рис. 9 и 10. Зависимости полных потерь за период от частоты изображаются в виде слабо изогнутых кривых. Измерения показали, что изгиб этих кривых примерно такой же, как и при намагничивании только переменным током.

Используя эти данные, можно известным способом разделить полные потери на две составляющие: потери на гистерезис и на вихревые токи. Потери на гистерезис определялись по отрезку оси ординат, отсекаемому кривой, определяющей зависимость полных потерь за период от частоты. Остальная часть потерь связывалась с расходом мощности на вихревые токи.

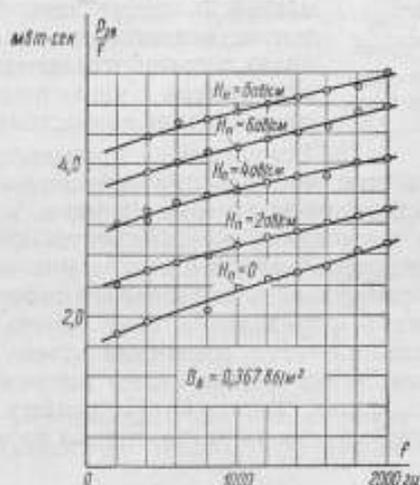


Рис. 9. Зависимость полных потерь в стали за период от частоты для образца ВЧ-2.

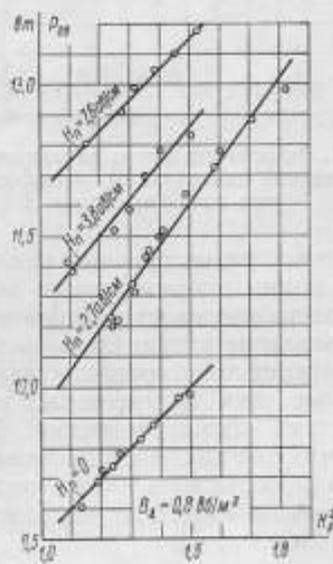


Рис. 10. Зависимость полных потерь в стали от квадрата коэффициента формы э. д. с., индуктированной в измерительной обмотке, для образца Б9.

К сожалению, из-за сравнительно невысокой точности разделения потерь (порядка 5—15%) трудно сделать какие-либо выводы относительно зависимости потерь на вихревые токи при промышленной частоте от постоянной составляющей напряженности поля. Эта зависимость может иметь место в том случае, если часть потерь, которая отождествляется с расходом мощности на вихревые токи, в действительности соответствует сумме величин, в которую входят и дополнительные потери. Повидимому, возможны и другие причины, в силу которых может возникнуть зависимость потерь на вихревые токи от постоянной составляющей напряженности поля; например, изменение неравномерно распределенного по образцу магнитного потока с изменением подмагничивания, которое вызывает увеличение или уменьшение магнитной проницаемости [6].

Для определения зависимости потерь на вихревые токи были произведены измерения при частоте 2000 гц на образцах, составленных из листов толщиной 0,35 и 0,2 мм. В этих условиях расход мощности на вихревые токи составлял более половины полных потерь, поэтому относительная погрешность определения величины потерь на вихревые токи сравнительно невелика. На рис. 11 представлен график зависимости потерь на вихревые токи, отнесенных к квадрату частоты, от постоянной составляющей для одного из образцов. Как видно из этого графика, потери на вихревые токи

в пределах погрешности измерений не зависят от постоянной составляющей напряженности поля.

Отсюда можно сделать вывод, что дополнительные потери, входящие как отдельное слагаемое в ту часть, которая отождествляется с потерями на вихревые токи, не зависят от формы петли гистерезиса, ибо если бы подобная зависимость имела место, то эти потери изменялись бы с увеличением подмагничивания в силу деформации петли гистерезиса.

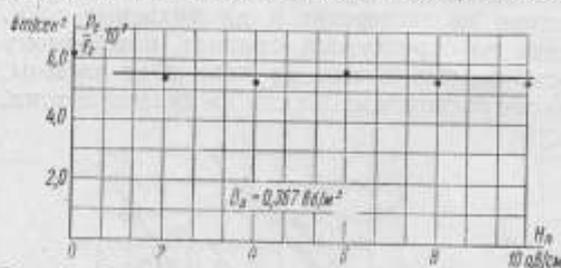


Рис. 11. Зависимость потерь на вихревые токи в стали от постоянной составляющей напряженности магнитного поля для образца ВЧ-2.

при самых разнообразных условиях, в том числе и при синусоидальной форме волны напряженности поля. Используя полученные данные, можно произвести разделение потерь методом нескольких коэффициентов формы. Сопоставление результатов разделения потерь методами нескольких частот и коэффициентов формы показало, что погрешность определения потерь на вихревые токи не превышает погрешности определения этих потерь при отсутствии подмагничивания. На основании этих измерений можно считать, что для введения поправки на искажение формы волны напряжения можно использовать метод нескольких частот, который применяется при определении потерь в условиях намагничивания образца только переменным полем.

ПОГРЕШНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТА ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕРЬ

Применение ваттметра для измерения потерь в стали при двойном намагничивании приводит к появлению некоторых погрешностей, которые отсутствуют при намагничивании только переменным полем.

Погрешности измерения потерь в стали в обычных условиях были рассмотрены в диссертации Н. М. Рудного «Исследование ваттметрового метода измерения потерь на гистерезис и вихревые токи при промышленных и повышенных частотах» и в статье Е. Г. Шрамкова [7].

Из этих погрешностей следует остановиться на роли переменной составляющей индукции. Исследование зависимости полных потерь от переменной составляющей индукции показало (рис. 8), что они возрастают с увеличением B_{Δ} при двойном намагничивании медленнее, чем при намагничивании только переменным полем. Поэтому погрешность измерения полных потерь, вызванная неточным определением переменной составляющей магнитной индукции $\Delta P = \frac{\partial P}{\partial B_{\Delta}} \cdot \Delta B_{\Delta}$ при двойном намагничивании, не превышает соответствующей величины при отсутствии постоянной составляющей напряженности поля.

При измерении потерь в условиях двойного намагничивания возникает дополнительная погрешность, вызванная неодинаковым подмагничиванием образца в середине и у краев катушек прибора Доливо-Добровольского-Эпштейна и ошибкой в измерении постоянной составляющей напряженности поля. Измерения показывают, что разница в напряженности постоянного магнитного поля в середине и у краев катушки не превышает 15%. С другой стороны, из кривых, приведенных на рис. 6 и 7, видно, что потери в стали

при изменении постоянной составляющей напряженности поля на 15% могут быть с достаточной степенью точности выражены следующей формулой:

$$P(H) = P(H_0) + k_1(H - H_0), \quad (16)$$

где k_1 — постоянный коэффициент;

$$\frac{H - H_0}{H_0} < 0,15.$$

Очевидно, аналогичная формула может быть написана для потерь в стали, отнесенных к единице объема

$$p(H) = p(H_0) + k_2(H - H_0), \quad (17)$$

где k_2 — постоянный коэффициент.

В этих формулах предполагается, что H — значение постоянной составляющей напряженности поля в данной точке образца, а H_0 определяется равенством

$$H_0 l_1 = \oint_L H(x) dx, \quad (18)$$

где dx — элемент длины магнитопровода;

l_1 — длина магнитопровода.

Будем считать для простоты, что напряженность поля по сечению образца постоянна. Тогда полные потери в стали, имеющей неодинаковую напряженность магнитного поля вдоль образца, можно выразить формулой:

$$P = \int p(H) dv = s \oint_L p(H) dx, \quad (19)$$

где s — площадь сечения образца.

Подставив вместо $p(H)$ выражение (16), находим:

$$P = slp(H_0) + k_2 s \oint_L (H - H_0) dx = slp(H_0). \quad (20)$$

Таким образом, потери в стали при неодинаковой напряженности поля по длине образца и сделанном выше допущении равны соответствующей величине при равномерном намагничивании.

Погрешность, вызванная неточным определением постоянной составляющей напряженности магнитного поля

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial H} \Delta H_n, \quad (21)$$

причем H_n определяется из равенства

$$H_n = \frac{I_n \cdot w}{l_1}, \quad (22)$$

где I_n — сила постоянного тока.

Величина $\frac{\partial P}{\partial H}$ будет положительной, если B_Δ меньше, чем критическая индукция $B_{кр}$, равна нулю при критической индукции и отрицательна при B_Δ большей, чем $B_{кр}$.

Эта погрешность составляет приблизительно 0,7%, если $B_\Delta = 0,5$ вб/м², $H_n = 0,8-1,5$ ав/см и $\frac{\Delta I_n}{I_n} = 0,5\%$. Во всех остальных случаях эта погрешность будет меньше 0,7%.

Если учесть, что погрешность измерения полных потерь при отсутствии подмагничивания составляет $\pm 3\%$, то погрешность определения потерь при двойном намагничивании можно принять равной $\pm 3,5\%$.

ВЫВОДЫ

1. Исследование различных вариантов ваттметрового метода показало, что наименьшая погрешность в измерении потерь имеет место при использовании общей обмотки для постоянного и переменного токов.

2. Для измерения переменной составляющей напряженности поля целесообразно использовать амперметр с компенсационной обмоткой, который позволяет определять эту составляющую с достаточной точностью.

3. Установлено, что неравномерность подмагничивания образца в известных пределах не вносит существенной дополнительной погрешности определения потерь.

4. Разделение потерь методами нескольких частот и коэффициентов формы приводит, в пределах погрешности определения составляющих потерь, к одинаковым результатам.

5. Наибольшая погрешность измерения потерь при двойном намагничивании ваттметровым методом в области частот 20—2000 гц не превышает $\pm 3,5\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бессонов Л. А., Электрические цепи со сталью, Госэнергоиздат, 1948.
2. Holm F., Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure т. 56, 1746 (1912).
3. Charlton O., Jackson J., Transactions of AIEE, т. 44, р. 824 (1925).
4. Розенблат М. А., «Электричество» № 4, 1952, стр. 58.
5. Шрамков Е. Г., Труды ВНИИМ, вып. 18 (34), 1938.
6. Brailsford F., Journ. of the Inst. of Electric Engineers, р. II, № 43 (1948).
7. Шрамков Е. Г., Труды ВНИИМ, вып. 1(56), 1947.

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ВАТТМЕТР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕРЬ В ЛИСТОВЫХ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Измерение потерь на гистерезис и вихревые токи в листовых магнитных материалах при переменном намагничивании током промышленной частоты обычно осуществляется ваттметровым методом. Основная особенность применения ваттметра для измерений такого рода — малый коэффициент мощности цепи.

Для измерения потерь в образцах листовых магнитных материалов с необходимой точностью, и в первую очередь для испытания нормальных образцов электротехнических сталей, потребовалось разработать ваттметр, который удовлетворял бы следующим основным требованиям:

1) имел несколько пределов измерения по току и напряжению, чтобы обеспечить измерение потерь в широком диапазоне индукций (от 0,5 до 1,7 вб/м^2) в образцах массой 10 и 1—2 кг;

2) имел номинальный коэффициент мощности, равный 0,1;

3) удовлетворял бы требованиям, предъявляемым к приборам класса 0,5 по основной и дополнительной погрешностям;

4) имел потребляемую мощность в параллельной цепи не более 1 *вт*.

УСТРОЙСТВО ВАТТМЕТРА

Наиболее полно удовлетворить перечисленные требования может только электродинамический ваттметр. Расчет конструкции и электрической схемы ваттметра, проведенный с целью сделать минимальными температурную погрешность, погрешности от индуктивности подвижной катушки и от взаимной индуктивности катушек и выполнить другие перечисленные выше требования, привел к разборке описываемого ниже прибора [1].

Ваттметр (рис. 1) имеет 3 предела по напряжению: 30—75—150 в, причем предел 30 в является рабочим, а не вспомогательным, как у других ваттметров. Подвижная катушка — круглая, бескаркасная, с обмоткой из алюминиевого провода в эмалевой изоляции; компенсационная катушка с обмоткой из медного многожильного провода; добавочные сопротивления намотаны унифицировано на гетинаксовых пластинах марганциновым проводом диаметром 0,05 в шелковой изоляции.



Рис. 1. Экранированный электродинамический малокосинусный ваттметр, изготовленный заводом «Эталон».

Сопротивления и индуктивности, составляющие параллельную цепь ваттметра (рис. 2), имеют следующие значения:

$$r_1 = 136,6 \text{ ом, в том числе } r_{1A1} = 106 \text{ ом;}$$

$$r_2 = 2108 \text{ ом, в том числе } r_{2C2} = 90 \text{ ом;}$$

$$r_3 = 4367 \text{ ом; } r_4 = 6750 \text{ ом; } r_5 = 11\,250 \text{ ом;}$$

$$L_1 = 4,17 \text{ мГн; } L_2 = 77,5 \text{ мГн;}$$

$$r_{AB} = 128,3 \text{ ом; } L_{AB} = 3,96 \text{ мГн.}$$

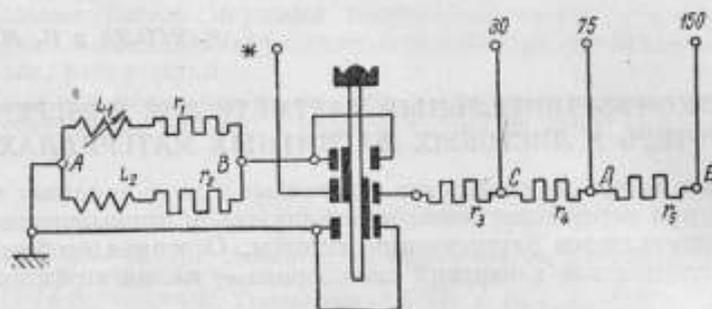


Рис. 2. Схема параллельной цепи ваттметра.

Точка А цепи соединена электрически со всеми частями прибора, окружающими подвижную часть.

Ваттметр имеет 2 предела по току: 2,5—5 а. Цепь тока состоит из двух круглых катушек, средний диаметр которых 50 мм. Обмотка выполнена из медного провода диаметром 1,35 мм в двойной хлопчатобумажной изоляции. Сопротивление последовательной цепи равно 0,153 ом при последовательном и 0,049 ом при параллельном включении секций.

Подвижная часть укреплена на растяжках из ленты фосфористой бронзы. В приборе применен теневой отсчет отклонений подвижной части, позволивший в два раза повысить чувствительность ваттметра и уменьшить максимальный угол поворота рамки с 90 до 45°, что важно для уменьшения погрешности от взаимной индуктивности катушек.

ЗАЩИТА ОТ ВНЕШНИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

От влияния внешних магнитных полей прибор защищен магнитным экраном, который состоит из 5 вставленных друг в друга цилиндров, изготовленных из листового пермаллоя толщиной 0,5 мм. Высота экрана — 120 мм, внешний диаметр — 108 мм. Пермалловый экран окружен цилиндром из мягкого железа толщиной 1,5 мм с внешним диаметром 123 мм.

Выбор экранирования в качестве способа защиты измерительного механизма прибора от влияния внешних магнитных полей объясняется тем, что при испытании магнитных материалов часто имеют место значительные поля рассеяния, весьма неравномерно распределенные в пространстве. Необходимость тщательного магнитного экранирования вызвана была высокой чувствительностью ваттметра.

При снятом экране и номинальном постоянном напряжении, приложенном к параллельной цепи ваттметра, отклонение подвижной части под действием земного магнитного поля составляло от 0 до ± 3 делений шкалы в зависимости от ориентации подвижной катушки относительно горизонтальной составляющей земного магнитного поля.

Изучение защитных свойств экрана осложняется влиянием его остаточного намагничивания. Чтобы избавиться от этого влияния, определения защит-

ных свойств экранов из пермаллоя и трансформаторной стали были выполнены сначала на переменном токе.

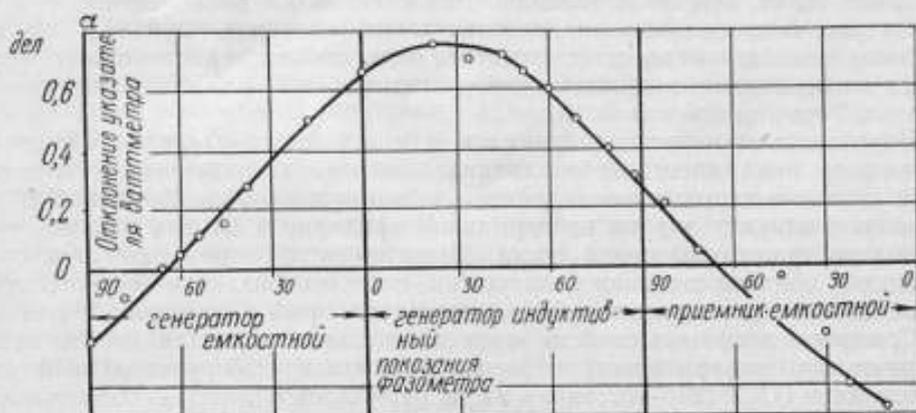


Рис. 3. Зависимость отклонений подвижной части ваттметра под влиянием внешнего переменного магнитного поля ($H = 20,6$ э) от сдвига фаз между внешним магнитным полем и током в рамке.

Результаты испытания представлены на рис. 3. Магнитный поток в пространстве, занятом измерительным механизмом, опережал ток в катушках и магнитный поток, созданный этим током вне экрана, на угол около 25° .

Все последующие измерения влияния внешнего переменного магнитного поля были выполнены при нулевом сдвиге фаз между током в подвижной катушке и

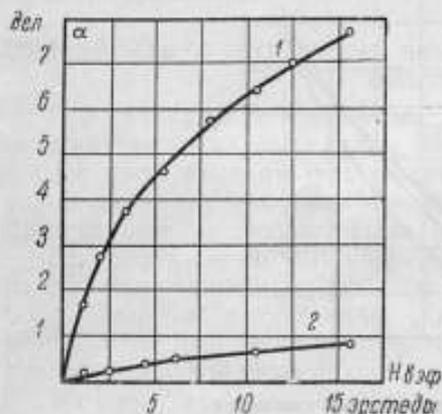


Рис. 4. Влияние внешнего переменного магнитного поля на показания ваттметра, защищенного экраном:

1 — трансформаторная сталь; 2 — пермаллой.

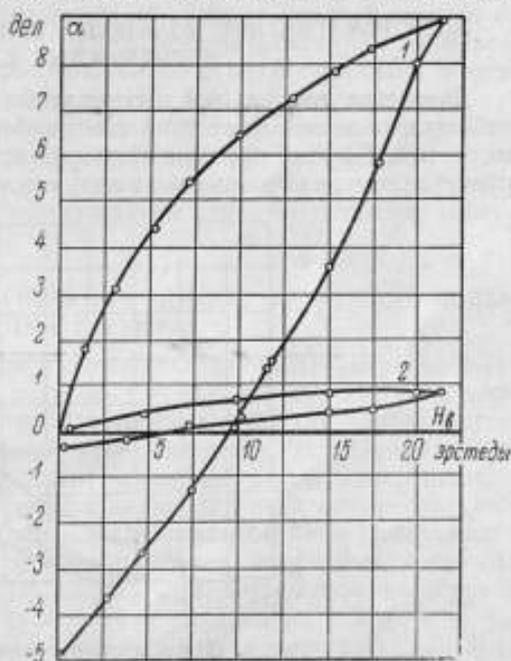


Рис. 5. Влияние внешнего постоянного магнитного поля на показания ваттметра, защищенного экраном:

1 — трансформаторная сталь; 2 — пермаллой.

магнитным потоком, проникшим извне в заэкранированное пространство, что соответствует максимальному отклонению подвижной части.

На рис. 4 приведены кривые, показывающие зависимость отклонения подвижной катушки ваттметра от действующего значения напряженности внешнего магнитного поля для случаев, когда измерительный механизм

защищен экраном из трансформаторной стали и из пермаллоя. Экран из пермаллоя создает в 10—15 раз лучшую защиту, чем экран из трансформаторной стали, при этом толщина стенок его в 1,6 раза меньше.

На рис. 5 изображена аналогичная зависимость для случая, когда на ваттметр воздействует внешнее магнитное поле, созданное постоянным током. Экран из пермаллоя защищает прибор примерно в 11 раз лучше, чем экран из трансформаторной стали.

Вследствие гистерезиса пермаллоя и стали после удаления внешнего магнитного поля имеет место влияние остаточного намагничивания экрана. Если значение напряженности внешнего магнитного поля достигало 20 э, указанное влияние экрана из пермаллоя примерно в 20 раз меньше, чем экрана из трансформаторной стали. Намагниченный экран создает в пространстве, занятом подвижной катушкой, поле, направление которого противоположно направлению действовавшего на прибор внешнего поля.

Сравнение защитных свойств экранов показывает, что для защиты ваттметра не пригоден экран из трансформаторной стали, если руководствоваться требованием ГОСТ 1845—52; экран же из пермаллоя полностью обеспечивает выполнение этого требования.

В нормальных условиях поверки и эксплуатации ваттметра на него могут воздействовать внешние поля, напряженность которых не превышает 0,5 э. Следовательно, погрешность от влияния внешних магнитных полей у описываемого ваттметра не будет обычно превышать $\pm 0,05\%$ от верхнего предела измерения.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОДВИЖНОЙ ЧАСТИ С ПОЛЕМ НЕПОДВИЖНЫХ КАТУШЕК

Даже при тщательном изготовлении подвижной части ваттметра трудно добиться полного отсутствия следов ферромагнитных веществ в отдельных ее частях. По этой причине ваттметр, если через его последовательную цепь протекает ток, а параллельная цепь отключена от источника питания, стал бы

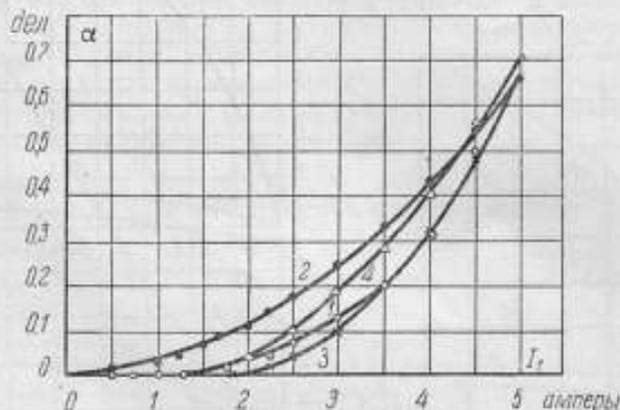


Рис. 6. Погрешности от электромагнитного взаимодействия подвижной части с полем неподвижных катушек.

давать отклонения, направленные в одну сторону при разных направлениях тока, т. е. действовал бы как электромагнитный амперметр.

Погрешность ваттметра, возникающая по этой причине, пропорциональна квадрату силы тока в последовательной цепи. Ничтожно малая для ваттметров обычного типа она становится ощутимой для ваттметров высокой чувствительности.

На рис. 6 представлена зависимость этой погрешности от силы тока в последовательной цепи исследуемого ваттметра на пределе 2,5 а. Кривая 1

получена при плавном увеличении постоянного тока от нуля после размагничивания ваттметра плавно убывающим переменным током.

Закон нарастания отклонений несколько отстает от квадратичного, что возбудило сомнение в правильности объяснения причины появления этой погрешности. Предположение об электромагнитном характере взаимодействия было бы подтверждено, если бы удалось установить влияние предшествующего магнитного состояния на ход этой кривой.

С этой целью был проведен ряд опытов, повторенных многократно для получения наиболее достоверных средних значений, так как вследствие незначительности наблюдаемых отклонений имели место сравнительно большие погрешности их измерения. После перегрузки последовательной цепи током, в два раза превышающим номинальный, вновь была определена зависимость отклонений подвижной части от силы тока (кривая 2). Этот опыт подтвердил предположение о причинах рассматриваемой погрешности, показав наличие гистерезиса ферромагнитных частиц в подвижной части.

Характер расхождения между кривыми 1 и 2 можно описать уравнением,

$$\Delta\alpha = cI\Delta J,$$

где I — сила тока в катушках;

ΔJ — разница в намагниченности подвижной части;

c — коэффициент пропорциональности.

В начале системы координат $I = 0$, при максимальном токе $\Delta J = 0$ и, следовательно, в обоих случаях $\Delta\alpha = 0$. Наибольших значений $\Delta\alpha$ достигает при токах средней величины.

Изменение тока в неподвижных катушках от -5 до $+5$ а дает кривую 3. Кривая 4 получена на переменном токе. Чтобы избежать влияния взаимной индуктивности катушек, зажимы параллельной цепи ваттметра были в этом случае разомкнуты, а компенсационная ветвь (r_2, L_2) — отключена.

Результаты всех этих опытов показали наличие в ваттметре электромагнитного взаимодействия, которое, однако, не вызывает отклонений подвижной части, больше, чем на 0,1% от длины шкалы. Если же ваттметр работает в условиях перегрузки последовательной цепи, погрешность может возрасти в несколько раз.

ПОГРЕШНОСТЬ ОТ ОСТАТОЧНОГО НАМАГНИЧЕНИЯ ЭКРАНА, ВЫЗВАННОГО ПОЛЕМ ПОДВИЖНЫХ КАТУШЕК

При градуировке и использовании высокочувствительного экранированного ваттметра на постоянном токе возможно появление заметных погрешностей из-за влияния остаточного намагничивания экрана. В подавляющем большинстве случаев намагничивание экрана вызывается постоянным током, протекающим по неподвижным катушкам ваттметра перед измерением.

При определении этих погрешностей параллельная цепь ваттметра находилась под полным напряжением, а по последовательной цепи пропускался постоянный ток разной силы. Для получения более наглядных и точных результатов измерения производились иногда при двукратной перегрузке последовательной цепи постоянным током (5 а на пределе 2,5 а).

На рис. 7 изображены «петли остаточных индукций» экрана из трансформаторной стали и пермаллового экрана, каждая точка которых получена путем отсчета показаний ваттметра после увеличения силы тока в последовательной цепи до величины, указанной соответствующей точкой на оси абсцисс, и плавного уменьшения силы тока до нуля. Перед началом опыта экран был размагничен. По своей форме кривая несколько напоминает петлю гистерезиса. Верхняя и нижняя части их параллельны оси абсцисс, так как остаточная намагниченность, достигнутая при большом токе, сохраняется неизменной при любых измерениях меньших токов того же направления.

Если перед проверкой или использованием ваттметра на постоянном токе в его последовательной цепи протекал номинальный постоянный ток,

то вследствие намагничивания экрана может возникнуть систематическая погрешность, достигающая в случае применения экрана из пермаллоя 0,75 дел. Однако ваттметр рассчитан на $\cos \varphi = 0,1$, поэтому при работе на постоянном токе либо напряжение, либо ток должны быть в 10 раз меньше номинальных значений. Следовательно, погрешность от остаточного намагничивания экрана не превысит $\pm 0,05\%$.

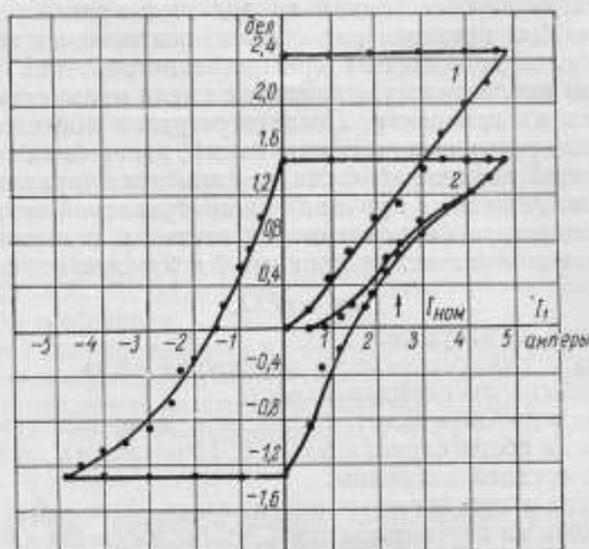


Рис. 7. Влияние на показание ваттметра остаточного намагничивания экрана:

1 — трансформаторная сталь; 2 — пермаллой.

В тех, довольно часто встречающихся на практике случаях, когда постоянный ток в последовательной цепи ваттметра превысил 0,1 или 0,2 номинального тока, экран ваттметра перед работой прибора на постоянном токе должен быть размагничен. С этой целью по последовательной цепи ваттметра должен быть пропущен переменный ток промышленной частоты с амплитудой, убывающей от номинального значения тока на данном пределе до нуля.

ПОГРЕШНОСТЬ ОТ ИНДУКТИВНОСТИ ПОДВИЖНОЙ КАТУШКИ ВАТТМЕТРА

Как показывает практика измерения потерь в электротехнических стаях, в большинстве случаев значение коэффициента мощности цепи испытуемого образца находится в пределах от 0,03 до 0,3.

Относительная погрешность показаний ваттметра, обусловленная сдвигом фаз на угол ψ' между напряжением и током в подвижной катушке из-за индуктивности последней, определяется [2] выражением

$$\gamma = \frac{\psi'}{34,4} \operatorname{tg} \varphi [\%].$$

В указанных выше условиях эта погрешность может достигать нескольких процентов.

Предполагалось, что ваттметр будет использоваться, главным образом, на пределах 30 и 75 в. Но чем меньше сопротивление параллельной цепи ваттметра, тем труднее сделать компенсацию этой погрешности достаточно хорошей на разных пределах измерения по напряжению. Это обстоятельство, а также стремление свести к возможному минимуму расход мощности в параллельной цепи, заставили отказаться от обычно принятой величины сопротивления и сделать ее равной 150 ом на 1 в.

Компенсация погрешности от индуктивности подвижной катушки выполнена по известной схеме, приведенной на рис. 2. На рис. 8 изображена векторная диаграмма параллельной цепи ваттметра.

Необходимость тщательной компенсации погрешности от индуктивности подвижной катушки потребовала достаточно точного расчета компенсационной схемы. Требуется также определить значение коэффициента L_2 самоиндукции компенсационной катушки при заданных значениях индуктивности L_1 подвижной катушки, сопротивления параллельных ветвей (r_1 и r_2) и добавочных сопротивлений (r_3 , r_4 и r_5). Предположим, что известен также знак и порядок величины реактивной составляющей Δx добавочного сопротивления.

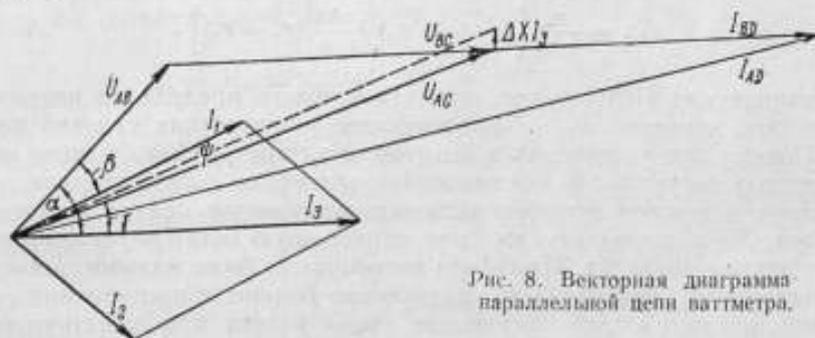


Рис. 8. Векторная диаграмма параллельной цепи ваттметра.

Для сопротивления и индуктивности участка цепи между точками A и B (рис. 2) имеем

$$r_{AB} = \frac{r_1(r_2^2 + \omega^2 L_2^2) + r_2(r_1^2 + \omega^2 L_1^2)}{(r_1 + r_2)^2 + \omega^2(L_1 + L_2)^2}, \quad (1)$$

$$L_{AB} = \frac{L_1(r_2^2 + \omega^2 L_1 L_2) + L_2(r_1^2 + \omega^2 L_1 L_2)}{(r_1 + r_2)^2 + \omega^2(L_1 + L_2)^2}. \quad (2)$$

Из рассмотрения векторной диаграммы легко найти

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\omega L_{AB}}{r_{AB}}, \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\omega L_1}{r_1}, \quad (4)$$

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\omega L_{AB} + \Delta x}{r_{AB} + r_0}, \quad (5)$$

где α — угол сдвига фаз между напряжением U_{AB} и полным током I_3 в параллельной цепи;

β — угол сдвига фаз между напряжением U_{AB} и током I_1 в подвижной катушке;

γ — угол сдвига фаз между напряжением U_{AC} , приложенным к параллельной цепи ваттметра, и током в этой цепи.

Из векторной диаграммы следует, что

$$-\phi = \alpha - \beta - \gamma. \quad (6)$$

Знак минус у ϕ поставлен потому, что на диаграмме изображен случай емкостного сдвига фаз между напряжением и током.

Условием полной компенсации погрешности от индуктивности подвижной катушки является равенство:

$$\alpha - \beta - \gamma = 0. \quad (7)$$

Углы α , β , и γ весьма малы. Поэтому операцию с углами можно заменить операцией с их тангенсами:

$$\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \gamma = -\operatorname{tg} \psi; \quad (8)$$

$$\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \gamma = 0. \quad (9)$$

Подставим в (9) выражения $\operatorname{tg} \alpha$, $\operatorname{tg} \beta$ и $\operatorname{tg} \gamma$ из (3), (4) и (5) и используем равенства (1) и (2).

Пренебрегая квадратами реактивных сопротивлений как малыми по сравнению с квадратами активных сопротивлений и выполнив простые преобразования, получим

$$L_2 = \frac{r_2}{r_2 r_0} \left[L_1 (r_2 + r_0) + \frac{\Delta x}{\omega} (r_1 + r_2) \right]. \quad (10)$$

Из выражения (10) следует, что для каждого предела по напряжению имеется свое значение L_2 , обеспечивающее уничтожение угловой погрешности. Однако для упрощения конструкции ваттметра было решено полную компенсацию погрешности осуществлять только на одном пределе.

Лучшим решением вопроса является достижение полной компенсации на пределе 75 в, поскольку это даст наименьшую остаточную погрешность на двух других пределах. Чтобы эти погрешности были малы, добавочные сопротивления r_0 должны быть значительно больше сопротивления r_2 компенсационной ветви. Это требование было учтено при конструировании ваттметра.

Углы сдвига фаз между напряжением, приложенным к параллельной цепи ваттметра, и током в подвижной катушке были вычислены с помощью уравнений (3), (4), (5) и (8):

на пределе 30 в $\psi = +0,6'$ — сдвиг фаз индуктивный;

на пределе 75 в $\psi = \pm 0,0'$;

на пределе 150 в $\psi = -0,1'$ — сдвиг фаз емкостный.

Компенсация угловой погрешности должна быть такой, чтобы при любых значениях коэффициента мощности, встречающихся в практике измерения потерь, относительная погрешность не превысила 0,5%.

$$\left| \frac{\psi'}{34,4} \operatorname{tg} \varphi \right| \leq 0,5. \quad (11)$$

Из неравенства (11) находим для предела 30 в, обладающего наилучшей компенсацией,

$$\cos \varphi \geq 0,035. \quad (12)$$

Следовательно, измерения потерь возможны во всем интервале магнитных индукций на образцах любых марок электротехнической стали.

Достигнутая компенсация рассматриваемой погрешности позволяет применять ваттметр на пределах по напряжению 75 и 150 в вплоть до частоты 300 гц, причём относительное значение рассматриваемой погрешности не превысит $\pm 0,5\%$, если выполнено условие (12).

ПОГРЕШНОСТЬ ОТ ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ КАТУШЕК ВАТТМЕТРА

При использовании ваттметра на переменном токе в подвижной катушке индуктируется э. д. с., обусловленная током в неподвижных катушках. Для высокочувствительного ваттметра, рассчитанного на $\cos \varphi = 0,1$, погрешность показаний из-за взаимной индуктивности катушек может играть значительно большую роль, чем у обычного ваттметра. Это обстоятельство должно учитываться как при конструировании, так и при установлении нормальных условий эксплуатации ваттметра.

Если по последовательной цепи ваттметра протекает ток

$$i_1 = I_{1m} \sin \omega t, \quad (13)$$

то в подвижной катушке индуцируется э. д. с.

$$e_2 = M_0 \cos \gamma I_{1m} \omega \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (14)$$

где M_0 — коэффициент взаимной индукции катушек при $\gamma = 0$;
 γ — угол между направлениями осей катушек.

Если параллельная цепь ваттметра имеет полное сопротивление z_2 и замкнута на сопротивление z_2 , то по ней протекает ток

$$i_2 = M_0 \cos \gamma I_{1m} \omega \frac{1}{z_2} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \psi_2' \right), \quad (15)$$

где $z_2' = \sqrt{(r_2 + r_2')^2 + (x_2 + x_2')^2}$ — полное сопротивление цепи;
 ψ_2' — угол сдвига фаз между э. д. с. и током.

Благодаря взаимодействию токов i_1 и i_2 ваттметр измеряет дополнительную мощность:

$$\Delta P_{ax} = \frac{1}{T} \int_0^T i_1 i_2 z_2' dt = -\omega M_0 \cos \gamma I_1^2 \frac{z_2'}{z_2} \sin \psi_2'. \quad (16)$$

В вычислении этой погрешности будет допущена ошибка менее 3%, если положить $z_2 = z_2'$. Тогда

$$\Delta P_{ax} = -\omega M_0 \cos \gamma I_1^2 \sin \psi_2'. \quad (17)$$

Этот результат справедлив для случая, когда в параллельной цепи ваттметра нет компенсационной ветви ($L_2 r_2$). Включение этой ветви резко увеличивает рассматриваемую погрешность за счет увеличения силы индуцированного тока и угла сдвига фаз между э. д. с. взаимной индукции и током в подвижной катушке.

Если обозначить активное сопротивление и индуктивность цепи, в которой э. д. с. взаимной индукции создает ток, через r_2' и L_2' при отсутствии компенсационной ветви и через r_{2k}' и L_{2k}' — при наличии компенсационной ветви, то отношение вращающих моментов, созданных индуцированными в подвижной катушке токами, определится выражением:

$$\frac{d_{cp.k}}{d_{cp}} = \frac{r_2'}{r_{2k}'} \cdot \frac{L_{2k}'}{L_2'}. \quad (18)$$

У нашего ваттметра, несмотря на сравнительно высокое сопротивление r_2 компенсационной ветви, отношение вращающих моментов на пределе 75 в равно 490. Во столько же раз увеличивается погрешность от взаимной индуктивности катушек при включении компенсационной ветви.

Результаты расчета погрешности для случаев, когда по последовательной цепи (предел по току 2,5 а) протекают токи 2,5 и 5 а при $f = 50$ гц, представлены на рис. 9 треугольниками 1 и 2.

Экспериментальное определение погрешности от взаимной индуктивности проводилось при замкнутых накоротко зажимах цепи напряжения на пределе 75 в. Определялась зависимость показаний ваттметра от силы переменного тока, протекающего по последовательной цепи (предел 2,5 а). Для

получения достаточных по величине отклонений измерения проводились при токах, достигающих удвоенного номинального значения.

Полученная таким способом кривая *a* (рис. 9) характеризует совместное влияние погрешности от взаимной индуктивности катушек и погрешности

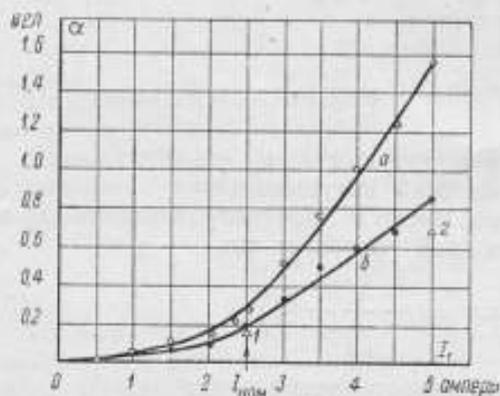


Рис. 9. Влияние на показания ваттметра взаимной индуктивности катушек.

от электромагнитного взаимодействия рамки с полем неподвижных катушек (кривая *a*, рис. 6). Кривая *b* (рис. 9), ординаты которой равны разности ординат двух указанных выше кривых, характеризует зависимость от силы тока только погрешности от взаимной индуктивности катушек.

Таким образом, рассматриваемая погрешность ваттметра при промышленной частоте и наибольшем допустимом токе не превышает 0,2 дел. шкалы или 0,13% от верхнего предела измерения.

Для правильной эксплуатации ваттметра необходимо знать области значений частоты и силы тока, в которых погрешность от взаимной индуктивности катушек не превышает некоторой наперед заданной величины.

Определение этих условий может быть проведено из рассмотрения преобразованного уравнения (17):

$$\Delta P_{\text{вз}} = \frac{4\pi^2 M_0 \cos \gamma L_2'}{r_2'} I_1^2 f^2 = C I_1^2 f^2. \quad (19)$$

Расчет коэффициента *C* для предела 75 в и крайней отметки шкалы ваттметра ($M_0 \cos \gamma = 0,2 \text{ мВ}$) с учетом соотношения (18) дает значение $C = 0,12 \cdot 10^{-4}$ для случая, когда погрешность выражается в делениях шкалы. Вычисление *C* по результатам непосредственных измерений $\Delta P_{\text{вз}}$, I_1 и f дает $0,13 \cdot 10^{-4}$ при измерении на частоте 50 гц (кривая *b*, рис. 9) и $0,12 \cdot 10^{-4}$ — на частоте 1000 гц.

Чтобы максимальная погрешность от взаимной индуктивности не превышала 0,75 дел., должно быть выполнено условие

$$I_1 f < 250. \quad (20)$$

При знаке равенства в выражении (20) имеем уравнение равнобочной гиперболы, которая является кривой равных погрешностей (рис. 10). Ниже этой кривой лежит область допустимых погрешностей. Чем меньше ток в последовательной цепи, тем при более высоких частотах можно производить измерения ваттметром. Однако погрешность из-за самоиндукции подвижной катушки ограничивает частотой 300 гц интервал частот, где эта погрешность не превышает 0,5%. Если сила тока в последовательной цепи не превышает 1 а, измерения возможны до частоты 300 гц, а если сила тока не превышает 2 а — до частоты 150 гц.

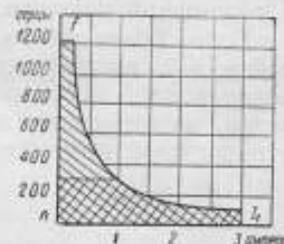


Рис. 10. Области допустимых погрешностей от взаимной индуктивности катушек ваттметра и от самоиндукции подвижной катушки.

Выводы

1. Приведенные в статье расчеты и исследования позволили разработать электродинамический малокосинусный ваттметр со световым указателем.
2. Исследование погрешностей ваттметра показало, что он удовлетворяет требованиям, предъявляемым к приборам класса 0,5.
3. Ваттметр может быть рекомендован для измерения потерь в образцах листовых электротехнических сталей.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ягола Г. К., Труды ВНИИМ, вып. 24 (84), 1954.
2. Электрические и магнитные измерения, под редакцией проф. Е. Г. Шрамкова, ОНТИ, 1937.

ВАТТМЕТРОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕРЬ НА ГИСТЕРЕЗИС И ВИХРЕВЫЕ ТОКИ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ЧАСТОТАХ

Рост производства и потребления специальных высокочастотных сортов электротехнической стали и других магнитных материалов привел к появлению производственной необходимости в измерении потерь на гистерезис и вихревые токи при частотах 200, 400, 800, 1000, 2000 и 2500 *гц*, а следовательно, к появлению потребности в нормальных образцах таких материалов, поверенных с наибольшей возможной точностью. Чтобы гарантировать требуемую точность измерения потерь на верхнем пределе частотного интервала и подготовиться к его возможному расширению, большинство нижеописываемых исследований проводилось при частотах до 4000 *гц*. Так как измерение потерь обычно должно проводиться в широком интервале магнитных индукций, наиболее приемлемым методом измерения является ваттметровый, позволяющий правильно учитывать искажения формы волны тока и магнитной индукции.

В области повышенных частот, примыкающих к промышленной частоте, погрешности электродинамического ваттметра увеличиваются, но могут быть сделаны меньше, чем у ваттметров других систем. Кроме того, стабильность показаний такого ваттметра является весьма высокой, а устройство — несложным. Все это и определило выбор электродинамического ваттметра для измерений потерь при частотах до 4000 *гц*.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ВАТТМЕТРА, ПРЕДНАЗНАЧЕННОГО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ПОВЫШЕННЫХ ЧАСТОТАХ И МАЛЫХ ЗНАЧЕНИЯХ $\cos \varphi$

Применение электродинамического ваттметра при повышенных частотах приводит к значительному увеличению погрешностей от самоиндукции подвижной катушки (точнее из-за влияния реактивной составляющей сопротивления параллельной цепи), от взаимной индуктивности катушек, от потерь энергии на вихревые токи в металлических деталях и обмотках ваттметра и от взаимодействия этих токов с током в подвижной катушке, от емкостных токов, от электростатического взаимодействия подвижных и неподвижных частей прибора.

Разработка конструкции и исследование ваттметра проводились с целью уменьшения перечисленных погрешностей, обеспечения достаточной стабильности показаний и возможности измерения потерь при малых значениях коэффициента мощности. Необходимо было, чтобы на постоянном и переменном токах промышленной частоты ваттметр удовлетворял требованиям, предъявляемым к приборам класса 0,5, а увеличение погрешностей при повышенных частотах не превышало 0,5%.

Изготовленный прибор (рис. 1) характеризуется следующими основными данными. Пределы измерения: по напряжению — 30 и 75 *в*, по току — 1,25

и $2,5 \text{ a}$; $\cos \varphi = 0,2$. Для защиты от влияния внешних магнитных полей применена астатическая система. Последовательная цепь ваттметра состоит из четырех круглых катушек с обмоткой из провода ЛЭДШ (диаметр каждой проволоки $0,07 \text{ мм}$, система скрутки 3×20 шт., сечение $0,23 \text{ мм}^2$) и переключателя пределов измерения.

Параллельная цепь состоит из двух круглых бескаркасных катушек с обмоткой из алюминиевого провода в эмалированной изоляции (диаметр проволоки $0,1 \text{ мм}$, по 200 витков в каждой катушке), добавочных сопротивлений, намотанных в один слой на гетинаксовых пластинах толщиной 2 мм марганцовым проводом диаметром $0,02 \text{ мм}$ в шелковой изоляции, и переключателя направления тока.

Ваттметр имеет вспомогательный предел по напряжению 3 в , который может быть использован при сравнительно низких частотах (до 200 гц).

Подвижная часть укреплена на ленточном подвесе из фосфористой бронзы, верхний конец которого крепится на центральном винте специальной крутильной головки. Последняя дает возможность устанавливать подвижную часть в любом заданном положении. Центральный винт служит для перемещения подвижной части по вертикали при наладке прибора и ввинчивается со значительным усилием в латунную втулку. Втулка свободно, но без заметного зазора, вращается внутри закрепленного в каркасе прибора латунного подшипника.



Рис. 1. Высокочувствительный ваттметр для измерений при повышенных частотах и малых значениях коэффициента мощности.

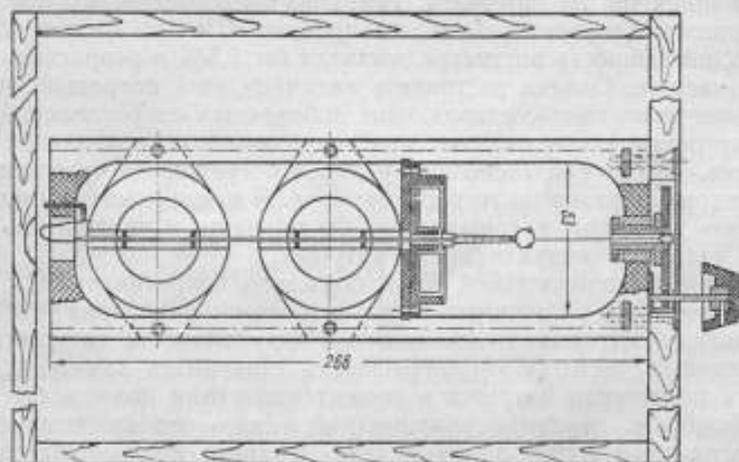


Рис. 2. Эскиз измерительного механизма ваттметра.

Каркас прибора изготовлен из текстолита, каркасы катушек и камера успокоителя — из пластмассы, винты для крепления катушек — из текстолита. Измерительный механизм прибора (рис. 2) помещен в деревянный ящик и укреплен на его съемной крышке, к которой неподвижно прикреплена половина передней стенки ящика с осветителем и матовой двусторонней шкалой. Шкала имеет длину 360 мм и выгнута по дуге окружности радиусом 340 мм . Ваттметр устанавливается по уровню с помощью ножек, ввинчивающихся в дно ящика.

Первоначально предполагалось крепить подвижную часть на растяжках. Однако из-за неточности сборки и недостаточной жесткости конструкции при повороте головки изменялось натяжение растяжек и нестабильность показаний прибора достигала 3—5%. От нижней растяжки пришлось отказаться. Она была заменена безмоментным вводом из золотой ленты размерами $0,003 \times 0,3 \times 60$ мм.

Параллельная цепь была рассчитана на длительную работу при напряжении в 2,5 раза превышающем номинальное. Благодаря этому, например, предел:

$$I = 1,25 \text{ а}, \quad U = 30 \text{ в}, \quad \cos \varphi = 0,2,$$

может быть использован как предел:

$$I = 0,5 \text{ а}, \quad U = 75 \text{ в}, \quad \cos \varphi = 0,2,$$

что имеет существенное значение для снижения некоторых погрешностей ваттметра при повышенных частотах. Назовем условно последний предел «высокочастотным».

Компенсация температурной погрешности в приборе не предусмотрена из-за опасения, что усложнение схемы параллельной цепи приведет при повышенных частотах к увеличению других погрешностей. Температурная погрешность ваттметра обуславливается почти исключительно уменьшением упругости подвеса с увеличением температуры и составляет примерно $+0,25\%$ при повышении температуры на 10°C .

Для уменьшения погрешностей от индуктивности подвижной катушки и взаимной индуктивности катушек сопротивление параллельной цепи ваттметра было доведено до значения, превосходящего 1000 ом на 1 в (на пределе 30 в сопротивление равно 35100 ом). Благодаря этому увеличение полного сопротивления параллельной цепи, обусловленное ростом реактивного сопротивления подвижных катушек, при частотах до $10\,000 \text{ гц}$ не превысит $0,02\%$.

Несравненно большее значение может иметь угловая погрешность ваттметра, вызванная той же причиной. Так, если бы добавочные сопротивления были совершенно безреактивны, то на пределе 30 в при частоте 2000 гц и $\cos \varphi = 0,2$ погрешность ваттметра достигла бы $1,5\%$ и возрастала пропорционально частоте. Однако рассчитать величину этой погрешности не удалось, так как емкостные составляющие добавочных сопротивлений влияют на величину погрешности сильнее, чем индуктивное сопротивление подвижных катушек. Поэтому компенсацию угловой погрешности пришлось производить экспериментально на готовом приборе. В схеме компенсации должны отсутствовать элементы, которые могли бы привести к увеличению погрешностей от взаимной индуктивности катушек.

Применение в параллельной цепи большого сопротивления и компенсация индуктивности подвижных катушек создают благоприятные условия для уменьшения погрешности от взаимной индуктивности катушек. Все же при повышенных частотах эта погрешность становится заметной. Для ее исключения подвижная катушка в момент измерения должна быть приведена в положение, перпендикулярное положению неподвижных катушек. Это осуществляется путем закручивания верхнего конца подвеса.

Перпендикулярное положение катушек можно установить с достаточной точностью только электрическим путем. Для этого подвижную катушку или всю параллельную цепь на малом пределе по напряжению замыкают накоротко и, поворачивая головкой подвижную часть, находят такое положение, при котором включение и выключение в последовательной цепи тока повышенной частоты не вызывает отклонения указателя.

Подвижная часть ваттметра при измерении отклоняется от среднего положения на углы, не превышающие 15° , поэтому можно было ожидать, что шкала ваттметра будет достаточно равномерной. Градуировочные погрешности по всей шкале не превосходят $0,2\%$.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ВАТТМЕТРА НА ПОВЫШЕННЫХ ЧАСТОТАХ

Вопросами применения электродинамического ваттметра при повышенных частотах занимались многие исследователи. Обобщение результатов этих исследований дано Кейнатом [1], который показал, что применение «крутильных» ваттметров позволяет расширить область применения электродинамических ваттметров до 1000 *гц*. Другие исследователи [2] считают, что при измерении потерь в электротехнических сталях ваттметры могут использоваться до частоты в несколько сотен герц. Применению ваттметров при повышенных частотах и малых значениях $\cos \varphi$ было уделено мало внимания, и в настоящее время нет ваттметров, пригодных для измерения потерь при повышенных частотах.

Проанализируем погрешности сконструированного нами ваттметра, изучим способы их уменьшения и найдем условия, при которых ваттметр может быть применен при малых значениях $\cos \varphi$ и повышенных частотах.

Наиболее наглядно проявляет себя в этих условиях погрешность от взаимной индуктивности катушек. Величина и знак этой погрешности могут быть определены из выражения:

$$\Delta P_{\text{вз}} = \omega M_0 \cos \gamma I_1^2 \sin \psi_{\text{вз}}, \quad (1)$$

где ω — круговая частота тока;

M_0 — коэффициент взаимной индуктивности катушек при $\gamma = 0$;

γ — угол между плоскостями подвижной и неподвижной катушек;

I_1 — сила тока в последовательной цепи;

$\psi_{\text{вз}}$ — угол сдвига между напряжением и током параллельной цепи.

Выражение (1) позволяет также определить характер сдвига фаз между током и напряжением в параллельной цепи, если известно направление отклонения подвижной части под действием э. д. с. взаимной индукции.

В табл. 1 дана связь между характером сдвига фаз в параллельной цепи и направлением отклонения подвижной части.

Таблица 1

$\psi_{\text{вз}}$	γ	$\Delta P_{\text{вз}}$	Направление отклонения указателя
Положительный	Больше 90°	Положительная	К середине шкалы
Положительный	Меньше 90°	Отрицательная	К середине шкалы
Любой	Равен 90°	Равна нулю	Не отклоняется
Отрицательный	Больше 90°	Отрицательная	От середины шкалы
Отрицательный	Меньше 90°	Положительная	От середины шкалы
Равен нулю	Любой	Равна нулю	Не отклоняется

Если реактивное сопротивление параллельной цепи имеет индуктивный характер, указатель ваттметра отклоняется к середине шкалы, если емкостный — от середины к краям шкалы. Включение на зажимы параллельной цепи индуктивности или емкости может изменить не только величину, но и знак погрешности. Поэтому из двух возможных способов уменьшения погрешности — перпендикулярное расположение катушек или сведение к нулю угла $\psi_{\text{вз}}$ — при измерении в цепях с малым значением $\cos \varphi$ предпочтение следует отдать первому. Если же ваттметр рассчитан на $\cos \varphi = 1$, с успехом может быть применен более простой, второй, способ.

Погрешность $\Delta P_{\text{вз}}$ определялась экспериментально при замкнутых коротко зажимах параллельной цепи. На пределе 3 *в* угол $\psi_{\text{вз}}$ оказался положительным, а на пределах 30 и 75 *в* — отрицательным.

Результаты определения зависимости $\Delta P_{вз}$ на пределе 3 в от частоты и силы тока в последовательной цепи представлены на рис. 3. Измерения производились при положениях указателя в точках шкалы: —150, —12 и +130. Отметка —12 выбрана за нулевую, потому что при замыкании накоротко подвижных катушек световой указатель устанавливается на ней при любых значениях тока и частоты. Две другие отметки находятся у противоположных концов шкалы почти на равных расстояниях от отметки —12, которая условно названа «электрическим нулем» шкалы. Направление отклонения подвижной части указывает на емкостный характер реактивного сопротивления параллельной цепи ваттметра, обусловленный большой величиной распределенной емкости добавочного сопротивления.

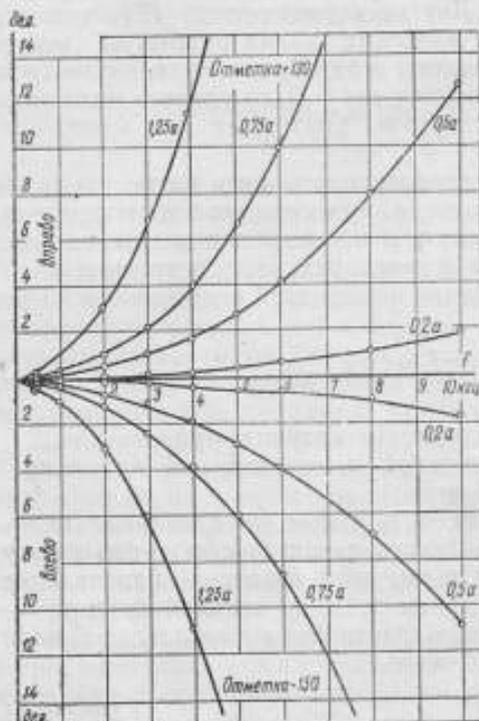


Рис. 3. Влияние частоты и силы тока в последовательной цепи ваттметра на погрешность от взаимной индуктивности катушек.

Найдена из погрешности для крайней отметки шкалы и линейной зависимости ее от отсчета по шкале. В наиболее тяжелых условиях наших опытов (6—10 кгц, большой ток) эта область лежит в пределах ± 2 деления от «электрического нуля».

Как уже указывалось, при активном характере нагрузки погрешность $\Delta P_{вз}$ может быть сделана ничтожно малой при любом показании ваттметра. С этой целью на зажимы параллельной цепи ваттметра при $I = 0,5$ а на пределе 30 в была включена катушка индуктивности $L_n = 52,5$ мкн. Результаты определения $\Delta P_{вз}$ на отметке —12 и равноотстоящих от нее отметках +128 и —152 представлены на рис. 4 соответственно кривыми 3, 1 и 2, когда зажимы замкнуты накоротко, и 3', 1' и 2', когда включена катушка индуктивности. Этот опыт показывает, что может быть достигнута очень хорошая компенсация погрешности $\Delta P_{вз}$.

Полное устранение погрешностей от взаимной индуктивности делает доступным изучение еще один источник погрешностей, определяющих, по сути дела, судьбу электродинамических ваттметров в области повышенных частот.

Уже из данных рис. 4 следует, что причиной остаточных отклонений подвижной части ваттметра (кривые 1', 2', 3' и 3) является не взаимная индуктивность катушек. Опыты показывают, что величина и знак этих отклонений зависят не только от частоты и силы тока, но также и от взаимного

При значениях частоты до 1000 гц и при любых значениях силы тока погрешность от взаимной индуктивности катушек не превосходит $\pm 0,5\%$ от показания ваттметра при номинальных значениях напряжения и $\cos \phi$. Следовательно, в этих условиях при измерении возможно использование всей шкалы ваттметра. На «высокочастотном» пределе при тех же условиях возможны измерения до частоты 2500 гц.

Во всех остальных случаях начальное положение подвижной части должно быть таким, чтобы отсчет показаний ваттметра производился вблизи «электрического нуля» шкалы. Область допустимых отступлений от нуля легко может быть

расположения элементов измерительной установки (приборов, реостатов, генератора и усилителей) и заземления отдельных точек цепи. Особенно большие влияния оказывают изменения в параллельной цепи ваттметра (подключение приборов, переключение переключателя направления тока, соединение зажимов цепи напряжения, изменение расположения проводников). Экранированием отдельных элементов схемы удается уменьшить эти влияния, но далеко не полностью.

Анализ результатов этих опытов приводит к выводу, что причиной такого рода отклонений являются токи утечки через паразитные емкости схемы. Величины рассматриваемых отклонений подвижной части в любых условиях опыта, когда последовательная и параллельная цепи ваттметра не соединены между собой, очень малы и не превышают 0,3 деления вплоть до частоты 4 кГц.

Данный случай, однако, не имеет большого практического значения, поскольку при измерении мощности генераторные зажимы обеих цепей обычно соединяются. Только в ваттметровом методе измерения потерь, когда измерения ведутся на образце с двумя обмотками, может иметь место подобный случай, имеющий, однако, существенную особенность. Она заключается в том, что цепи ваттметра при этом связаны между собой через довольно значительную емкость между намагничивающей и измерительной обмотками образца. Эта емкостная связь может значительно изменить величины и даже направление рассматриваемых отклонений подвижной части.

Результаты опыта (рис. 5) подтверждают это предположение. Кривые 1'—4' относятся к случаю, когда измерительная обмотка испытуемого образца включена на зажимы параллельной цепи ваттметра на пределе 30 в, а намагничивающая обмотка из цепи выключена (положение, изображенное на схеме). Включение переключателя *П* на нижний контакт приводит к значительному усилению емкостной связи между цепями ваттметра. При этом достигается состояние, которое хорошо имитирует нормальные условия измерения потерь. Отклонения светового указателя в этом случае представлены кривыми 1—4. Для сравнения на рисунке дана кривая 3'', аналогичная кривой 3, снятая на торе с другим сечением и числами витков обмоток.

С целью подтверждения предположения о влиянии именно емкостных связей между обмотками на величину и характер отклонения подвижной части ваттметра, параллельная и последовательная цепи были соединены через конденсатор 230 пф (переключатель *П* в верхнем положении). Полученная при этом кривая 3'' имеет такой же характер, как и кривая 3 и совпала бы с ней, если бы емкость конденсатора равнялась 260 пф. Подключение к последовательной цепи ваттметра другого конца намагничивающей обмотки или соединенных вместе концов может дать несколько иное отклонение, однако во всех наших опытах разница становилась заметной (превышала 0,3 дел.) только при частотах выше 4 кГц.

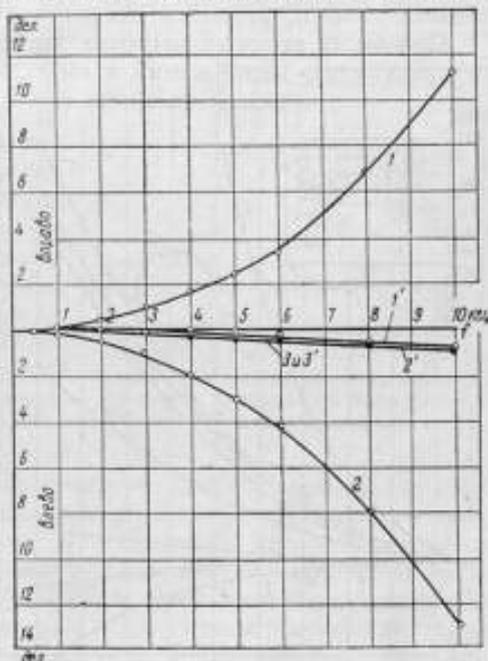


Рис. 4. Зависимость от частоты погрешности из-за взаимной индуктивности катушек и погрешности, оставшейся после включения компенсационной катушки индуктивности на пределе 1,25 а и 30 в.

Погрешности измерения потерь на образце с двумя обмотками могут быть исключены, если после обычного измерения мощности провести второе измерение, предварительно выключив из первичной цепи один конец намагничивающей обмотки (не соединенный непосредственно с ваттметром) и сохранив неизменным ток в последовательной цепи.

Точность предложенного метода учета погрешностей, вызванных емкостными токами, является достаточно высокой вплоть до частот 4—5 кГц.

При более высоких частотах эта операция приводит к некоторому перераспределению напряжений и емкостей между отдельными частями схемы.

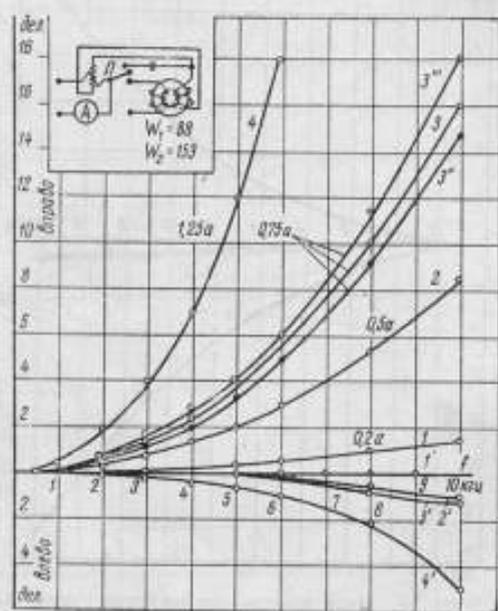


Рис. 5. Влияние емкостной связи между обмотками испытуемого образца (цепями ваттметра) на показания ваттметра.

Возникающую по этой причине некоторую неопределенность погрешности можно уменьшить, если как при основном, так и при вспомогательном измерениях конец намагничивающей обмотки образца (зажим последовательной цепи ваттметра) соединен с концом измерительной обмотки (зажим параллельной цепи ваттметра). Таким образом, мы подошли к практически наиболее важному случаю, к которому могут быть приведены все случаи измерения мощности.

Соединение генераторных зажимов ваттметра приводит к заметному увеличению отклонений подвижной части. Уменьшить величину этих отклонений можно несколькими способами. Ток через емкость между подвижными и неподвижными катушками уменьшается, если оклеить внутреннюю поверхность неподвижных катушек тонкой алюминиевой фольгой (с разрезами) и подать на этот экран потенциал генераторного зажима параллельной цепи ваттметра. При этом отклонения уменьшаются на 20—40%, а иногда в 2—3 раза. Заземление соединенных вместе генераторных зажимов, если это возможно по условиям измерения, также приводит к уменьшению погрешностей ваттметра вследствие влияния токов утечки через паразитные емкости. На 25—30% уменьшаются отклонения подвижной части, если весь измерительный механизм помещается в экран из алюминиевой фольги, который электрически соединяется с генераторными зажимами ваттметра.

Лучшим решением задачи уменьшения погрешностей, вызванных емкостными влияниями, является проведение измерений при малых токах. Этот вывод хорошо иллюстрируется кривыми 1—4 (рис. 5), которые примерно на 20% лежат ниже аналогичных кривых, полученных при соединенных вместе генераторных зажимах.

Так, измерения без учета влияния емкостных токов возможны при токе 1,25 а — до 1000 гц, при токе 0,5 а — до 2500 гц, при токе 0,2 а — до 6000 гц.

Если же токи и частоты таковы, что погрешностями из-за емкостных токов нельзя пренебречь, они должны быть определены для каждого случая путем дополнительного измерения по схеме рис. 6. После обычного измерения потерь следует перевести переключатель в положение 2 и реостатом довести силу тока до ее значения при основном измерении. Затем крутильной головкой перевести световой указатель в точку предыдущего отсчета.

выключить ток и отсчитать смещение указателя, равное поправке к показанию ваттметра. Если смещение указателя после выключения тока происходит в сторону основного отклонения подвижной части — поправка будет положительная.

Мы рекомендуем проводить измерение мощности при малых токах. Но для сохранения достаточных по величине отклонений подвижной части в соответствующее число раз должно быть увеличено напряжение, подводимое к параллельной цепи ваттметра. Не вызовет ли этот прием появления или усиления других погрешностей? Такое изменение режима работы должно было бы в первую очередь привести к увеличению влияния внешних магнитных полей и электростатического взаимодействия подвижных и неподвижных частей прибора.

Опыты, проведенные при пятикратной перегрузке цепи напряжения и различных частотах, вплоть до 20 кГц, при соединенных и разъединенных генераторных зажимах и отсутствии тока в последовательной цепи, показали, что погрешности, вызванные совокупным влиянием указанных причин, меньше 0,1%.

Все эти исследования подтверждают целесообразность введения так называемого «высокочастотного» предела ваттметра. Учет высказанных соображений позволяет изготавливать ваттметры с уменьшенными погрешностями от взаимной индуктивности катушек и емкостных токов. Так, хороший результат дает уменьшение числа витков неподвижных катушек в 2—2,5 раза и уменьшение сопротивления параллельной цепи во столько же раз. Этот прием позволяет также уменьшить распределенную емкость добавочных сопротивлений, что упрощает и иногда делает даже ненужной компенсацию угловой погрешности ваттметра.

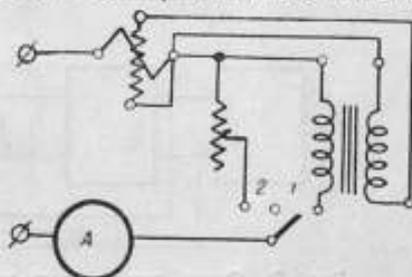


Рис. 6. Дополнительное устройство в схеме ваттметровой установки для измерения поправки на влияние емкостных токов.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ВАТТМЕТРА ПРИ АКТИВНОМ, ИНДУКТИВНОМ И ЕМКОСТНОМ ХАРАКТЕРАХ НАГРУЗКИ НА ПОВЫШЕННЫХ ЧАСТОТАХ

Полученные нами данные о погрешностях электродинамического ваттметра не дают еще возможности сделать заключение о его пригодности для измерения мощности при повышенных частотах. К такому заключению должна привести непосредственная поверка ваттметра методом, обладающим при данных частотах ничтожными частотными погрешностями. В качестве такого метода использован метод измерения мощности, рассеиваемой на известном активном сопротивлении, по результату измерения тока способом термоэлектрического компарирования.

Измерения проводились на катушке сопротивления с бифилярной обмоткой из манганинового провода диаметром 0,5 мм ($R \approx 16 \text{ ом}$). Реактивной составляющей сопротивления и изменением активного сопротивления этой катушки в области частот до 10—15 кГц можно пренебречь.

Приборы были соединены по схеме рис. 7. После каждого измерения мощности переключатель Π_2 выключался, указатель ваттметра смещался к «электрическому нулю» — в точку, соответствующую показанию ваттметра при низкой частоте; затем переключатель переводился в левое положение, ток доводился до прежнего значения, и записывалось новое отклонение. На рис. 8 построены кривые зависимости показаний ваттметра от частоты при $I = 0,5 \text{ а}$. Темными кружками обозначены отклонения указателя (ось ординат слева), найденные описанным выше способом, т. е. погрешности ваттметра, обусловленные емкостными токами (ось ординат справа).

Кривая 1 получена при включении ваттметра по обычной схеме и питании установки через усилитель У-50, кривая 2 — при включении в параллельную цепь ваттметра катушки индуктивности $L_k = 42,5 \text{ мГн}$ (на рис. 7 изображена пунктиром) и питании через усилительный комплект УК-300-М. На величину и знак погрешности решающее влияние оказала замена усилителя. Начиная с частот 12 кГц из цепи был выключен электромагнитный миллиамперметр, что привело к резкому изменению влияния емкостных токов.

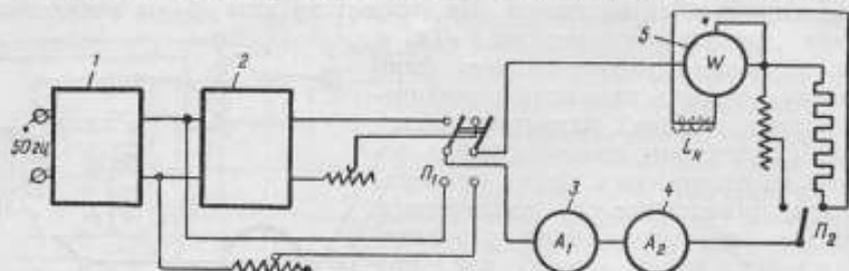


Рис. 7. Схема для проверки ваттметра при звуковых частотах и активном характере нагрузки и для измерения остаточных отклонений подвижной части: 1 — стабилизатор; 2 — звуковой генератор; 3 — амперметр электромагнитный; 4 — амперметр термоэлектрический; 5 — ваттметр.

Рассмотрение результатов описанных опытов существенным образом меняет представление о возможностях применения электродинамических ваттметров при звуковых частотах.

Из рис. 8 видно, что изменение показаний ваттметра с частотой, если измерения производятся вблизи «электрического нуля» шкалы, может быть почти полностью объяснено влиянием токов утечки через паразитные емкости.

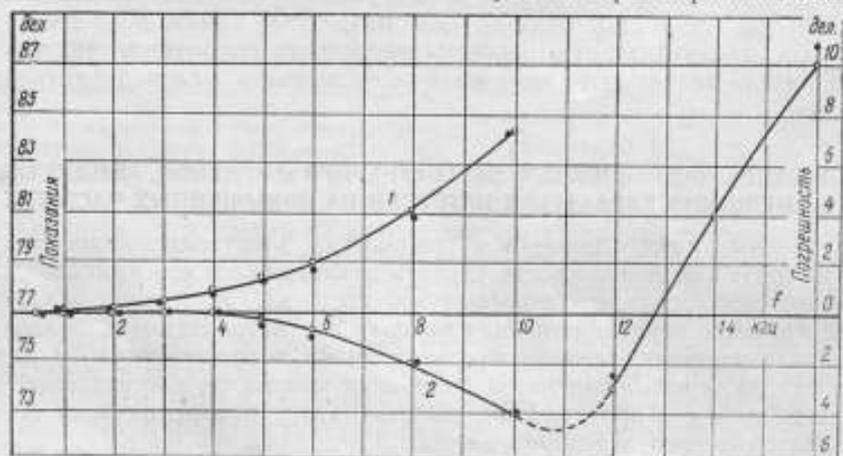


Рис. 8. Результаты измерения мощности при активном характере нагрузки и зависимость погрешностей измерения, вызванных емкостными токами, от частоты.

Экспериментально найденные по предложенному нами методу погрешности ваттметра, прибавленные к результатам вычисления мощности по току и сопротивлению, дают результаты (обозначены темными кружками), почти полностью совпадающие с результатами измерения мощности электродинамическим ваттметром. Наблюдающиеся расхождения объясняются погрешностями отсчета и вариацией показаний электромагнитного миллиамперметра ($\pm 0,15\%$), термоэлектрического миллиамперметра ($\pm 0,15\%$ при показании 200 дел.) и исследуемого ваттметра ($\pm 0,3\%$ при показаниях порядка 70—80 дел.).

При частотах до 10 кГц разность между исправленным результатом измерения мощности ваттметром и действительным значением мощности, за которое принято значение I^2R , не превосходит $\pm 0,6\%$. В интервале частот 10—20 кГц эти расхождения несколько больше и достигают 1—2% от измеряемой величины, причем наблюдается в этих же пределах некоторая неустойчивость показаний, затрудняющая измерения.

С уменьшением тока, проходящего через приемник, влияние емкостных токов уменьшается и оказывается возможным проводить измерения мощности без введения поправки до более высоких частот. Как показывает кривая 1 (рис. 9), измерение мощности электродинамическим ваттметром с погрешностью, не превышающей $\pm 1\%$, может быть выполнено по предлагаемой методике при частотах до 10 кГц (измерения проведены по схеме рис. 9, б на активном сопротивлении 68 ом при токе 0,3 а на пределе 30 в и 1,25 а).

Таким образом, предложенная методика учета погрешностей позволяет расширить область применения электродинамического ваттметра до частот 10—20 кГц, если реактивное сопротивление приемника энергии пренебрежимо мало. Однако основной целью наших исследований является создание ваттметра, пригодного для измерений при повышенных частотах, малых значениях коэффициента мощности и индуктивном характере нагрузки.

Чтобы определить влияние индуктивности нагрузки, измерения проводились на манганиновой катушке сопротивления (рис. 9, а), состоящей из двух идентичных секций (намотка обеих секций велась одновременно), присоединенных к переключателю таким образом, что возможно осуществление как унифилярной, так и бифилярной намотки без изменения активного сопротивления катушки (68 ом). В первом случае индуктивность катушки равна 1,7 мГн, во втором — реактивное сопротивление исчезающе мало. Измерение мощности проводилось попеременно при двух схемах включения катушки и постоянном значении силы тока (около 0,3 а). Приборы соединялись по схеме рис. 9, б. Показания термоэлектрического миллиамперметра периодически контролировались на переменном токе промышленной частоты.

При безреактивном включении катушки показания ваттметра не зависят от частоты (кривая 1 рис. 9). При индуктивном же включении катушки показания ваттметра резко увеличиваются с частотой, если в параллельную цепь ваттметра включена компенсационная катушка индуктивности $L_k = 52,5$ мГн (кривая 3), и незначительно уменьшаются с частотой, если компенсационная катушка выключена (кривая 2). Подбором индуктивности катушки ($L_k = 6—8$ мГн) можно добиться независимости показаний ваттметра от частоты.

Измерения, проведенные при индуктивности приемника 20 и 40 мГн, частоте 2000 гц и $\cos \varphi = 0,2—0,4$, выявили линейную зависимость показаний ваттметра от индуктивности компенсационной катушки. При частоте 2000 гц ваттметр дает такие же показания, как и на частоте 50 гц, если

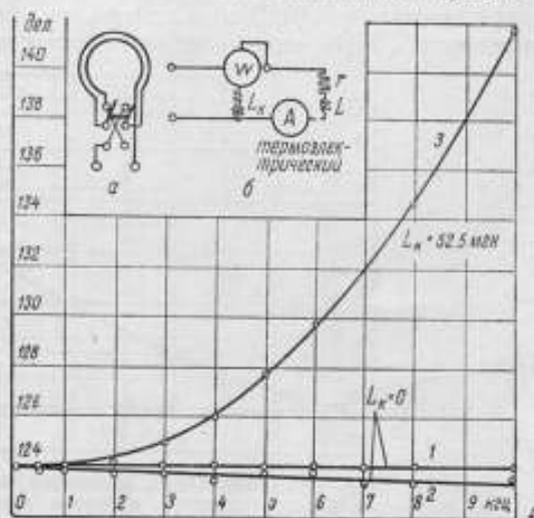


Рис. 9. Зависимость от частоты результатов измерения мощности при активном и индуктивном характере нагрузки.

$L_k = 5-7$ мкн. Расход мощности в параллельной цепи ваттметра из результатов измерений исключался.

Наконец, влияние индуктивности L_k на показания ваттметра было изучено в условиях, наиболее близких к условиям, в которых происходит измерение потерь: $\cos \varphi = 0,2$, интервал частот 1,5—6 кГц. В качестве приемника энергии использовалась переменная индуктивность 7—50 мкн с последовательно включенной манганиновой катушкой сопротивления. Величина индуктивности расчетным путем подбиралась такой, чтобы при любом значении частоты $\cos \varphi = 0,2$. Ток, протекающий через катушку, поддерживался неизменным (0,21 а) и измерялся методом термоэлектрического компарирования. Измерение мощности производилось ваттметром на пределе

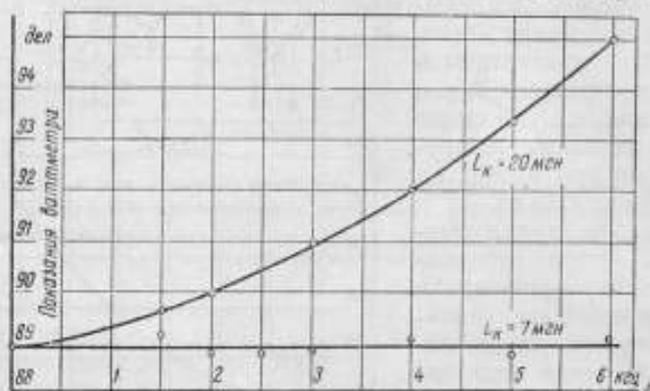


Рис. 10. Зависимость показаний ваттметра от частоты при активном характере нагрузки при некоторых значениях индуктивности компенсационной катушки.

1,25 а и 30 в по схеме рис. 9, б при значениях индуктивности компенсационной катушки 7 и 20 мкн. Результаты опыта (рис. 10) показывают, что вплоть до частоты 6 кГц показания ваттметра сохраняются неизменными, равными показанию на постоянном токе и значению I^2R , если $L_k = 7$ мкн.

Увеличение L_k до 20 мкн приводит к отставанию от напряжения тока в параллельной цепи и, следовательно, к увеличению показаний ваттметра при индуктивном характере сопротивления приемника.

Важным этапом исследования ваттметра явилось изучение погрешностей измерения при емкостном характере нагрузки. В качестве приемника энергии был использован воздушный конденсатор в 0,01 мкф, на зажимах которого поддерживалось постоянное напряжение $U = 100$ в.

Так как расход мощности в воздушном конденсаторе практически равен нулю, то можно достичь весьма малых значений $\cos \varphi$. Показание ваттметра, исправленное на расход мощности в параллельной цепи, если ваттметр включен по схеме, изображенной на рис. 11, является в то же время и его погрешностью.

Условия опыта были выбраны такими, чтобы все погрешности, кроме исследуемой, были малыми. В частности, сила тока в последовательной цепи поддерживалась очень малой, а отсчет показаний производился вблизи «электрического нуля» шкалы.

Результаты опыта представлены кривыми (рис. 11). На постоянном токе, переменном токе промышленной частоты и по формуле:

$$P = U^2 \left(\frac{1}{r_w} + \frac{1}{r_v} \right) = \frac{U^2}{r_2} \quad (2)$$

были найдены показания ваттметра на пределах 30 и 75 в при напряжении на обкладках конденсатора 100 в. Измерения «активной мощности воздушного конденсатора», произведенные без компенсационной катушки индуктивности

($L_k = 0$), подтвердили, что сдвиг фаз между напряжением и током в параллельной цепи является емкостным. Удастся подобрать такие значения L_k (7 мкн на пределе 30 в и 97 мкн на пределе 75 в), при которых показания ваттметра не зависят от частоты вплоть до 10 кГц. Эти результаты хорошо совпадают с результатами, полученными при индуктивном характере нагрузки.

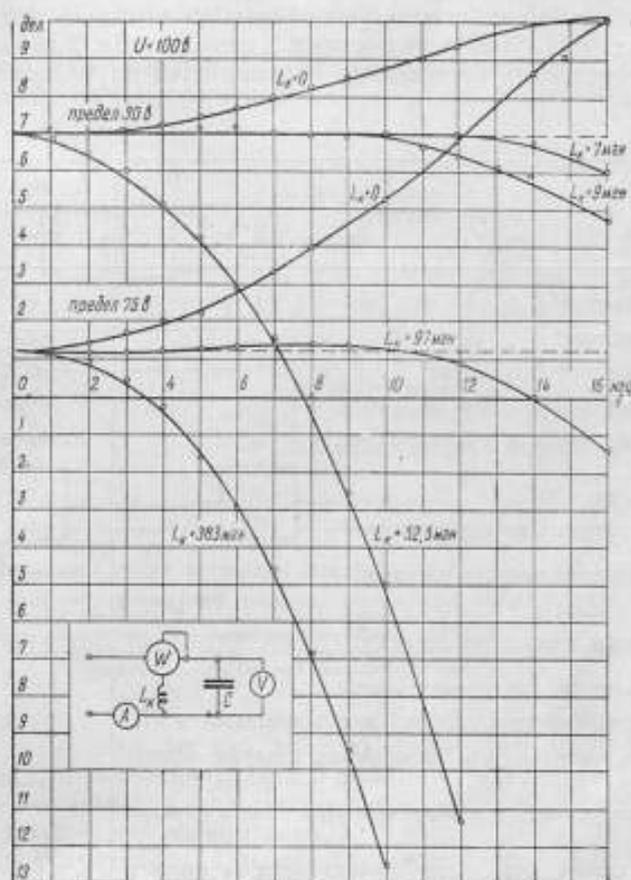


Рис. 11. Зависимость от частоты фазовой погрешности ваттметра при емкостном характере нагрузки и разных значениях индуктивности компенсационной катушки.

Весьма существенно, что описанные измерения велись при более высоких частотах, чем при индуктивной нагрузке, и при меньших значениях $\cos \varphi$: 0,23 — при частоте 2000 гц, 0,09 — при частоте 5000 гц и 0,046 — при частоте 10000 гц.

При частотах свыше 10 кГц начинают проявляться влияния емкостных токов. Применение описанного выше метода их определения объяснило отклонение кривой при $L_k = 7 \text{ мкн}$ от пунктирной линии и показало, что это значение индуктивности компенсационной катушки является наиболее близким к нужной величине.

Измерение мощности высокочувствительным астатическим электродинамическим ваттметром может производиться в интервале частот 0—6 кГц при любых значениях $\cos \varphi$, больших 0,2. При частотах до 1 кГц, а на так называемом «высокочастотном пределе» — до 2,5 кГц не требуется принимать в процессе измерения каких-либо специальных мер для уменьшения погрешностей. При более высоких частотах отсчет показаний ваттметра

должен проводиться вблизи «электрического нуля» шкалы, погрешность от влияния емкостных токов должна быть исключена.

Если измерение мощности ведется при реактивном характере нагрузки (например, измерение потерь в магнитных материалах), относительная суммарная дополнительная (частотная) погрешность не превышает $\pm 0,5\%$ при частотах до 2,5 кГц и $\pm 1\%$ при частотах до 5 кГц.

Если при измерениях используется «высокочастотный предел», эта погрешность может быть уменьшена почти в 2 раза. В табл. 2 даны приведенные относительные значения важнейших погрешностей ваттметра в процентах.

Таблица 2

Погрешности	При частоте, кГц	
	3000	4000
Градирочная	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$
Вариация показаний	$\pm 0,0$	$\pm 0,0$
Смещение нулевого положения	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$
При изменении температуры на $\pm 10^\circ\text{C}$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$
От неуравновешенности подвижной части	Установка только по уровню	
Погрешность отсчета	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$
От влияния внешних магнитных полей	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$
От взаимной индуктивности катушек: ¹		
а) у концов шкалы	$\pm 0,3$	$\pm 1,5$
б) у середины шкалы	$\pm 0,0$	$\pm 0,0$
Вследствие влияния емкостных токов: ¹		
а) при соединении генераторных зажимов	$\pm 0,3$	$\pm 1,0$
б) при измерениях потерь на образцах с двумя обмотками	$\pm 0,3$	$\pm 1,0$
в) после исключения предлагаемым способом в случаях а) и б)	$\pm 0,0$	$\pm 0,1$
Вследствие сдвига фаз между напряжением и током в параллельной цепи при $\cos \varphi = 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,3$

¹ Значения погрешностей для «высокочастотного предела».

ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕРЬ НА ГИСТЕРЕЗИС И ВИХРЕВЫЕ ТОКИ ВАТТМЕТРОВЫМ МЕТОДОМ ПРИ ЧАСТОТАХ ДО 4000 Гц

При определении потерь должны быть с достаточно высокой точностью измерены действующее и среднее значения напряжения на зажимах вторичной обмотки образца. Для измерения действующего значения напряжения применялись электростатический и термоэлектрический вольтметры, а в случаях, когда требовалась повышенная точность — методы термоэлектрического и электростатического компарирования.

Измерение среднего значения напряжения осуществлялось с помощью диодных вольтметров, погрешности которых были специально изучены.

Принципиальная схема ваттметровой установки (рис. 12) остается почти такой же, как и при измерении на промышленной частоте. Питание осуществляется от звукового генератора через усилитель У-50 или, если испытуемые образцы велики, через усилительный комплект У-300-М. Генератор и усилитель получают питание от сети переменного тока через стабилизатор.

Частота устанавливается по образцовому пьезокварцевому генератору с помощью фигур вращения. Для проверки стабильности показаний некоторых приборов измерительная часть установки с помощью переключателя Π_1 через автотрансформатор подключается иногда к сети переменного тока. С помощью переключателя Π_2 осциллограф включается или на контроль частоты или на контроль формы кривой. Для уменьшения влияния емкостных токов при измерении осциллограф должен быть отключен от измерительной обмотки образца.

Регулировка тока в первичной цепи производится с помощью регуляторов выхода звукового генератора и усилителя, а также низкоомного реостата.

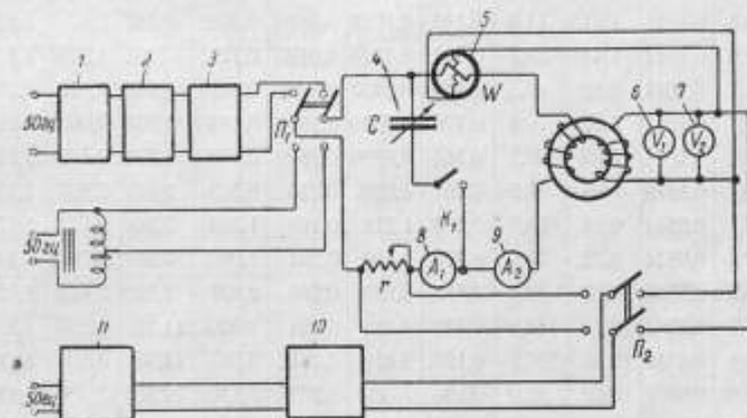


Рис. 12. Принципиальная схема установки для измерения потерь при звуковых частотах:

1—стабилизатор напряжения; 2—звуковой генератор; 3—усилитель типа У-50 или У-300-М; 4—магнитоэлектрический вольтметр типа МЭ-2 завода «Эталон»; 5—электродинамический ваттметр из пределы 1–30 75 в и 1,25–2,5 а; 6—электростатический вольтметр; 7—магнитоэлектрический вольтметр с двойным выпрямителем на 10–50–100 в; 8—электромагнитный амперметр; 9—термоэлектрический амперметр; 10—электронный осциллограф; 11—образцовый пьезокварцевый генератор.

При измерении потерь в интервале частот от 50 до 4000 гц их величина изменяется в несколько сот раз, поэтому приходится несколько раз изменять числа витков намагничивающей и измерительной обмоток. Для того чтобы при вычислении э. д. с. и потерь в образце можно было не учитывать влияния сопротивления измерительной обмотки, измерительные приборы имели большие сопротивления цепей. Так, например, на обычно используемых пределах измерения $r_{ш} = 35100 \text{ ом}$, $r_{с1} = \infty$, $r_{с2} = 210000 \text{ ом}$, в то время как сопротивление измерительной обмотки составляет 0,5–10 ом.

Измерения потерь на ваттметровой установке производились как на кольцевых образцах, так и на «квадрате», составленном из пакетов. На рис. 13 приводятся результаты измерения потерь для трех резко отличающихся друг от друга образцов.

Образец 1 изготовлен из ленты трансформаторной стали толщиной 0,5 мм. Масса образца 790 г. Измерения при $B_{\max} = 0,2 \text{ вб/м}^2$.

Образец 2 — тор массой 192,9 г изготовлен из ферромагнитного диэлектрика (плотность 6,68 г/см³, $\mu_r = 57$ при $B_{\max} = 0,1 \text{ вб/м}^2$, химический состав не определялся). Измерения при $B_{\max} = 0,1 \text{ вб/м}^2$.

Образец 3 — тор массой 350,3 г, внешний диаметр — 60 мм, внутренний диаметр — 40 мм, изготовлен из трансформаторной стали ВЧ-1, толщина листа 0,1 мм. Площадь поперечного сечения образца 2,955 см². Пластины изолированы друг от друга папиросной бумагой. Измерения при $B_{\max} = 0,2 \text{ вб/м}^2$.

Ваттметровая установка предназначена главным образом для измерения потерь в образцах высокочастотных сортов трансформаторной стали. Поэтому наибольший интерес представляют результаты измерения потерь на образце 3, приведенные в табл. 3 для $B_{\max} = 0,2 \text{ вб/м}^2$.

Таблица 3

$f, \text{гц}$	w_2	$E_{\text{ср}}, \text{в}$	$\frac{w_1}{w_2}$	$P, \text{вт}$	$U_2, \text{в}$	$I, \text{а}$	$\frac{w_1}{w_2} P, \text{вт}$	$\frac{U_2^2}{r_2^2}, \text{вт}$	$P_{\text{ср}}, \text{вт}$	$\frac{P_{\text{ср}}}{M}, \text{вт/кг}$	$\frac{P_{\text{ср}}}{Mf}, \frac{\text{вт-сек}}{\text{кг}}$	k_f	$\frac{P_{\text{ср}}}{Mf}, \frac{\text{вт-сек}}{\text{кг}}$
50	435	5,15	0,1011	0,390	5,8	0,146	0,0394	0,0111	0,0283	0,081	1,62	1,125	1,62
100	435	10,3	0,1011	1,015	11,5	0,148	0,1026	0,0440	0,0586	0,167	1,67	1,117	1,67
200	435	20,6	0,1011	1,41	24,2	0,151	0,1425	0,0195	0,123	0,351	1,755	1,117	1,75
400	435	41,1	0,1011	3,40	47,5	0,153	0,3437	0,0750	0,269	0,767	1,918	1,115	1,91
600	435	61,7	0,1011	5,87	69,4	0,158	0,5939	0,1601	0,434	1,238	2,063	1,125	2,05
800	435	82,4	0,1011	8,80	92,1	0,164	0,8896	0,2820	0,608	1,735	2,169	1,117	2,16
1000	299	70,7	0,1472	6,95	80,5	0,161	1,023	0,215	0,808	2,307	2,307	1,138	2,28
1500	175	62,1	0,2514	6,04	70,7	0,163	1,518	0,166	1,352	3,860	2,573	1,138	2,53
2000	175	82,8	0,2514	8,95	93,6	0,170	2,250	0,291	1,960	5,60	2,798	1,140	2,75
2500	124	73,2	0,3548	8,07	82,4	0,173	2,863	0,286	2,637	7,53	3,012	1,125	2,98
3333	124	97,7	0,3548	12,15	108,5	0,182	4,311	0,391	3,920	11,19	3,357	1,108	3,36
4000	102	96,4	0,4314	12,56	107,1	0,190	5,418	0,381	5,037	14,38	3,595	1,110	3,60
5000	66	78,0	0,6667	10,62	86,9	0,198	7,080	0,251	6,830	19,50	3,900	1,114	3,90

* Исправление для $k_f = 1,11$.

На рис. 14 показана зависимость полных потерь за один период от частоты при синусоидальном изменении магнитной индукции в образце 3 (кривая *a*).

Проанализируем результаты и основные особенности этих измерений. Поскольку масса и сечение образца сравнительно невелики, то при высоких частотах даже при большом числе витков измерительной обмотки показания ваттметра и вольтметров малы. Если показания приборов увеличить за счет перехода на меньшие пределы измерения, то значительно возрастает собственное потребление приборов, которое в некоторых неблагоприятных случаях доходит до 40% измеряемой мощности. Последнее обстоятельство приводит к необходимости точного измерения мощности $\frac{U_2^2}{r_2^2}$,

но выполнить это требование трудно, поскольку отсутствуют вольтметры с малым собственным потреблением мощности для измерения небольших действующих значений напряжения. При низких частотах форма кривой напряжения на выходе усилителя весьма искажена, и расчет члена $\frac{U_2^2}{r_2^2}$

не удается вести по показанию вольтметра с выпрямителем.

Описанные трудности приводят к понижению точности измерения потерь. В наших опытах при частотах 50, 100 и 200 гц максимальная погрешность измерения доходила до $\pm 6\%$.

Невозможно вести измерения потерь в разных участках избранного нами интервала частот одинаково хорошо, используя один и тот же образец. Для измерения потерь при частоте до 400 гц желательно массу образца увеличить в несколько раз, а ваттметровую установку питать не от лампового, а от машинного генератора. Для такого рода испытаний можно считать приемлемой магнитную цепь типа «малый квадрат», составленную из пакетов массой по 0,25 кг каждый.

Вторая важная особенность измерения — преобладание в общих потерях потерь на вихревые токи. В некоторых случаях потери на вихревые токи могут в несколько раз превышать потери на гистерезис. В этих условиях погрешность определения коэффициента формы кривой напряжения и погрешность разделения потерь могут стать решающими погрешностями ваттметрового метода. Погрешности измерения коэффициента формы кривой напряжения определяются погрешностями измерения среднего и действующего значений напряжения. Первая погрешность, как показали исследования, может быть сделана меньше $\pm 0,7\%$, вторая может достигать $\pm 1,5\%$.

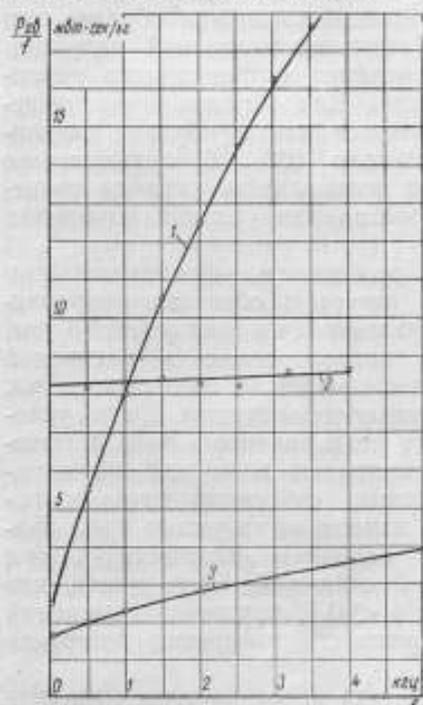


Рис. 13. Зависимость потерь за один период от частоты для различных образцов.

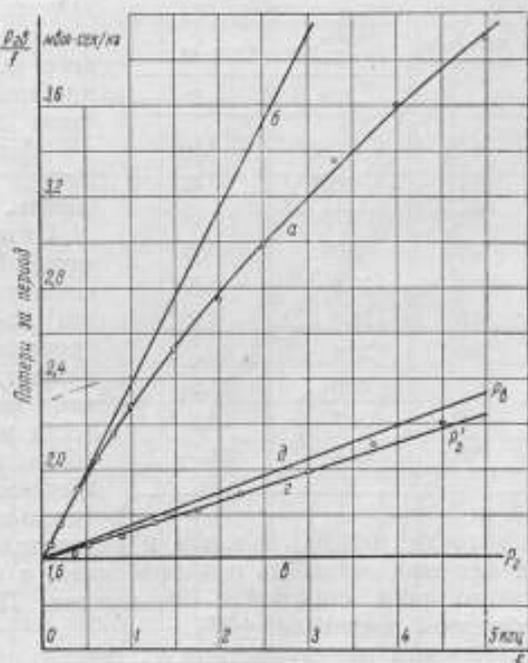


Рис. 14. Зависимость потерь за один период от частоты в 1 кг массы образца 3.

С целью уменьшения искажений формы волны напряжения параллельно участку цепи, составленному последовательной обмоткой ваттметра и намагничивающей обмоткой образца, включается магазин емкости C (рис. 12). Перед каждым измерением потерь величина емкости регулируется до достижения резонанса токов. При этом форма кривой вторичного напряжения приближается к синусоидальной. Эта операция уменьшает полное сопротивление установки, что позволяет использовать ее до более высоких частот.

Третья особенность измерения — нелинейная зависимость полных потерь за период от частоты, что затрудняет разделение потерь на составляющие. Так, если разделение потерь на гистерезис и вихревые токи произвести по результатам измерения полных потерь при низких частотах, то линейной экстраполяцией в область повышенных частот можно получить чрезмерно большие значения полных потерь (кривая $б$, рис. 14). Потери на гистерезис могут быть получены двумя путями — продолжением до пересечения с осью ординат экспериментальной кривой $а$ или касательных к ней при различных значениях частоты. Ординаты полученных таким образом кривых $в$ и $г$ могут быть приняты за потери на гистерезис.

Если провести измерение потерь при несинусоидальном изменении магнитной индукции, а затем ввести поправку обычным путем, то лучшее совпа-

дение полученного значения потерь с результатом измерения потерь при синусоидальном изменении магнитной индукции получается в случае, когда за потери на вихревые токи принимается разность ординат кривых *a* и *в*. На рисунке для сравнения приведены результаты теоретического расчета потерь на вихревые токи за период, равные разности ординат кривых *д* и *в*.

Четвертая особенность — резкое возрастание полных потерь с частотой, что приводит к нагреванию образца и неустойчивости величины потерь. В таких случаях измерения ведутся или сразу же после включения намагни-

Таблица 4

Магнитная индукция об./м^2	Потери за один период $\frac{0,5\text{ж}}{\text{сек}}$ при частоте, гц	
	2000	50
0,05	0,152	0,10
0,1	0,668	0,42
0,2	2,76	1,60
0,3	5,89	3,15
0,4	10,1	5,10
0,5	14,9	7,60
0,6	20,6	10,7
0,7	27,0	14,5
0,8	34,7	19,3
0,9	43,2	24,5

чивающего тока на холодном образце или после длительной выдержки образца при заданном значении магнитной индукции после достижения стационарного теплового режима. Для образца 1 расхождение полученных таким образом результатов достигало 10%. В свидетельстве на образец должны быть указаны температура образца или условия измерения потерь.

Пятая особенность проявляется при измерении потерь в образцах ферромагнитного диэлектрика и заключается в том, что из-за низкого значения магнитной проницаемости вещества очень велик ток в намагничивающей катушке. В этих условиях могут стать значительными погрешности ваттметра от взаимной индуктивности катушек, емкостных токов и погрешность измерения индукции из-за значительной величины плотности потока

в воздухе между образцом и измерительной обмоткой. Если учесть, что измеряемая мощность при этом мала, а $\cos \varphi < 0,1$, трудности измерений такого рода становятся очевидными. Погрешности измерения потерь на образце 2 достигали $\pm 5\%$.

Важным преимуществом ваттметрового метода перед другими методами измерения потерь является возможность проведения измерений в широкой области магнитных индукций. Это положение справедливо и при повышенных частотах, если измерительные приборы правильно учитывают влияние высших гармоник.

Мы ограничили область используемых частот 4 кгц , исходя из тех соображений, что при более высоких частотах третья гармоника, если она достигает 30%, может вызвать дополнительную погрешность, сравнимую по величине с погрешностью измерения потерь на основной частоте при синусоидальном характере изменения тока и магнитного потока.

Экспериментальная проверка влияния высших гармоник тока и э. д. с. при измерении потерь в широком диапазоне магнитных индукций была произведена на образце 3 при частоте 2000 гц . Результаты измерений были пересчитаны на случай синусоидального изменения магнитной индукции, причем для разделения потерь и для сопоставления кривых зависимости потерь от индукции при низких и повышенных частотах измерения потерь производились еще и при 50 гц . Результаты этих измерений помещены в табл. 4.

Кривые, построенные по данным этой таблицы, описываются уравнениями:

$$\frac{P_{\text{гв}}}{f} = 52,0 \cdot B_{\text{max}}^{1,91} \frac{\text{мдж}}{\text{кг}} \text{ при } f = 2000 \text{ гц}$$

и

$$\frac{P_{\text{гв}}}{f} = 27,3 \cdot B_{\text{max}}^{1,81} \frac{\text{мдж}}{\text{кг}} \text{ при } f = 50 \text{ гц.}$$

Столь хорошее сходство этих кривых (в логарифмических координатах это параллельные прямые) является достаточно убедительным подтверждением того, что и при повышенных частотах влияние высших гармоник в токе и магнитном потоке на результаты измерения потерь ваттметровым методом так же мало, как и на промышленной частоте.

Для оценки случайных погрешностей измерения потерь ваттметровым методом в широкой области индукций были проведены многочисленные измерения на образце 3 (высокочастотная сталь толщиной 0,1 мм). Результаты измерений при частоте 1000 гц представлены на рис. 15. Измерения проводились через каждые 0,01—0,02 вб/м² в интервале 0,02—0,8 вб/м² при синусоидальной форме кривой вторичного напряжения. В интервале индукций от 0,8 до 1 вб/м² форма волны э. д. с. была искажена, и результаты измерений потерь исправлялись обычным способом.

Для получения наглядных кривых, на которых легко можно было бы оценить случайные погрешности измерения, выявить промахи и проследить характер изменения потерь с изменением индукции, была использована зависимость вида:

$$\sqrt{\frac{P_{2\theta}}{f}} = F(B_{\max}).$$

Поскольку закон изменения полных потерь с изменением индукции близок к квадратичному, выражение этого вида в ограниченных областях индукции представляет собой уравнение прямой. Поэтому выпадение отдельных результатов измерения на графике легко обнаруживается.

В области индукций 0,1—1 вб/м² наибольшие отклонения точек от кривой не превышают ±0,7%.

Следовательно, для кривой, описываемой уравнением $\frac{P_{2\theta}}{f} = F_1(B_{\max})$, они не превысят ±1,4%. Для подавляющего большинства результатов измерения погрешности, найденные таким образом, не превышают ±0,5%.

На этом же образце при частотах 400—4000 гц и индукциях 0,1—1 вб/м² измерялись потери резонансным и резонансно-ваттметровым методом. Расхождение результатов измерения потерь тремя методами не превышает ±3%. Найденные экспериментально величины случайных погрешностей не превышают величин погрешностей, определенных аналитически [3].

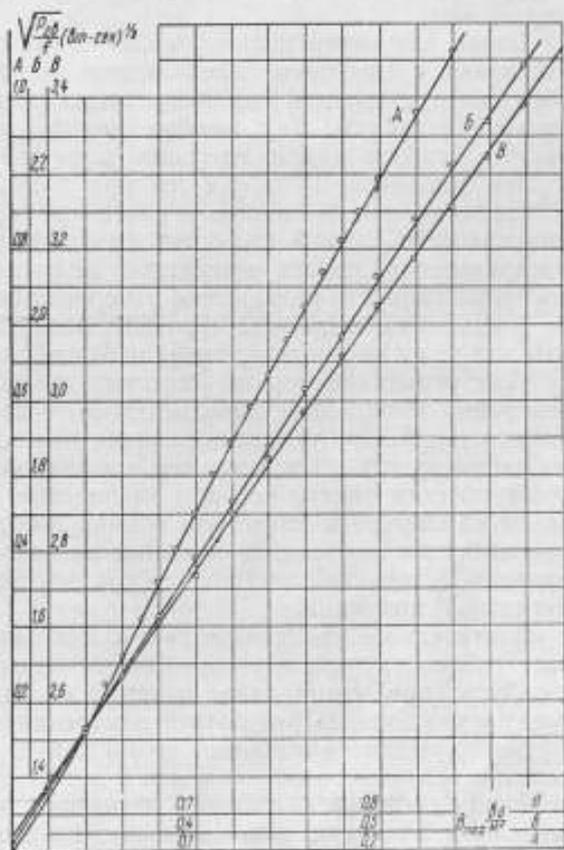


Рис. 15. Зависимость $\left(\frac{P_{2\theta}}{f}\right)^{1/2}$ от величины магнитной индукции.

ПРИМЕНЕНИЕ ВАТТМЕТРОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОВЕРКИ НОРМАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ СТАЛЕЙ

Электротехническая сталь, предназначенная для работы при повышенных частотах, выпускается в больших количествах и в широком ассортименте. Для контроля магнитных свойств такой стали нужна установка, позволяющая быстро, с достаточной точностью и при сравнительно небольшой затрате материала производить измерения в широком интервале частот и магнитных индукций.

Более или менее полно удовлетворяет этим требованиям ваттметровая установка с прибором, предназначенным для испытания килограммовых образцов, составленных из четырех пакетов длиной 250 мм и шириной 30 мм («малый квадрат»). Этот прибор, широко применяемый при промышленной частоте, удобен и для массовых испытаний листовых трансформаторных сталей толщиной 0,1 и 0,2 мм при повышенных частотах.

Наличие стыков пакетов и рассеяние магнитного потока из-за несовершенства этих стыков являются причиной неравномерного и непостоянного распределения потока магнитной индукции в образце. Для улучшения воспроизводимости результатов измерения потерь пакеты в стыках зажимают до достижения минимума намагничивающего тока или минимума потерь. Эти два условия противоречивы и одновременно не могут быть выполнены.

При испытании тонких листовых сталей разница между результатами измерения потерь при выполнении этих двух условий получается весьма значительной. При усилении зажатия пакетов в стыках резко увеличивается неравномерность распределения магнитного потока по сечению образца, особенно если пакеты собраны из пластин, заметно отличающихся друг от друга по ширине и длине, что обычно имеет место в образцах из стали толщиной 0,1 мм и влечет за собой плохое качество стыка. Это приводит к увеличению потерь при постоянстве средней величины амплитудного значения магнитной индукции.

Значительное увеличение воздушных зазоров в стыках пакетов усиливает неравномерность распределения магнитного потока по длине образца (особенно при малой длине пакетов) и, как и в предыдущем случае, приводит к увеличению результата измерения потерь.

Минимум потерь в образце соответствует наиболее равномерному распределению магнитного потока в нем и может служить в качестве критерия достижения постоянства условий измерения потерь, вероятно более правильного, чем минимум намагничивающего тока.

Для проверки этого предположения и для оценки возможных погрешностей измерения потерь на образце в 1 кг высокочастотной трансформаторной стали толщиной 0,1 мм проведены две серии измерений, в первой из которых всегда достигался минимум намагничивающего тока (табл. 5), а во второй — минимум потерь (табл. 6) при постоянстве амплитудного значения магнитной индукции ($B_{\max} = 0,25 \text{ вб/м}^2$).

Измерения проводились в следующем порядке. Пакеты помещали в катушки прибора, угловыми зажимами зажимали до достижения минимума тока и измеряли потери. Затем зажимы ослабляли, в образовавшиеся зазоры между пакетами вкладывали по 1—2 листа писчей бумаги, слабым зажатием достигали минимума потерь и вновь измеряли потери. Перед следующим измерением пакеты вынимали и вновь укладывали в ином порядке. В некоторых случаях для оценки постоянства показаний измерительных приборов и висимых ими погрешностей измерения повторяли при неизменном положении образца (в таблицах колонки обозначены номером с буквой «а»). Некоторые измерения проводились после изоляции пластин папиросной бумагой. Два измерения (с промежутком времени в 3 суток) проведены при шихтовке образцов встык-нахлестку по одной пластине (без изоляции пластин).

Таблица 5

Частота, гц	Потери на гистерезис и вихревые токи за период, мвт-сек/кг											
	Номера измерений											
	1	2	2а ¹	3	4	5	6	7	8	8а ¹	9	10
	Без изоляционных прокладок между пластинами пакетов (соединение пакетов встык)										С изоляцией пластин папированной бумагой (соединение пакетов встык)	
400	2,17	2,12	2,12	2,15	2,16	2,18	2,20	2,19	2,19	2,21	2,11	2,13
600	2,32	2,32	2,32	2,36	2,37	2,38	2,41	2,37	2,40	2,42	2,30	2,31
800	2,53	2,52	2,53	2,57	2,57	2,57	2,59	2,58	2,61	2,61	2,47	2,49
1000	2,66	2,67	2,67	2,72	2,74	2,74	2,75	2,74	2,77	2,77	2,61	2,63
1200	2,86	2,88	2,88	2,93	2,95	2,95	2,94	2,95	2,99	2,98	2,78	2,82
1400	3,03	3,07	3,10	3,13	3,16	3,14	3,15	3,15	3,19	3,20	2,96	2,99
1600	3,20	3,24	3,27	3,30	3,34	3,30	3,33	3,32	3,37	3,37	3,11	3,17
1800	3,35	3,39	3,41	3,46	3,51	3,44	3,48	3,46	3,53	3,54	3,25	3,29
2000	3,47	3,52	3,53	3,61	3,64	3,60	3,62	3,59	3,66	3,68	3,37	3,41
2200	3,65	3,70	3,71	3,78	3,83	3,79	3,79	3,76	3,84	3,86	3,53	3,56
2400	3,80	3,86	3,86	3,95	4,00	3,95	3,95	3,94	4,01	4,03	3,68	3,70

¹ Повторные измерения.

Таблица 6

Частота, гц	Потери на гистерезис и вихревые токи за период, мвт-сек/кг													
	Номера измерений													
	1	2	3	4	5	5а ¹	6	7	8	9	10	11	12	13
	Без изоляционных прокладок между пластинами пакетов (соединение пакетов встык)										С изоляцией пластин папированной бумагой (соединение пакетов встык)		Без изоляции и при соединении встык-нахлестку	
400	1,99	2,03	1,97	1,97	2,09	1,97	1,99	1,98	1,98	1,98	1,94	1,94	2,06	2,02
600	2,15	2,16	2,17	2,15	2,17	2,18	2,19	2,14	2,19	2,18	2,10	2,12	2,24	2,16
800	2,32	2,34	2,34	2,33	2,34	2,35	2,36	2,37	2,35	2,35	2,27	2,32	2,47	2,38
1000	2,47	2,48	2,49	2,48	2,50	2,50	2,52	2,50	2,51	2,52	2,39	2,42	2,54	2,50
1200	2,65	2,66	2,67	2,67	2,64	2,64	2,69	2,69	2,65	2,68	2,57	2,60	2,73	2,67
1400	2,86	2,85	2,87	2,85	2,88	2,88	2,90	2,88	2,89	2,89	2,74	2,77	2,92	2,85
1600	3,02	3,00	3,02	3,01	3,04	3,04	3,06	3,03	3,04	3,05	2,88	2,92	3,09	3,01
1800	3,14	3,15	3,16	3,14	3,19	3,18	3,17	3,19	3,19	3,16	3,00	3,05	3,20	3,12
2000	3,26	3,26	3,27	3,27	3,29	3,29	3,28	3,27	3,29	3,27	3,12	3,16	3,32	3,23
2200	3,42	3,42	3,43	3,43	3,47	3,46	3,45	3,45	3,47	3,44	3,28	3,31	3,42	3,34
2400	3,56	3,56	3,58	3,58	3,60	3,60	3,59	3,60	3,60	3,58	3,41	3,45	3,65	3,56

¹ Повторные измерения.

Анализ результатов измерения потерь при $B_{\max} = 0,25$ вб/м², приведенных в таблицах и на рис. 16, позволяет сделать следующие заключения.

Роль изоляции пластин в пакетах при повышенных частотах значительно больше, чем при промышленной частоте, и поэтому в свидетельстве на нормальный образец необходимо указывать на наличие или отсутствие изоляции

пластин. Изоляция пластин уменьшает разброс результатов измерений в серии опытов незначительно, и с этой точки зрения возможно изготовление проб для контроля качества стали и даже нормальных образцов без изоляции пластин до частоты 1000 гц.

Достижение минимума намагничивающего тока является недостаточным условием при испытании образцов. Расхождение результатов в серии измерений при минимальном токе достигает 6% при частотах до 2400 гц. Лучшим способом обеспечения постоянства условий измерения является зажатие пак-

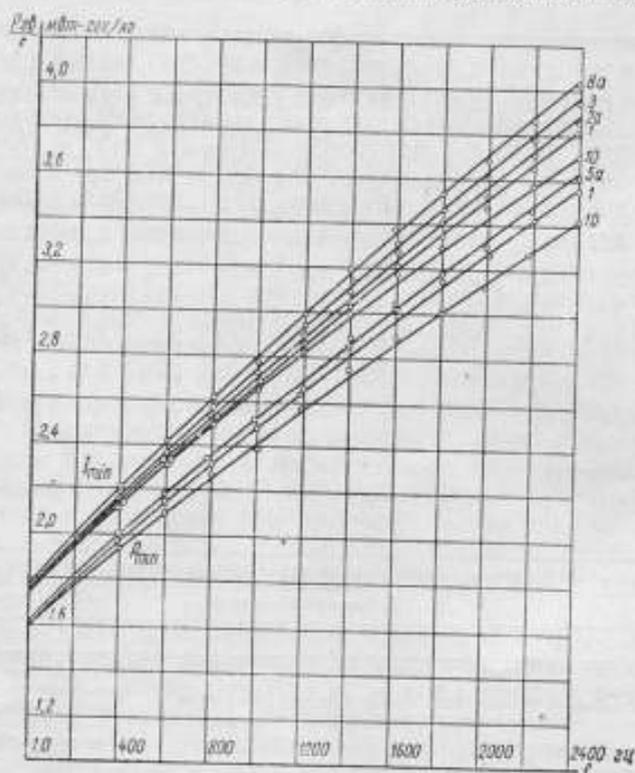


Рис. 16. Зависимость потерь за период от частоты образца высокочастотной трансформаторной стали толщиной 0,1 мм. Из серии опытов при I_{\min} (табл. 5) кривые: 1, 2а, 3, 8а и 10; из серии опытов при P_{\min} кривые: 1, 5а и 10.

тов в стыках до достижения минимума потерь в образце. Расхождение результатов в серии измерений в этом случае не превышает 2%.

Сборка образца встык-нахлестку по одной полоске приводит к таким же результатам, как и зажатие пакетов в стыках до достижения минимума потерь. Измерение потерь сразу же после сборки образца показывает некоторое их увеличение. Через несколько суток после сборки потери уменьшаются (в нашем случае в среднем на 2,5—3%). Причиной увеличения потерь после сборки образца является, вероятно, нарушение пленки окисла при вдвигании (часто со значительным усилием) пластин в катушки.

Расхождение результатов отдельных измерений, проведенных при неизменных положении пакетов и состоянии стыков, не превышает, как правило, $\pm 1\%$.

В области частот 1000—2000 гц измерения потерь на образце в виде квадрата следует дополнить измерениями на кольцевом образце, чтобы избежать больших ошибок, которые могут быть внесены плохим магнитным контактом в стыках. В настоящее время, пока эти явления и их влияние на погрешности

измерения потерь недостаточно изучены, поверка заводских ваттметровых установок должна проводиться (помимо поэлементной поверки) по нормальным образцам двух типов:

а) по образцам, подобным испытываемым пробам, что обеспечивает сохранение одинаковых условий поверки и измерений;

б) по образцам кольцевой формы с изоляцией пластин, с таким числом витков обмоток и массой, чтобы показания всех приборов при поверке установки были, по возможности, близкими к показаниям их при текущих измерениях потерь.

ВЫВОДЫ

1. Электродинамический ваттметр может быть применен для измерения потерь в электротехнических сталях в широкой области магнитных индукций при частотах до 4000 гц.

2. Погрешность от взаимной индуктивности катушек ваттметра может быть сделана ничтожно малой, если сопротивление параллельной цепи ваттметра велико, а катушки в момент измерения находятся в положении, близком к взаимноперпендикулярному.

3. Самым серьезным препятствием для расширения области частот, при которых может применяться электродинамический ваттметр, являются различные емкостные влияния в ваттметре. Вызванные этими влияниями непостоянные по величине и знаку погрешности могут достигать нескольких процентов от измеряемой величины.

4. Предложен способ уменьшения этих погрешностей, дающий возможность сделать их меньшими $\pm 0,5\%$ при частотах до 10 кГц.

5. Наиболее действенным средством уменьшения двух указанных погрешностей является уменьшение тока в последовательной цепи ваттметра. Использование этого приема позволяет применять ваттметр при частотах до 10 кГц для измерения мощности в случае активной нагрузки с частотной погрешностью, не превышающей $\pm 0,5\%$.

6. Примененная в работе методика экспериментального определения и исключения фазовой погрешности ваттметра позволила сделать эту погрешность меньше $\pm 0,5\%$ при частотах до 5000 гц и коэффициенте мощности от 1 до 0,1 как при индуктивном, так и при емкостном характере нагрузки.

7. При правильном выборе массы образца и числа витков обмоток погрешности измерения потерь при магнитной индукции 0,1—1 вб/м² и частотах до 4000 гц не превышают $\pm 3\%$.

8. При измерении потерь в магнитных цепях со стыками возможны расхождения до нескольких процентов в результатах разных серий измерений вследствие непостоянства и неравномерности распределения магнитной индукции в образце.

Измерения потерь на образцах, составленных из отдельных пакетов, можно рекомендовать при частотах до 1000 гц, причем лучшим средством повышения воспроизводимости результатов следует считать зажатие образца в стыках до достижения минимума потерь, а не намагничивающего тока.

9. Описанная в работе ваттметровая установка нашла применение при поверке нормальных образцов высокочастотных сортов электротехнических сталей и при контроле качества продукции заводов, изготавливающих эти стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кейнат Г., Электронизмерительная техника, ОНТИ, 1937.
2. Astbury N. F., Journal of the Institution of Electrical Engineers, 47, P. II, 1950, p. 288.
3. Шрамков Е. Г., Труды ВНИИМ, вып. 1 (56), 1947.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
Е. Г. Шрамков и Е. Т. Чернышев. Передача значений магнитных единиц от эталона рабочим мерам	5
Е. Г. Шрамков и Е. А. Соколова. Образцовая установка для сличения мер магнитного потока, напряженности магнитного поля и измерительных катушек	18
А. С. Румянцев. Индукционные методы измерения напряженности сильных постоянных магнитных полей	23
Е. Т. Чернышев. Выбор магнитных характеристик при намагничивании ферромагнитных материалов в переменных магнитных полях	36
Е. Т. Чернышев и Е. Н. Чечурина. О выборе магнитных характеристик ферромагнитных материалов при одновременном намагничивании постоянным и переменным магнитными полями	51
Н. Г. Чернышева. Искажение кривых магнитной индукции в э. д. с.	58
Е. Т. Чернышев и Н. Г. Чернышева. Исследование методики магнитных измерений в области звуковых частот	83
Е. Н. Чечурина. Методика определения магнитных характеристик ферромагнитных материалов при одновременном намагничивании постоянным и переменным полями	109
А. И. Бузанова, А. З. Векслер и Н. М. Рудный. Исследование ваттметрового метода измерения потерь при одновременном намагничивании электро-технической стали постоянным и переменным полями	127
Г. К. Ягола и Н. М. Рудный. Высокочувствительный ваттметр для измерения потерь в листовых магнитных материалах	139
Н. М. Рудный. Ваттметровый метод измерения потерь на гистерезис и вихревые токи при повышенных частотах	150

ТРУДЫ ВНИИМ

Магнитные измерения и исследования

Технический редактор Л. В. Соколова

Корректор С. Г. Шистер

Подписано к печати 23/IV 1956 г.

М-27440

Формат бумаги 70×108^{1/16}

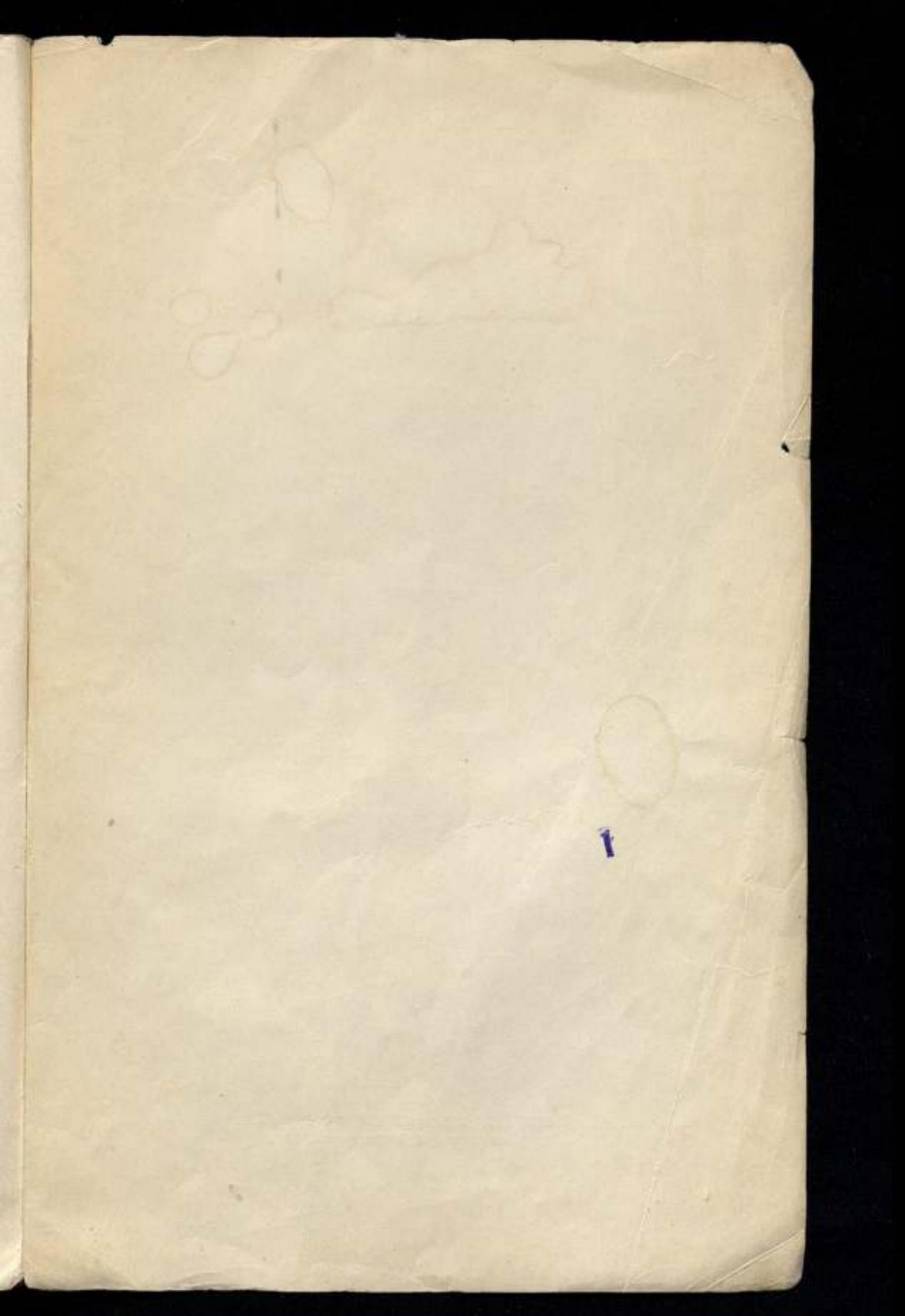
Печ. листов 14,73.

Уч.-изд. листов 14,4.

Тираж 1000 экз.

Заказ 189

1-я типография Машкила, Ленинград, ул. Моисеенко, 10.



7 р. 20 к.



ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ МАШГИЗА
Ленинград, ул. Дзержинского, 10