

12635-67

СССР  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

ГОСТ 12635—67

**МАТЕРИАЛЫ МАГНИТНОМЯГКИЕ  
ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ**

**МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ  
от 10 кГц до 1 МГц**

*Издание официальное*

МОСКВА



<b>СССР</b> Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР	<b>ГОСУДАРСТВЕННЫЙ          СТАНДАРТ</b>	<b>ГОСТ          12635—67</b>
	<b>МАТЕРИАЛЫ МАГНИТНОМЯГКИЕ          ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ</b>	<b>689</b>
	Методы испытаний в диапазоне частот от 10 кГц до 1 МГц High frequency magnet malleable materials. Testing methods at the range from 10 kc/s to 1 mc	Группа Д95

Настоящий стандарт распространяется на высокочастотные магнитномягкие материалы — магнитодиэлектрики (на основе карбонильного железа и альсиферов) и ферриты и устанавливает методы определения их магнитных характеристик при намагничивании переменным периодическим магнитным полем в диапазоне частот от 10 кГц до 1 МГц.

Стандарт не устанавливает методов испытаний ферритов с прямоугольной петлей гистерезиса, а также методов испытаний в импульсном режиме.

Устанавливаются следующие методы определений магнитных характеристик:

- мостовой,
- резонансный,
- индукционный,
- метод биений (только для определения температурного коэффициента магнитной проницаемости).

Характеристики каждого метода приведены в таблице, а перечень буквенных обозначений в формулах таблицы — в приложении 1.

Выбор метода определения магнитных характеристик предусматривается в стандартах и технической документации на магнитномягкие материалы.

Все величины при подстановке в формулы настоящего стандарта должны быть выражены в единицах Международной системы по ГОСТ 9867—61.

## 1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

1.1. Отбор и подготовка образцов к испытаниям.

1.1.1. Образцы для испытаний при определении характеристик ферромагнитных материалов должны иметь кольцевую форму. Размеры колец должны соответствовать чувствительности измерительной аппаратуры.

Утвержден Комитетом стандартов,  
 мер и измерительных приборов  
 при Совете Министров СССР  
 16/II 1967 г.



1.1.2. Перед нанесением обмотки на кольца их диаметр и толщина должны быть измерены с погрешностью измерения не более  $\pm 0,1$  мм. При определении удельных потерь образец, кроме того, должен быть взвешен с погрешностью не более  $\pm 0,5\%$ .

1.1.3. По размерам образцов подсчитывают гармонический  $D_r$  и средний  $D_{cp}$  диаметры и площадь поперечного сечения  $S$  по формулам:

$$D_r = \frac{D_H - D_B}{\ln \frac{D_H}{D_B}}, \quad (1)$$

$$D_{cp} = \frac{D_H + D_B}{2}. \quad (2)$$

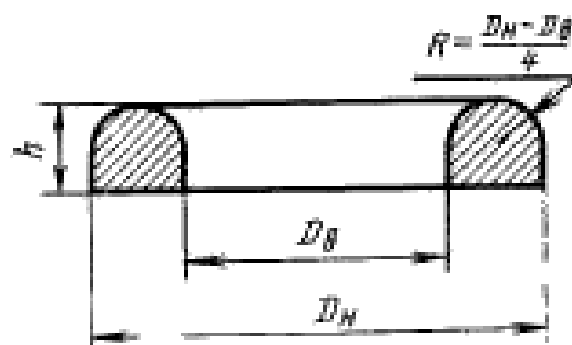
а) для образцов прямоугольного сечения:

$$S = \frac{D_H - D_B}{2} h, \quad (3)$$

б) для образцов с сердечниками из альсиферов, форма которых изображена на черт. 1:

$$S = \frac{\pi}{2} \left( \frac{D_H - D_B}{4} \right)^2 + \frac{D_H - D_B}{2} \left( h - \frac{D_H - D_B}{4} \right). \quad (4)$$

Форма образца с сердечниками из альсиферов



Черт. 1

Материалы магнитномягкие высокочастотные. Методы испытаний в диапазоне частот от 10 кГц до 1 МГц

ГОСТ 12635—67

## Характеристика методов испытаний

Наименование метода	Пределы измерения по		Определяемые величины	Пределы определяемых величин	Погрешности*
	частоте, кГц	напряженности магнитного поля, а/э			
1. Мостовой метод	10—1000	10 <sup>-1</sup> —100	$\mu'(L)$	$\mu' = 10 - 10000$	$\frac{\Delta\mu'}{\mu'} \leq 5\% ; \left(\frac{\Delta L_x}{L_x} \leq 1\%\right)$
			$\operatorname{tg}\delta_p(r_n, L)$	$\operatorname{tg}\delta_p = 10^{-3} - 1$	$\frac{\Delta \operatorname{tg}\delta_p}{\operatorname{tg}\delta_p} \leq 8\% ; \left(\frac{\Delta r_n}{r_n} \leq 5\%\right)$
			$Q_r$	$Q_r \geq 1 \cdot 10^3 - 10^4$	$\frac{\Delta Q}{Q} \leq 20\% ; \left(\frac{\Delta r_x}{r_x} \leq 1\%\right)$
			$Q_n$	$Q_n \sim 1 \cdot 10^{-6} - 10^4$	
			$Q_A$	$Q_A \geq 1 \cdot 10^4$	
			$\rho$	$\rho \sim 10^{-6} - 10^6 \text{ ом/см}$	$\frac{\Delta \rho}{\rho} \leq 10\% ; \left(\frac{\Delta r_n}{r_n} \leq 5\%\right)$
			$\beta_1$	$\beta_1 \geq 0,5 \cdot 10^3 \text{ 1/град}$	$\frac{\Delta \beta_1}{\beta_1} \leq 20\% ; \left(\frac{\Delta L_x}{L_x} \leq 1\%\right)$
$\beta_2$	$\beta_2 \geq 2 \cdot 10^3 \text{ 1/град}$	$\frac{\Delta \beta_2}{\beta_2} \leq 30\% ; \left(\frac{\Delta r_x}{r_x} \leq 1\%\right)$			
2. Резонансный метод	10—1000	Неопределяемы**	$\mu'(L)$	$\mu' = 10 - 10000$	$\frac{\Delta\mu'}{\mu'} \leq 10\% ; \left(\frac{\Delta L}{L} \leq 6\%\right)$
			$\mu' = F(f, H_m, H_{-}, t)$ $\operatorname{tg}\delta_p = F(f, H_m, H_{-}, t)$		

Продолжение

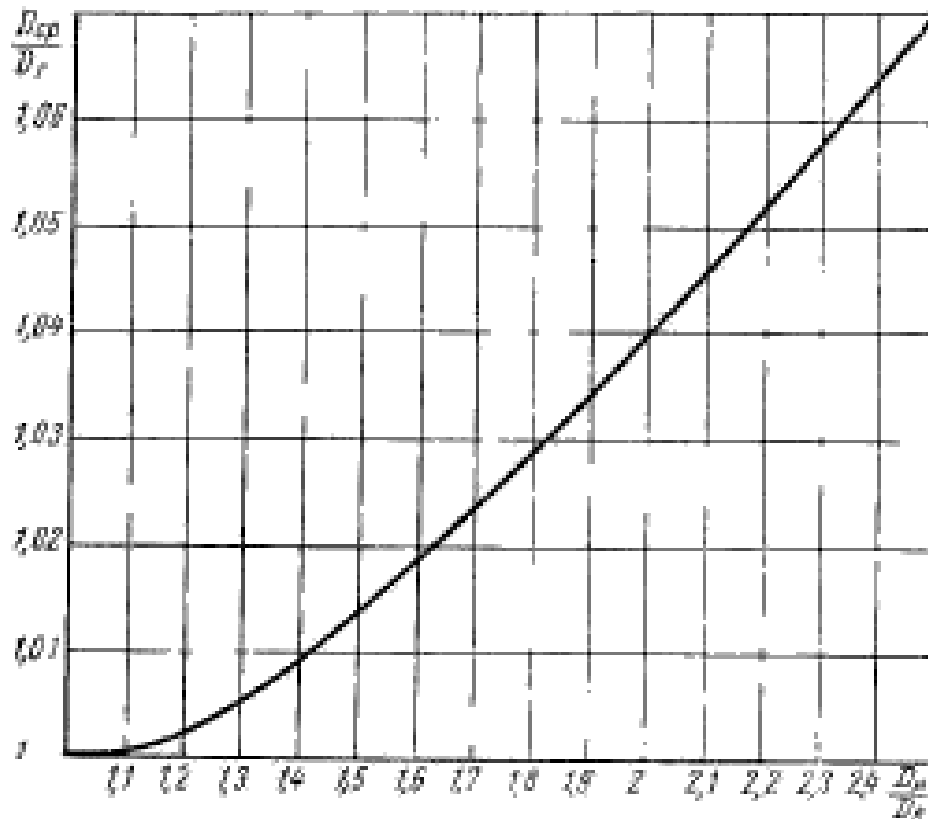
Наименование метода	Пределы измерения по		Определяемые величины	Пределы определяемых величин	Погрешности*
	частоте, кГц	напряженности магнитного поля, В/м			
3. Индукционный метод	10—1000	1—5000	$\lg \delta_p (Q)$ $\beta_1, \beta_2$ $\mu \sim F(f, t)$ $\lg \delta_p = F(f, t)$ $B_{\max}$	$\lg \delta_p = 10^{-3} - 10^{-1}$ $\beta_1 = 5 \cdot 10^{-3} - 1/\text{град}$ $\beta_2 > 1 \cdot 10^{-2} - 1/\text{град}$ $B_{\max} = (10^{-5} - 10^{-1}) \text{ тл}$	$\frac{\Delta \lg \delta_p}{\lg \delta_p} \leq 30\%$ ; $\left( \frac{\Delta Q}{Q} \leq 10\% \right)$ $\frac{\Delta \beta_1}{\beta_1} \leq 20\%$ $\frac{\Delta \beta_2}{\beta_2} \leq 30\%$ $\frac{\Delta B_{\max}}{B_{\max}} \leq 15\%$
			$\mu \sim$ $\rho$ $B_{\max} = F(H_{\max})$ $B_{\max} = F(H_m)$ $B_{\max} = F(H)$ $B_m = F(H_{\max})$ $B_m = F(H_m)$ $B_m = F(H)$ $\beta_1$	$\mu \sim 10 - 10000$ $\rho = (10^{-3} - 10^2) \text{ см/кг}$	$\frac{\Delta \mu}{\mu} \leq 20\%$ $\frac{\Delta \rho}{\rho} \leq 30\%$
4. Метод бисней	100—1000	Неопределенный**		$\beta_1 = (0,02 - 0,5) \cdot 10^{-3} - 1/\text{град}$	$\frac{\Delta \beta_1}{\beta_1} \leq 20\%$

\* При многовитковом намагничивании.

\*\* Зависит от типа измерителя, частота и Z образца.

Подсчет магнитных характеристик производят по гармоническому диаметру  $D_r$ . В зависимости от требуемой точности измерений и радиальной толщины образца, характеризуемой отношением  $\frac{D_n}{D_r}$ , гармонический диаметр  $D_r$  может быть заменен средним  $D_{ср}$ . График зависимости отношения среднего диаметра к гармоническому для разных отношений наружного диаметра к внутреннему приведен на черт. 2.

График зависимости отношения среднего диаметра к гармоническому от отношения диаметров образцов



Черт. 2

Относительную погрешность определения среднего и гармонического диаметров образца подсчитывают по формулам:

$$\frac{\Delta D_{ср}}{D_{ср}} = \frac{2\Delta D}{D_n + D_n} \quad (5)$$

$$\frac{\Delta D_r}{D_r} = \frac{2\Delta D}{D_n - D_n} + \frac{D_n}{D_n} \cdot \frac{2\Delta D}{D_n} \quad (6)$$

1.1.4. Относительную погрешность определения площади поперечного сечения образца подсчитывают по формулам:

а) для образцов прямоугольного сечения:

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{2\Delta D}{D_n - D_v} + \frac{\Delta h}{h}, \quad (7)$$

б) для образцов, форма которых изображена на черт. 1:

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\frac{\pi}{8}(D_n - D_v)\Delta D + \frac{D_n - D_v}{2} \left( \Delta h + \frac{\Delta D}{2} \right) + \Delta D \left( h - \frac{D_n - D_v}{4} \right)}{S}. \quad (8)$$

Если размеры образцов соответствуют размерам, приведенным в ГОСТ 8763—58, то при измерении  $D_n$ ,  $D_v$  и  $h$  с погрешностью, не превышающей 0,1 мм, наибольшая относительная погрешность определения  $D_{cp}$  лежит в пределах от 0,2 до 1%,  $D_r$  — от 1 до 3%, а  $S$  — от 2 до 7%.

1.1.5. Выбор марки провода для обмотки, наматываемой на образец, зависит от вида определяемой характеристики (магнитная проницаемость, угол потерь, температурный коэффициент магнитной проницаемости и т. п.) и типа испытываемого материала. При определении тангенса угла потерь и коэффициентов потерь сердечников из карбонильного железа, альсиферов и ферритов с низкой магнитной проницаемостью, обладающих малыми потерями при частотах свыше 300 кГц, для того чтобы сопротивление обмотки образца незначительно изменялось с изменением частоты, необходимо обмотку выполнять из многожильного провода (литцендрата) марок ЛЭШО 12×0,07 и ЛЭШО 21×0,05. При частотах до 300 кГц обмотку допускается выполнять одножильным медным проводом диаметром не свыше 0,25 мм.

**Примечание.** При многовитковом намагничивании во избежание порчи изоляции обмотки на образец после измерения его геометрических размеров и взвешивания наносят слой изоляционного материала (фторопластовую ленту, конденсаторную бумагу) толщиной около 0,1 мм, а поверх этого слоя — обмотку с нужным числом витков.

1.1.6. Перед испытаниями образец подвергают размагничиванию через обмотку, питаемую током частотой 50 гц с постепенно убывающей амплитудой. Начальная амплитуда размагничивающего поля должна превышать коэрцитивную силу материала не менее чем в 50 раз. Минимальная амплитуда размагничивающего поля не должна превышать наименьшего значения напряженности поля, при которой производят измерения магнитных характеристик.

Время выдержки образцов после размагничивания до начала измерений магнитных характеристик устанавливают в зависимости от вида материала и его магнитной проницаемости. Магнитодиэлектрики на основе карбонильного железа выдержке после размагничивания не подвергают, для альсиферов время выдержки должно быть 10 мин. Для марганец-цинковых ферритов марки ИМ время выдержки должно быть 24 ч, для никель-цинковых ферритов марки ИИ—не менее 3 ч.

В особо ответственных случаях измерений рекомендуется размагничивать ферриты марок: 150ВЧ, 100ВЧ, 50ВЧ2, 30ВЧ2 и 20ВЧ нагревом до температуры выше точки Кюри.

### 1.2. Условия измерений и аппаратура.

1.2.1. Испытания образцов производят при температуре окружающего воздуха  $298 \pm 10^\circ\text{K}$  ( $25 \pm 10^\circ\text{C}$ ), относительной влажности воздуха до 80% и атмосферном давлении  $100000 \pm 4000 \text{ н/м}^2$  ( $750 \pm 30 \text{ мм рт. ст.}$ ).

При определении магнитных характеристик материалов, обладающих температурными коэффициентами  $\beta_1$  и  $\beta_2$  свыше  $1 \cdot 10^{-3} 1/\text{град}$ , необходимо вносить поправки, вычисленные по формулам:

$$\mu'_{25} = \frac{\mu'_t}{1 + \beta_1(t - 25)}, \quad (9)$$

$$\text{tg}\delta'_{25} = \frac{\text{tg}\delta'_t}{1 + \beta_2(t - 25)}, \quad (10)$$

где  $\mu_{25}$  и  $\text{tg}\delta'_{25}$  — характеристики материала, определенные при температуре  $25^\circ\text{C}$ .

1.2.2. Для испытаний магнитномягких материалов в диапазоне частот от 10 кГц до 1 МГц используется следующая измерительная аппаратура:

- а) мосты (приложение 2);
- б) измерители добротности;
- в) амперметры, миллиамперметры и микроамперметры (приложение 3);
- г) вольтметры и милливольтметры (приложение 4).

1.2.3. В качестве измерительной аппаратуры для измерения характеристик магнитномягких материалов мостовым методом допускается использование мостовых установок, изготовленных по любым схемам или собранных из отдельных элементов, но обеспечивающих возможность производить измерения величин, указанных в таблице.



## 2. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

### 2.1. Мостовой метод

2.1.1. При мостовом методе определения перечисленных в таблице характеристик измеряют индуктивность  $L_x$  или взаимную индуктивность  $M_x$  и сопротивление  $r_x$  намагничивающего устройства с кольцевым сердечником из испытываемого ферромагнитного материала и подсчитывают магнитные характеристики по соответствующим формулам.

2.1.2. Для намагничивания применяют многовитковую обмотку. Число витков многовитковой обмотки  $w_1$  выбирают в зависимости от марки испытываемого материала, размеров образца, требуемой напряженности магнитного поля и пределов измерения аппаратуры для определения индуктивности по формуле:

$$w_1 = \sqrt{\frac{L_x D_{cp} \cdot 10^7}{45\mu'}} \quad (11)$$

где  $L_x$  — индуктивность обмотки с образцом.

2.1.3. При испытаниях образцов на мосте взаимной индуктивности на образец должны быть нанесены две обмотки, выполняемые двойным проводом. Подсчет числа двойных витков  $w$  производят по формуле:

$$w = \sqrt{\frac{M_x D_{cp} 10^7}{45\mu'}} \quad (12)$$

где  $M_x$  — взаимная индуктивность между обмотками образца (выбирается в зависимости от пределов аппаратуры для измерения взаимной индуктивности).

2.1.4. При проведении испытаний обмотку или намагничивающее устройство испытываемого образца присоединяют к мосту и уравнивают его с помощью регулируемых элементов при заданных нормативными документами на соответствующий ферромагнитный материал значениях напряженности магнитного поля и частоты. Из уравнений равновесия моста определяют индуктивность или взаимную индуктивность между обмотками образца и сопротивление образца. После введения необходимых поправок подсчитывают магнитную проницаемость и тангенс угла потерь материала образца.

2.1.5. Коэффициент потерь на гистерезис  $g_r$  определяют измерением тангенса угла потерь при двух-трех значениях

напряженности магнитного поля и при одной частоте в области линейной зависимости тангенса угла потерь от напряженности магнитного поля.

2.1.6. Коэффициент частотных потерь (в том числе на вихревые токи)  $q_{\omega}$  определяют измерением тангенса угла потерь при двух-трех частотах и при одном и том же значении напряженности магнитного поля в области линейной зависимости тангенса угла потерь от частоты.

Рекомендуется для образцов из карбонильного железа проводить испытания в диапазоне частот от 100 кГц до 1 МГц; для образцов из альсифера — от 100 до 300 кГц.

2.1.7. Коэффициент дополнительных потерь  $q_{\Sigma} \geq 1 \cdot 10^{-3}$  определяют как разность между тангенсом угла потерь материала и суммой тангенсов угла потерь на гистерезис и частотных.

2.1.8. Коэффициент дополнительных потерь  $q_{\Sigma}$  материалов с малым его значением (порядка  $1 \cdot 10^{-4}$ ) определяют с помощью моста по схеме со взаимной индуктивностью, измеряя тангенс угла потерь образца на двух частотах при одном и том же значении напряженности магнитного поля, и на основании этих двух измерений определяют составляющую тангенса угла потерь, не зависящую от частоты. Вычитая из полученной величины  $\operatorname{tg} \delta_r$ , обусловленный потерями на гистерезис, определяют коэффициент дополнительных потерь.

2.1.9. Обратимую магнитную проницаемость  $\mu_{об}$  определяют, нанося на образец дополнительную обмотку намагничивания постоянным током, с которой последовательно включают регулировочные реостаты, амперметр для измерений силы постоянного тока  $I_{\Sigma}$ , дроссель и источник питания.

Число витков обмотки подсчитывают по формуле:

$$w = \frac{\pi D_r}{l_{\Sigma}} \cdot N_{\Sigma} \quad (13)$$

2.1.10. Удельные потери материала  $p$  определяют на основании измерения сопротивления потерь образца с помощью моста и измерения силы тока в намагничивающей обмотке образца.

2.1.11. Температурные коэффициенты магнитной проницаемости  $\beta_1$  и тангенса угла потерь  $\beta_2$  определяют по изменению индуктивности и сопротивления образца с намагничивающим устройством при изменении его температуры. Для определения  $\beta_1 \geq 0,5 \cdot 10^{-3} 1/\text{град}$  и  $\beta_2 \geq 2 \cdot 10^{-3} 1/\text{град}$  можно использовать любую мостовую схему для измерения индуктивности и сопротивления с погрешностью не выше 1% и

термокриостат, позволяющий создавать определенную температуру в заданном интервале с погрешностью не более 0,5 град. Для определения  $\beta_1 = (0,02—0,5) \cdot 10^{-3}$  1/град следует применять метод биений, описанный ниже.

2.1.12. Напряженность магнитного поля в испытываемом кольцевом образце подсчитывают по формулам:

$$\text{или} \quad H_m = \frac{\omega_1 I'_m}{\pi D_r} \quad (14)$$

$$H_m = \frac{\omega_1 I'_m}{\pi D_{cp}}$$

где  $I'_m$  — амплитудное значение намагничивающего тока в обмотке образца.

При синусоидальной форме кривой тока  $I'_m = 1,41 I'$ .

Для сердечников с отношением  $\frac{D_H}{D_B}$  от 1,4 до 2,5 различие в значениях напряженности поля, подсчитанных по гармоническому и среднему диаметрам, составляет от 1 до 7%.

2.1.13. Силу тока измеряют с помощью амперметра (милли- или микроамперметра) или определяют путем измерения вольтметром (милливольтметром) падения напряжения на безреактивном сопротивлении. В качестве безреактивного сопротивления следует взять такое, реактивная составляющая которого не превышает 10% от полного сопротивления. При этом параметры измерительного прибора не должны влиять на условия равновесия моста.

Наличие собственной емкости  $C_L$  обмотки образца и активная составляющая тока, обусловленная потерями в образце, вносят погрешность в определение намагничивающего тока в обмотке. Поэтому значение намагничивающего тока в обмотке  $I'$  следует вычислять по формуле:

$$I' = \frac{I}{1 + \omega^2 L_x C_L} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta_1}} \quad (15)$$

2.1.14. Собственную емкость, если магнитная проницаемость образца не зависит от частоты, определяют путем измерения индуктивности на двух частотах (при которых магнитная проницаемость постоянна) и одной и той же силе тока в обмотке образца и подсчитывают по формуле:

$$C_L = \frac{L_2 - L_1}{L_2 L_1 (\omega_2^2 - \omega_1^2)} \quad (16)$$

Если магнитная проницаемость материала изменяется с частотой, то собственную емкость определяют путем нанесения такой же обмотки, как на испытываемом образце, на сердечник тех же размеров из неферромагнитного и неметаллического материала. Измерения индуктивности производят также на двух частотах и собственную емкость подсчитывают по формуле 16.

2.1.15. Наибольшую относительную погрешность определения  $H_m$  подсчитывают по формуле:

$$\frac{\Delta H_m}{H_m} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta D_r}{D_r}. \quad (17)$$

При измерении тока приборами класса 0,5; 1,0; 1,5 погрешность  $\frac{\Delta H_m}{H_m}$  лежит в пределах от 2 до 6%.

2.1.16. Подсчет действительной составляющей относительной магнитной проницаемости материала кольцевого образца производят по формулам:

$$\mu' = \frac{L'_x D_r 10^7}{4S\omega^2} \quad (18)$$

или

$$\mu' = \frac{L'_x D_{cp} 10^7}{4S\omega^2}; \quad (19)$$

$$\mu' = \frac{M_x D_r 10^7}{4S\omega^2} \quad (20)$$

или

$$\mu' = \frac{M_x D_{cp} 10^7}{4S\omega^2}. \quad (21)$$

где  $L'_x$  — индуктивность (с учетом поправки на собственную емкость) обмотки с образцом.

Индуктивность  $L'_x$  находят по формуле:

$$L'_x = L_x (1 - \omega^2 L_x C_L) = L_x (1 - A). \quad (22)$$

2.1.17. Наибольшую относительную погрешность определения магнитной проницаемости находят по формуле:

$$\frac{\Delta \mu'}{\mu'} = \frac{\Delta D_r}{D_r} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta L'_x}{L'_x}. \quad (23)$$

Погрешность определения  $L'_x$  включает в себя погрешность измерения индуктивности  $L_x$ , обусловленную погреш-

ностью измерительной аппаратуры, и погрешность поправки  $A$  за счет влияния собственной емкости обмотки.

Для образцов, проницаемость которых в рассматриваемой области частот не зависит от частоты, при измерении индуктивности с погрешностью не более 0,5% и частоты 0,05% (формула 16) погрешность определения собственной емкости обмотки составляет не более 10%. В противном случае эта погрешность может возрасти примерно до 20%.

Чтобы наибольшая относительная погрешность определения магнитной проницаемости не превысила 5%, погрешность измерения индуктивности должна быть менее 1% и наружный диаметр испытываемых образцов должен быть не менее 24 мм.

2.1.18. Погрешность определения магнитной проницаемости увеличивается за счет погрешности определения напряженности поля до значений  $\frac{\Delta\mu_1}{\mu_1}$  в случаях, когда магнитная проницаемость материала зависит от напряженности магнитного поля и подсчитывается по формуле:

$$\frac{\Delta\mu_1}{\mu_1} = \frac{\Delta\mu^1}{\mu^1} + \alpha_n \Delta H_m. \quad (24)$$

2.1.19. Тангенс угла потерь материала подсчитывают по формуле:

$$\operatorname{tg} \delta_n = \frac{r_n}{\omega L_x} \quad (25)$$

или (в случае многовитковой обмотки)

$$\operatorname{tg} \delta_n = \frac{r_n}{\omega L_x} = \frac{r'_x - r'_0}{\omega L_x}, \quad (26)$$

где:

$r_n$  — сопротивление потерь, ом,

$r'_x$  — сопротивление обмотки с образцом (при заданной частоте с учетом поправки на собственную емкость обмотки), ом,

$r'_0$  — активное сопротивление обмотки (измеренное на постоянном токе) с учетом поправки на влияние поверхностного эффекта при заданной частоте, ом.

Значение  $r'_x$  подсчитывают по формуле:

$$r'_x = r_x (1 - 2\omega^2 L_x C_L) = r_x (1 - 2A), \quad (27)$$

где  $r_x$  — сопротивление обмотки с образцом, измеренное при заданной частоте, ом.

Значение сопротивления  $r'_0$  подсчитывают через измеренное значение сопротивления  $r_0$  по формуле:

$$r'_0 = r_0 K_\omega, \quad (28)$$

где  $K_\omega$  — поправочный член на влияние поверхностного эффекта.

Коэффициент  $K_\omega$  зависит от частоты намагничивающего тока и марки провода. Его величина, т. е. отношение сопротивления провода  $r'_0$  при заданной частоте к его сопротивлению  $r_0$ , измеренному на постоянном токе, для литцендрата подсчитывают по формуле:

$$K_\omega = \frac{r'_0}{r_0} = N + K \left( \frac{nd_s}{d_0} \right)^2 G, \quad (29)$$

где:

$N$  и  $G$  — коэффициенты, зависящие от  $x$  (для медного провода  $x = 10,65 d_s \sqrt{f}$ );

$f$  — частота, МГц;

$d_s$  — диаметр отдельной проволоки литцендрата, мм;

$n$  — число проволок провода;

$d_0$  — диаметр всего провода, мм;

$K$  — коэффициент, зависящий от  $n$ .

В приложении 5 приведены графики зависимости коэффициентов  $N$  и  $G$  от  $x$  и  $K$  от  $n$ .

2.1.20. Наибольшую относительную погрешность определения тангенса угла потерь подсчитывают по формуле:

$$\frac{\Delta \operatorname{tg} \delta_p}{\operatorname{tg} \delta_p} = \frac{\Delta r_n}{r_n} + \frac{\Delta \omega}{\omega} + \frac{\Delta L'_x}{L'_x}. \quad (30)$$

2.1.21. Абсолютную погрешность определения сопротивления потерь материала образца находят по формуле:

$$\Delta r_n = r_x \Delta (1 - 2A) + (1 - 2A) \Delta r_x + r_0 \Delta K_\omega + K_\omega \Delta r_0. \quad (31)$$

Примечание. Чтобы наибольшая относительная погрешность определения тангенса угла магнитных потерь не превысила 8%, погрешность измерения индуктивности не должна превышать 1%, сопротивления потерь — 5% и частоты — 2%.

2.1.22. Коэффициент потерь на вихревые токи подсчитывают при  $H_m = \text{const}$  по формуле:

$$p_0 = \frac{\operatorname{tg} \delta_2 - \operatorname{tg} \delta_1}{f_2 - f_1} = \frac{1}{2\pi L} \cdot \frac{\frac{r_{n_2}}{f_2} - \frac{r_{n_1}}{f_1}}{f_2 - f_1}, \quad (32)$$

где  $\operatorname{tg}\delta_2$  и  $\operatorname{tg}\delta_1$ ,  $r_{n_2}$  и  $r_{n_1}$  — тангенсы угла потерь и сопротивления потерь соответственно при частотах  $f_2$  и  $f_1$ .

2.1.23. Коэффициент потерь на гистерезис при  $f = \text{const}$  подсчитывают по формуле:

$$\rho_r = \frac{\operatorname{tg}\delta_2 - \operatorname{tg}\delta_1}{H_{m_2} - H_{m_1}} = \frac{r_{n_2} - r_{n_1}}{2\pi f L (H_{m_2} - H_{m_1})}, \quad (33)$$

где  $\operatorname{tg}\delta_2$  и  $\operatorname{tg}\delta_1$ ,  $r_{n_2}$  и  $r_{n_1}$  — тангенсы угла потерь и сопротивления потерь соответственно при напряженностях магнитного поля  $H_{m_2}$  и  $H_{m_1}$ .

2.1.24. Коэффициент дополнительных потерь  $\rho_d \geq 1 \cdot 10^{-3}$  подсчитывают по формуле:

$$\rho_d = \operatorname{tg}\delta_d - (\operatorname{tg}\delta_r + \operatorname{tg}\delta_h) = \operatorname{tg}\delta_d - \rho_r H_m - \rho_h f. \quad (34)$$

При измерениях на мосте взаимной индуктивности коэффициент дополнительных потерь  $\rho_d \geq 1 \cdot 10^{-4}$  (п. 2.1.8) подсчитывают по формуле:

$$\rho_d = \frac{\omega_2}{\omega_2 - \omega_1} \operatorname{tg}\delta_1 - \frac{\omega_1}{\omega_2 - \omega_1} \operatorname{tg}\delta_2 - \rho_r H_m, \quad (35)$$

где:

$\operatorname{tg}\delta_1$  и  $\operatorname{tg}\delta_2$  — тангенсы угла потерь, измеренные соответственно при частотах  $f_1$  и  $f_2$ ;

$H_m$  — напряженность поля, при которой проводились измерения, а/м.

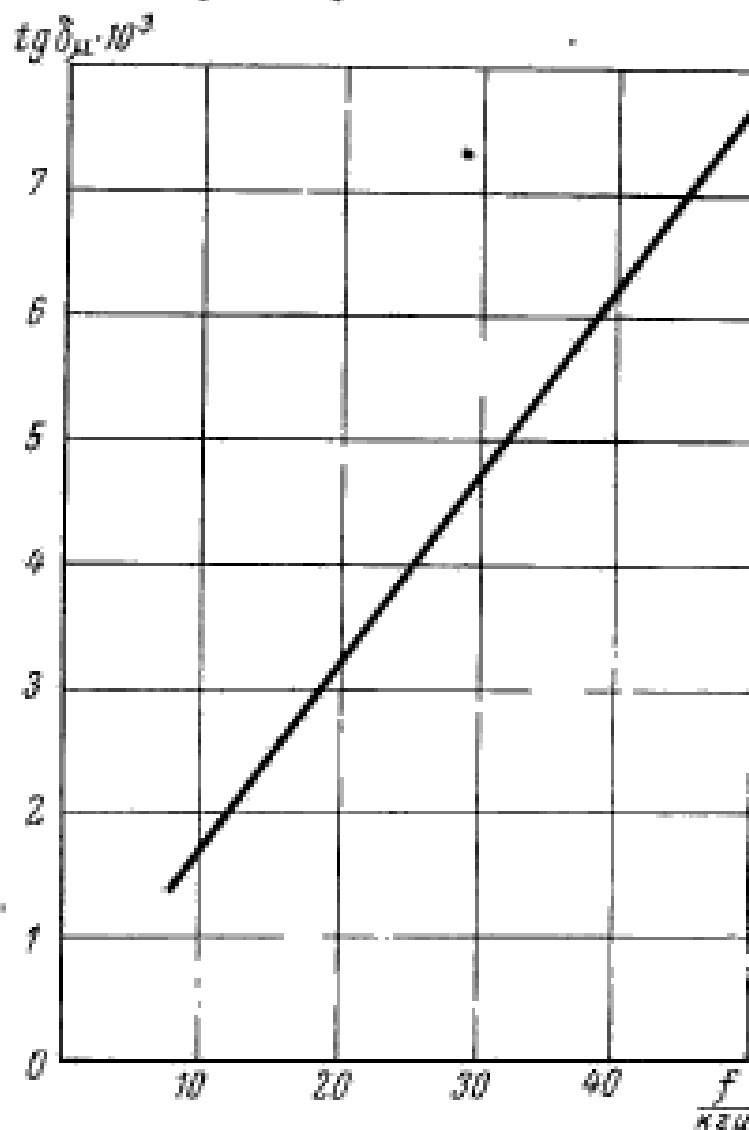
2.1.25. Для получения значений коэффициентов потерь допускается применение графических методов, при этом по оси ординат откладывают значения тангенса угла потерь, а по оси абсцисс — значения частоты или напряженности магнитного поля.

Коэффициент частотных потерь характеризуется тангенсом угла наклона прямой, выражающей зависимость  $\operatorname{tg}\delta_p = F_1(f)$ , к оси абсцисс (черт. 3).

Коэффициент потерь на гистерезис характеризуется тангенсом угла наклона прямой, выражающей зависимость  $\operatorname{tg}\delta_p = F_2(H_m)$ , к оси абсцисс (черт. 4).

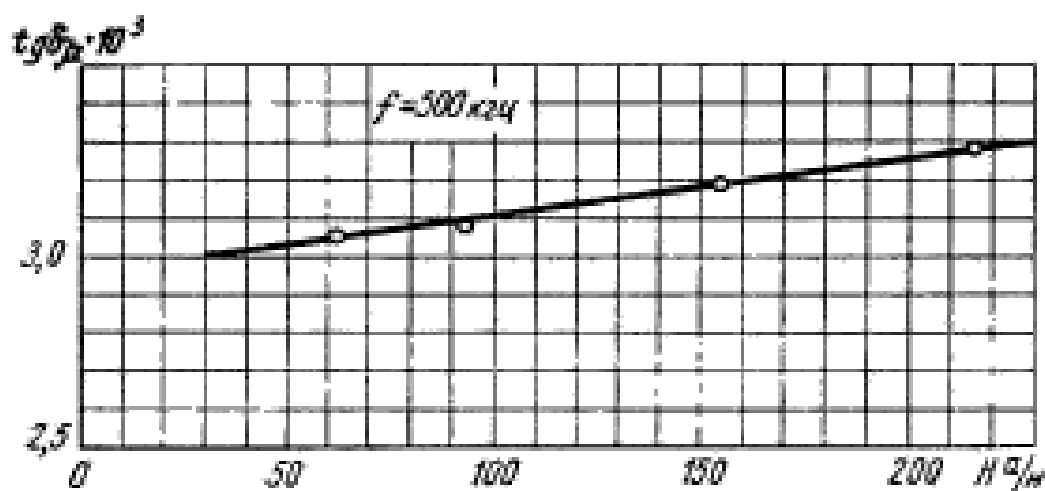
Коэффициент дополнительных потерь графически выражается отрезком на оси ординат, соответствующим  $\operatorname{tg}\delta_d$  при  $f=0$  и  $H_m=0$  и отсекаемым при экстраполяции прямых  $\operatorname{tg}\delta_p = F_1(f)$  или  $\operatorname{tg}\delta_p = F_2(H_m)$ .

График зависимости тангенса угла потерь материала от частоты



Черт. 3

График зависимости тангенса угла потерь материала от напряженности магнитного поля



Черт. 4



2.1.26. Наибольшую относительную погрешность определения коэффициента частотных потерь (пренебрегая погрешностью измерения частоты) подсчитывают по формуле:

$$\frac{\Delta q_{\omega}}{q_{\omega}} = \frac{\frac{1}{f_2} \Delta r_{n_2} + \frac{1}{f_1} \Delta r_{n_1}}{\frac{1}{f_2} r_{n_2} - \frac{1}{f_1} r_{n_1}}, \quad (36)$$

Наибольшую относительную погрешность определения коэффициента потерь на гистерезис подсчитывают по формуле:

$$\frac{\Delta q_r}{q_r} = \frac{2\Delta r_n}{r_{n_2} - r_{n_1}} + \frac{\Delta H_{m_2} + \Delta H_{m_1}}{H_{m_2} - H_{m_1}} + \frac{\Delta L'_x}{L'_x}, \quad (37)$$

где  $r_{n_1}$  и  $r_{n_2}$  — сопротивления потерь, измеренные соответственно при напряженностях поля  $H_{m_1}$  и  $H_{m_2}$ .

Наибольшая относительная погрешность определения коэффициента дополнительных потерь, подсчитываемого по формуле (34), выражается формулой:

$$\frac{\Delta q_d}{q_d} = \frac{\Delta \lg \delta_d + \Delta q_r H_m + q_r \Delta H_m + f \Delta q_{\omega}}{q_d}, \quad (38)$$

При определении коэффициента  $q_d$  с помощью моста взаимной индуктивности подсчет погрешности производят по формуле:

$$\frac{\Delta q_d}{q_d} = \frac{\Delta (q_d + q_r H_m) + \left( \frac{\Delta q_r}{q_r} + \frac{\Delta H_m}{H_m} \right) q_r H_m}{q_d}, \quad (39)$$

Погрешность члена  $\Delta (q_d + q_r H_m)$  подсчитывают по формуле:

$$\Delta (q_d + q_r H_m) = \Delta H_m q_r \frac{f_2 + f_1}{f_2 - f_1} + 2\Delta C_3 \frac{f_2 \cdot f_1}{f_2 - f_1} 2\pi r_3, \quad (40)$$

где:

$\Delta C_3$  — абсолютная погрешность емкости  $C_3$ , уравнивающей сопротивление потерь (приложение 2), ф;

$r_3$  — сопротивление одного из плеч моста взаимной индуктивности (приложение 2), ом;

$\Delta H_m$  — абсолютная погрешность напряженности магнитного поля, а/м.

2.1.27. Для того, чтобы погрешность определения коэффициентов потерь (особенно при их значениях  $q_m = 1 \cdot 10^{-9}$  1/Гц,  $q_c = 1 \cdot 10^{-6}$  м/а,  $q_d = 1 \cdot 10^{-4}$ ) не превышала 20%, погрешность измерения сопротивления должна быть не более 1% (см. таблицу).

Для снижения погрешности определения коэффициента частотных потерь (особенно при его численном значении порядка  $1 \cdot 10^{-9}$  1/Гц) определение его должно производиться при частотах  $f_1$  и  $f_2$ , отличающихся друг от друга не менее чем в три раза.

Для снижения погрешности определения коэффициента потерь на гистерезис (особенно при его численном значении порядка  $1 \cdot 10^{-6}$  м/а) определение его должно производиться при напряженностях магнитного поля  $H_{m1}$  и  $H_{m2}$ , отличающихся друг от друга не менее чем в три раза.

2.1.28. Удельные потери в материале  $p$  на основании результатов измерений мостовым методом подсчитывают по формуле:

$$p = \frac{P}{m} - \frac{I r_n}{m} = \frac{I^2 (r'_x - r'_0)}{m} \quad (41)$$

2.1.29. Наибольшую относительную погрешность определения удельных потерь подсчитывают по формуле:

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{\Delta I}{I} + \frac{\Delta r_n}{r_n} + \frac{\Delta m}{m} \quad (42)$$

Если измерять ток прибором класса 1,5, сопротивление потерь с погрешностью не выше 5% (см. таблицу) и взвешивать образец с погрешностью не более 0,5%, то  $\frac{\Delta p}{p}$  не превысит 10%.

2.1.30. Подсчет температурного коэффициента магнитной проницаемости производят по формуле:

$$\beta_1 = \frac{\mu'_2 - \mu'_1}{\mu'_1 (t_2 - t_1)} \approx \frac{\mu'_{25} - \mu'_1}{\mu'_{25} (t_2 - t_1)} \quad (43)$$

где:  $\mu'_1$  и  $\mu'_2$  — действительные составляющие относительной комплексной магнитной проницаемости испытываемого образца соответственно при температурах  $t_1$  и  $t_2$ , подсчитываемые на основании измерения индуктивности при температурах  $t_1$  и  $t_2$ ;

$\mu'_{25}$  — то же, при температуре 25°C.

2.1.31. Наибольшую относительную погрешность определения температурного коэффициента магнитной проницаемости подсчитывают по формуле:

$$\frac{\Delta\beta_1}{\beta_1} = \frac{2\Delta\mu'_1}{\mu'_2 - \mu'_1} + \frac{\Delta\mu'_1}{\mu'_1} + \frac{2\Delta t_1}{t_2 - t_1}. \quad (44)$$

Для материалов, температурный коэффициент которых изменяется в зависимости от интервала температур, наибольший температурный интервал не должен превышать 30 град. С учетом того, чтобы погрешность  $\beta_1$  не превышала 20% (см. таблицу), значение  $\beta_1$  должно быть не менее  $0,5 \cdot 10^{-3}$  1/град и погрешность измерения температуры не должна превышать 0,5 град.

2.1.32. Температурный коэффициент тангенса угла потерь подсчитывают по формуле:

$$\beta_2 = \frac{\operatorname{tg}\delta_2 - \operatorname{tg}\delta_1}{\operatorname{tg}\delta_1 (t_2 - t_1)} = \frac{r_{n_2} - r_{n_1} \left(1 + \frac{L_2 - L_1}{L_1}\right)}{r_{n_1} (t_2 - t_1)}, \quad (45)$$

где:

$r_{n_1}$  и  $r_{n_2}$  — сопротивления потерь обмотки с образцом соответственно при температурах  $t_1$  и  $t_2$ , Ом;  
 $L_1$  и  $L_2$  — индуктивности обмотки с образцом соответственно при температурах  $t_1$  и  $t_2$ , гн.

При подсчете  $r_n$  необходимо учитывать отличие сопротивления провода обмотки при данной температуре  $(r_0)_t$  от его значения при нормальной температуре  $(r_0)_{25}$ , принимая во внимание, что:

$$(r_0)_t = (r_0)_{25} [1 + \alpha_t (t - 25)]. \quad (46)$$

2.1.33. Наибольшую относительную погрешность температурного коэффициента тангенса угла потерь подсчитывают по формуле:

$$\frac{\Delta\beta_2}{\beta_2} = \frac{2\Delta r_n}{r_{n_2} - r_{n_1}} + \frac{\Delta r_{n_1}}{r_{n_1}} + \frac{2\Delta t_1}{t_2 - t_1}. \quad (47)$$

При интервале температур 30 град, погрешности измерения температуры не более 0,5 град и измерения сопротивления  $r_x$  с погрешностью не выше 1% наибольшая погрешность определения температурного коэффициента тангенса угла потерь (при  $\beta_2 \geq 2 \cdot 10^{-3}$  1/град) составит не более 30%.

## 2.2. Резонансный метод

2.2.1. Резонансный метод определения перечисленных в таблице величин заключается в измерении с помощью изме-

рителя добротности (куметра) индуктивности  $L_x$  и добротности  $Q_x$  намагничивающего устройства с кольцевым сердечником из испытываемого ферромагнитного материала и последующем подсчете магнитных характеристик по соответствующим формулам.

В качестве намагничивающего устройства может применяться как многovitковая, так и одновитковая обмотка (одновитковая рамка, коаксиальный держатель, высокочастотный пермеаметр). Методы определения магнитных характеристик при одновитковом намагничивании аналогичны изложенным в ГОСТ 12635—67 «Материалы магнитномягкие высокочастотные. Методы испытаний на частотах от 1 до 200 МГц».

2.2.2. Число витков обмотки образца находят по формуле (11). В этом случае индуктивность испытываемого образца с многovitковой обмоткой находят по формуле:

$$L_x = \frac{1}{(2\pi f)^2 C}, \quad (48)$$

где  $C$  — емкость конденсатора резонансного контура куметра, ф.

2.2.3. При испытании образца с многovitковой обмоткой после подключения обмотки к зажимам  $L_x$  куметра устанавливают нужную частоту и регулированием емкости резонансного контура добиваются максимального отклонения указателя шкалы добротности. Затем определяют индуктивность и добротность образца, по которым подсчитывают магнитную проницаемость и тангенс угла потерь образца (вместе с обмоткой).

2.2.4. Для определения температурных коэффициентов магнитной проницаемости и тангенса угла потерь материала измеряют индуктивность и добротность образца в температурном высокочастотном пермеаметре (п. 2.2.1) или в намагничивающем устройстве, помещенном в термокриостат, при двух или нескольких значениях температур в заданном диапазоне.

2.2.5. При многovitковой обмотке подсчет относительной магнитной проницаемости кольцевого образца производят по формуле (18) или (19).

2.2.6. Относительную погрешность индуктивности с помощью куметра определяют по формуле:

$$\frac{\Delta L_x}{L_x} = \frac{2\Delta f}{f} + \frac{\Delta C}{C}. \quad (49)$$

Если погрешность куметра по частоте не превышает  $\pm 1\%$ , а погрешность градуировки шкалы емкости лежит в пределах от 1 до 4% (в зависимости от величины емкости), наибольшая погрешность определения индуктивности составит 3—6% и действительной составляющей относительной магнитной проницаемости  $\mu'$  — не более 10%.

2.2.7. Тангенс угла потерь материала образца подсчитывают по формуле:

$$\operatorname{tg} \delta_{\mu} = \frac{1}{Q_x} - \frac{r'_0}{\omega L'_x}, \quad (50)$$

где  $Q_x$  — добротность обмотки с образцом (отсчитывают непосредственно по шкале добротности куметра).

Член  $\frac{r'_0}{\omega L'_x}$  обусловлен параметрами обмотки (п. 2.1.19).

2.2.8. Относительную погрешность определения тангенса угла магнитных потерь вычисляют по формуле:

$$\frac{\Delta \operatorname{tg} \delta_{\mu}}{\operatorname{tg} \delta_{\mu}} = \frac{\frac{\Delta Q}{Q} + \left( \frac{\Delta r'_0}{r'_0} + \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta L'_x}{L'_x} \right) \frac{r'_0}{\omega L'_x}}{\operatorname{tg} \delta_{\mu}} \quad (51)$$

Если погрешность измерения добротности с помощью куметра не превышает 10%, наибольшая относительная погрешность определения тангенса угла магнитных потерь составит не более 30%.

2.2.9. Подсчет температурного коэффициента магнитной проницаемости  $\beta_1$  производят по формуле (43) с учетом формул (18), (22) и (48).

Наибольшую относительную погрешность определения  $\frac{\Delta \beta_1}{\beta_1}$  подсчитывают по формуле:

$$\frac{\Delta \beta_1}{\beta_1} = \frac{2\Delta C}{C_1 - C_2} + \frac{\Delta C}{C_2} + \frac{2\Delta t}{t_2 - t_1}, \quad (52)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  — емкости при резонансе, соответствующие температурам  $t_1$  и  $t_2$ ,  $\phi$ .

Примечание. При погрешности температуры не более  $\pm 0,5$  град, интервале ее изменения 30 град и погрешности градуировки шкалы емкости куметра от 1 до 4% для определения температурного коэффициента магнитной проницаемости с погрешностью не более 20%,  $\beta_1$  должно быть не менее  $5 \cdot 10^{-3}$  1/град.

2.2.10. Подсчет величины  $\beta_2$  производят по формуле:

$$\beta_2 = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_2(t_2 - t_1)}, \quad (53)$$

где  $Q_1$  и  $Q_2$  — добротности, соответствующие температурам  $t_1$  и  $t_2$ .

2.2.11. Наибольшую относительную погрешность определения  $\beta_2$  подсчитывают по формуле:

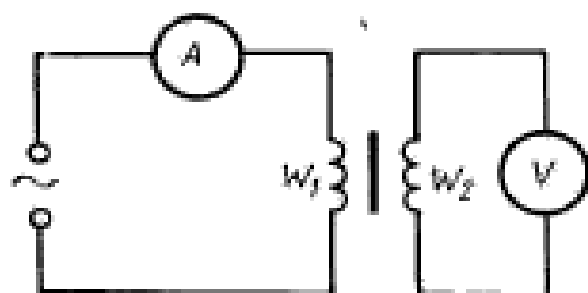
$$\frac{\Delta\beta_2}{\beta_2} = \frac{2\Delta Q}{Q_1 - Q_2} + \frac{\Delta Q_2}{Q_2} + \frac{2\Delta t}{t_2 - t_1}, \quad (54)$$

При погрешности температуры не более  $\pm 0,5$  град, интервале ее изменения 30 град и погрешности градуировки шкалы добротности куметра  $\pm 10\%$  для определения температурного коэффициента тангенса угла потерь  $\beta_2$  с погрешностью, не превышающей 30%, величина  $\beta_2$  должна быть не менее  $1 \cdot 10^{-2}$  1/град.

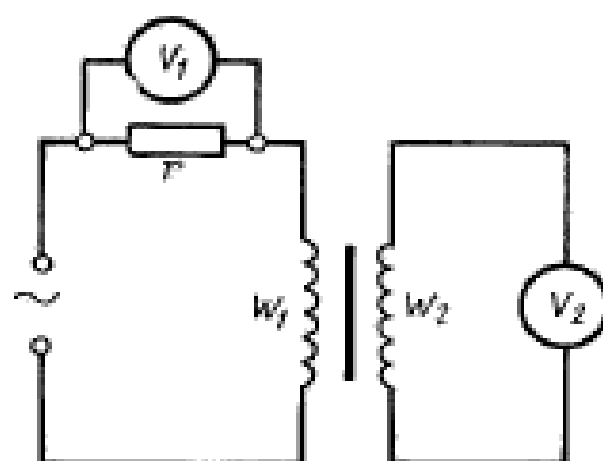
### 2.3. Индукционный метод

2.3.1. Индукционный метод определения перечисленных в таблице величин заключается в измерении намагничивающего тока в первичной обмотке образца, э. д. с., индуцированной в его вторичной обмотке, мощности (потерь в образце) и последующем подсчете магнитных характеристик по соответствующим формулам.

2.3.2. Силу тока, протекающего по первичной (намагничивающей) обмотке образца, измеряют амперметром (черт. 5) или определяют с помощью вольтметра и безреактивного сопротивления (черт. 6).



Черт. 5



Черт. 6

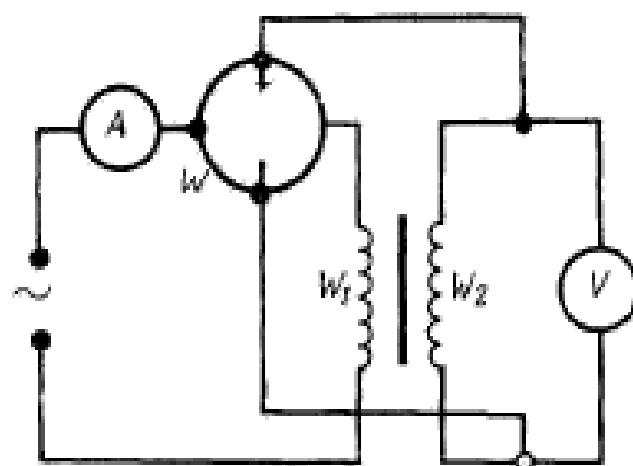
Примечание. В приложении 3 даны перечень соответствующих амперметров, миллиамперметров и микроамперметров и их основные технические характеристики.

2.3.3. Для подсчета максимального значения магнитной индукции измерение э. д. с., индуцированной во вторичной обмотке образца, должно производиться вольтметрами средних или действующих значений (при известном коэффициенте формы  $K_f$ ).

Если форма кривой э. д. с., индуцированной во вторичной обмотке образца, синусоидальна, может быть применен любой вольтметр (действующих, амплитудных или средних значений), предназначенный для заданного диапазона частот.

Примечание. В приложении 4 даны перечень вольтметров и их основные технические характеристики.

2.3.4. Для определения зависимости потерь в образцах от амплитудного значения магнитной индукции или напряженности магнитного поля применяют ваттметровый метод в соответствии со схемой, изображенной на черт. 7. Эта же схема позволяет определять динамическую кривую намагничивания.



Черт. 7

2.3.5. На образец поверх изоляции должны быть нанесены две обмотки - намагничивающая и измерительная. Измерительную обмотку наносят равномерно распределенной или сосредоточенной в одном месте. Поверх измерительной обмотки наносят намагничивающую обмотку равномерно по всей длине окружности образца.

Число витков  $w_2$  измерительной обмотки подсчитывают по формуле:

$$w_2 = \frac{U_{2cp}}{4fSB_{max}} = \frac{U_2}{4K_f f SB_{max}}, \quad (55)$$

где  $U_{2cp}$  и  $U_2$  — напряжения на вторичной обмотке образца, в.

Число витков  $w_1$  намагничивающей обмотки подсчитывают по формуле:

$$w_1 = \frac{\pi D_r H_{max}}{I_{max}}, \quad (56)$$

2.3.6. Для определения динамической кривой намагничивания материала испытуемого образца его обмотки включают в цепь в соответствии со схемой черт. 5 или 6.

Задавая последовательно требуемые значения (от меньших к большим) напряженности магнитного поля (пропорциональные силе тока в намагничивающей обмотке) и измеряя соответствующие им э. д. с., индуцированные в измерительной обмотке образца, определяют динамическую кривую намагничивания материала образца.

2.3.7. Если требуется определить динамическую кривую намагничивания и потери, измерения производят по схеме черт. 7.

Задавая последовательно значения напряженности магнитного поля (по силе тока в намагничивающей обмотке) или магнитной индукции (по э. д. с., индуцированной в измерительной обмотке) и измеряя соответствующие им значения мощности (ваттметром), получают зависимость потерь в образце от напряженности магнитного поля или магнитной индукции.

2.3.8. Напряженность магнитного поля (максимальное значение) подсчитывают по формуле:

$$H_{max} = \frac{I_{max} w_1}{\pi D_r}, \quad (57)$$

2.3.9. Погрешность определения напряженности магнитного поля лежит в пределах от 2 до 6% в зависимости от класса измерительного прибора.

2.3.10. Максимальное значение магнитной индукции подсчитывают по формуле:

$$B_{max} = \frac{U_{2cp}}{4fS w_2} = \frac{U_2}{4K_f f S w_2}, \quad (58)$$



2.3.11. Наибольшую относительную погрешность определения магнитной индукции подсчитывают по формуле:

$$\frac{\Delta B_{\max}}{B_{\max}} = \frac{\Delta U_2}{U_2} + \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta K_f}{K_f} - \frac{\Delta U_{\text{ср}}}{U_{\text{ср}}} + \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta S}{S}. \quad (59)$$

Примечание. Если наибольшая относительная погрешность определения площади поперечного сечения составит от 2 до 7%, погрешность частоты (большинства генераторов без кварцевых резонаторов) 2%, погрешность измерения напряжения 3—5%, погрешность определения коэффициента формы кривой вторичной э. д. с. — около 3%, то наибольшая относительная погрешность определения магнитной индукции  $B_{\max}$  лежит в пределах от 10 до 15%.

2.3.12. На основании полученных значений магнитной индукции и напряженности магнитного поля могут быть построены динамические кривые намагничивания вида:

$$B_{\max} = f(H_{\max}), \quad B_{\max} = f(H_m), \quad B_{\max} = f(H), \\ B_m = f(H_m), \quad B_m = f(H_{\max}), \quad B_m = f(H).$$

По этим же данным может быть получена зависимость относительной амплитудной магнитной проницаемости от напряженности магнитного поля  $\mu_r = f(H_m)$ , подсчитываемой по формуле:

$$\mu_r = \frac{B_m}{\mu_0 H_m}. \quad (60)$$

2.3.13. Наибольшая погрешность определения относительной амплитудной магнитной проницаемости  $\mu_r$  при точностях измерения  $H_m$  и  $B_m$ , указанных в пп. 2.3.9 и 2.3.11, лежит в пределах от 10 до 20%.

2.3.14. Подсчет удельных потерь в материале образца производят по формуле:

$$p = \frac{P}{m} = \frac{1}{m} \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} P_1 - \frac{U_2^2}{r_2'} \right) \left( 1 + \frac{r_2}{r_2'} \right), \quad (61)$$

где:

$P_1$  — мощность, измеренная с помощью ваттметра, Вт;

$r_2$  — сопротивление вторичной обмотки, Ом;

$$r_2' = \frac{r_w \cdot r_v}{r_w + r_v},$$

$r_w$  — сопротивление параллельной обмотки ваттметра, Ом;

$r_v$  — сопротивление вольтметра, Ом.

При больших сопротивлениях  $r_v$  и  $r_w$  (когда  $r'_2 \gg 100 r_2$ ) поправочным членом  $\left(1 + \frac{r_2}{r'_2}\right)$  можно пренебречь.

2.3.15. Наибольшую относительную погрешность определения удельных потерь подсчитывают по формуле:

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{\frac{\Delta P_1}{P_1} + \frac{2U^2}{\frac{\omega_1}{\omega_2} P_1 r'_2} \cdot \frac{\Delta U}{U}}{1 - \frac{U^2}{\frac{\omega_1}{\omega_2} P_1 r'_2}} + \frac{\Delta m}{m} \quad (62)$$

При измерении массы с погрешностью, не превышающей 0,5%, применении ваттметров с погрешностью измерения мощности не более 15% и вольтметров класса 2,5 наибольшая погрешность измерения удельных потерь составит 30%.

#### 2.4. Метод биений

2.4.1. Метод биений применяют для определения температурного коэффициента магнитной проницаемости  $\beta_1$  при его малом численном значении ( $\beta_1 \gg \pm 20 \cdot 10^{-6} 1/град$ ).

Таким температурным коэффициентом магнитной проницаемости обладают, например, магнитодиэлектрики на основе карбонильного железа, ферриты с низкой магнитной проницаемостью (20 ВЧ).

2.4.2. Температурный коэффициент магнитной проницаемости определяют по изменению частоты генератора вследствие изменения под влиянием температуры индуктивности катушки с сердечником из испытываемого материала, включенной в контур измерительного генератора.

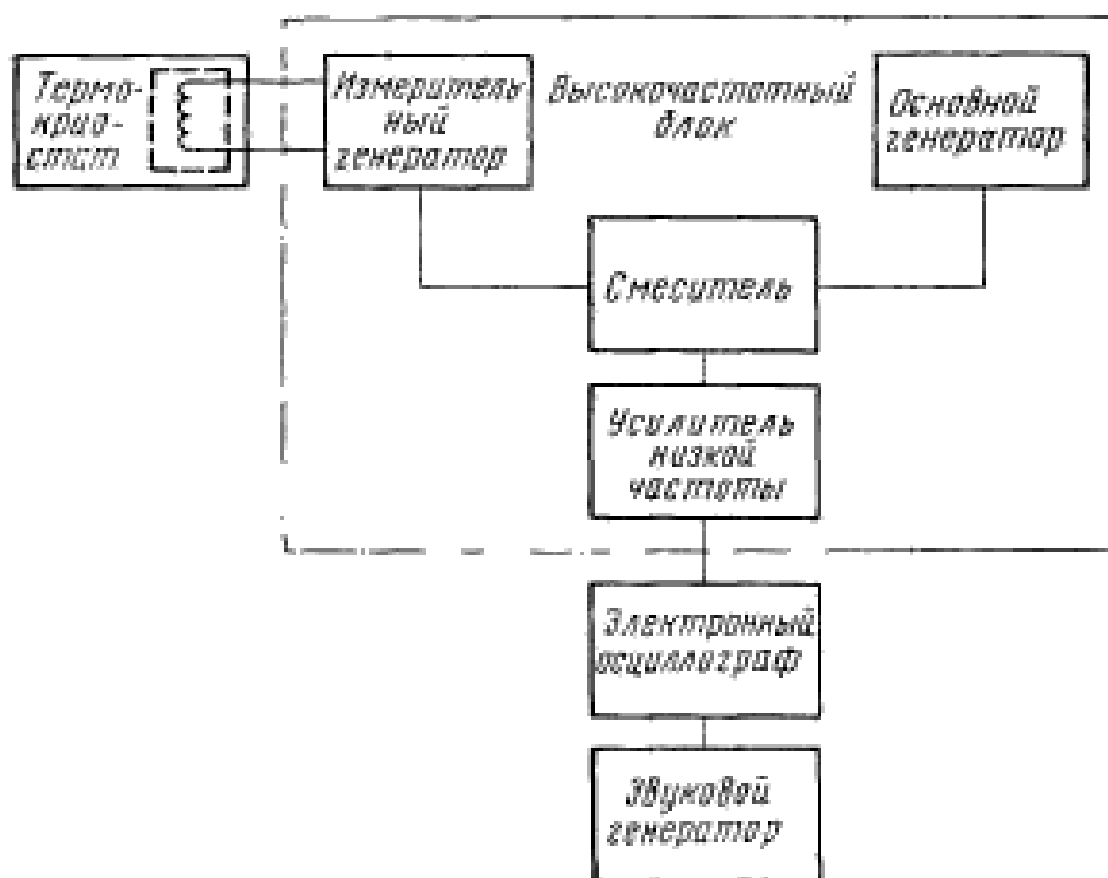
С помощью электронного осциллографа сравнивают разностную частоту, полученную при смешении колебаний двух высокочастотных генераторов (основного и измерительного), с частотой генератора звуковых частот.

2.4.3. Блок-схема, по которой осуществляют измерения  $\beta_1$  методом биений, изображена на черт. 8.

Высокочастотный блок позволяет получать напряжения, частоты которых пропорциональны измеряемому коэффициенту  $\beta_1$ . Этот блок включает в себя два высокочастотных генератора: измерительный и основной, смеситель и усилитель низкой частоты.

2.4.4. Частоту основного генератора выбирают равной требуемой частоте испытаний. Ввиду высоких требований к

генераторам в отношении стабильности их частот, основной генератор должен иметь кварцевый резонатор. Для повышения стабильности частоты измерительного и основного генератора они должны быть термостатированы, с тем, чтобы колебания температуры внутри термостата не превышали  $\pm 0,5$  град. Конденсатор переменной емкости измерительного генератора должен обладать малым температурным коэффициентом (не больше  $10 \cdot 10^{-6}$  1/град).



Черт. 8

Генератор звуковых частот должен давать возможность производить отсчет частоты с точностью до 1 гц при изменении частоты не более 5 гц за 1 ч.

2.4.5. В зависимости от частоты основного (кварцевого) генератора, магнитной проницаемости материала испытываемого образца и пределов изменения емкости конденсатора  $C$ , входящего в контур измерительного генератора, подсчитывают число витков обмотки образца по формулам (11) и (48).

Если испытания проводят при температурах выше  $373^\circ\text{K}$ , провод для обмотки должен иметь эмалевую изоляцию.

2.4.6. Перед измерением образец с обмоткой высушивают при температуре 373°К в течение 1 ч (в отдельном термостате или в том же термостате, в котором производят измерения). Если измерения производят не непосредственно после просушивания, до начала измерений образцы должны храниться в эксикаторе.

2.4.7. Испытываемый образец с обмоткой включают в контур измерительного конденсатора. Если необходимо определять  $\beta_1$  в широком интервале температур, измерения следует начинать с низких температур.

Задав на звуковом генераторе частоту, лежащую в середине его диапазона, изменением емкости конденсатора измерительного генератора добиваются остановки фигуры Лиссажу на экране осциллографа. Это означает, что разностная частота (измерительного и основного генераторов) равна частоте звукового генератора. Значение разностной частоты измеряют при каждой фиксированной температуре, устанавливаемой в термостате.

Если выбирать разностную частоту таким образом, чтобы увеличению емкости резонансного контура, в который включен испытываемый образец, соответствовало увеличение разностной частоты, то  $\beta_1$  будет положительным в том случае, когда при увеличении температуры наблюдается увеличение разностной частоты, и наоборот.

2.4.8. Температурный коэффициент магнитной проницаемости подсчитывают по формуле:

$$\beta_1 = \pm \frac{2(f_2 - f_1)}{f(t_2 - t_1)}, \quad (63)$$

где:

$f_1$  и  $f_2$  — значения разностных частот соответственно при температурах  $t_1$  и  $t_2$ , отсчитываемые по шкале генератора звуковых частот, гц;

$f$  — частота основного генератора, гц.

2.4.9. Наибольшую относительную погрешность определения  $\beta_1$  подсчитывают по формуле:

$$\frac{\Delta\beta_1}{\beta_1} = \frac{2\Delta f_1}{f_2 - f_1} + \frac{2\Delta t}{t_2 - t_1}, \quad (64)$$

Абсолютная погрешность  $\Delta f_1$  измерения разностной частоты на выходе установки для определения  $\beta_1$  не должна превышать 10 гц.

Примечание. При погрешности измерения температуры в термостате не более 0,5 град и интервале температур 30 град наибольшая относительная погрешность определения  $\beta_1$  не превысит 20%.

## ПЕРЕЧЕНЬ

основных буквенных обозначений, применяемых  
в формулах настоящего стандарта

- $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  зН/м — магнитная постоянная;
- $\mu$  — относительная амплитудная магнитная проницаемость;
- $\mu'$  — действительная составляющая относительной комплексной магнитной проницаемости  $\bar{\mu}$ ;
- $\mu'_{25}$  — то же, при температуре 25°C;
- $\mu''$  — мнимая составляющая относительной комплексной магнитной проницаемости  $\bar{\mu}$ ;
- $\mu_{об}$  — относительная обратимая магнитная проницаемость;
- $\alpha_n$  — коэффициент амплитудной неустойчивости проницаемости, м/а;
- $\operatorname{tg} \delta_p$  — тангенс угла магнитных потерь;
- $\operatorname{tg} \delta_{25}$  — то же, при температуре 25°C;
- $\operatorname{tg} \delta_r$  — тангенс угла потерь на гистерезис;
- $\operatorname{tg} \delta_n$  — тангенс угла частотных потерь;
- $Q_r$  — коэффициент потерь на гистерезис, м/а;
- $Q_n$  — коэффициент частотных потерь, 1/ац;
- $Q_d$  — коэффициент дополнительных потерь;
- $\beta_1$  — температурный коэффициент магнитной проницаемости, 1/град°;
- $\beta_2$  — температурный коэффициент тангенса угла магнитных потерь, 1/град°;
- $P$  — полные потери, вт;
- $p$  — удельные полные потери, вт/кг;
- $B_m$  — максимальное значение синусоидальной кривой магнитной индукции, тл;
- $B_{max}$  — максимальное значение искаженной кривой магнитной индукции, тл;
- $H_m$  — максимальное значение синусоидальной кривой напряженности магнитного поля, а/м;
- $H_{max}$  — максимальное значение искаженной кривой напряженности магнитного поля, а/м;
- $H$  — действующее значение напряженности переменного магнитного поля, а/м;
- $H_{пост}$  — напряженность постоянного магнитного поля, а/м;
- $I_{пост}, I$  — сила постоянного тока и действующее значение силы переменного тока, а;
- $I_m$  — максимальное значение синусоидальной кривой тока, а;
- $I'_m$  — максимальное значение намагничивающего тока в обмотке образца, а;
- $I_{max}$  — максимальное значение искаженной кривой тока, а;
- $I''$  — намагничивающий ток, при учете потерь из-за собственной емкости обмотки и активной составляющей тока, обусловленной потерями в образце;

- $U$  — действующее значение напряжения, в;  
 $U_m$  — максимальное значение синусоидальной кривой напряжения, в;  
 $U_{max}$  — максимальное значение искаженной кривой напряжения, в;  
 $U_{ср}$  — среднее значение напряжения, в;  
 $r$  — сопротивление переменному току, ом;  
 $r_0$  — сопротивление обмотки постоянному току, ом;  
 $r_0$  — активное сопротивление обмотки при заданной частоте, ом;  
 $r_x$  — сопротивление обмотки с образцом, измеренное при заданной частоте, ом;  
 $r_x$  — сопротивление обмотки с образцом (при заданной частоте с учетом поправки на собственную емкость обмотки), ом;  
 $r_n$  — сопротивление потерь материала, ом;  
 $\alpha_t$  — относительный температурный коэффициент электрического сопротивления материала провода, 1/град;  
 $Z$  — полное сопротивление, ом;  
 $L$  — индуктивность, гн;  
 $L_x$  — индуктивность обмотки с образцом, гн;  
 $L_x$  — индуктивность обмотки с образцом, с учетом собственной емкости, гн;  
 $M$  — взаимная индуктивность, гн;  
 $M_x$  — взаимная индуктивность между обмотками образца, гн;  
 $C$  — емкость, ф;  
 $C_x$  — собственная емкость обмотки образца, ф;  
 $Q$  — добротность;  
 $f$  — частота, гц;  
 $\omega$  — круговая частота переменного тока;  
 $w$  — число витков намагничивающей обмотки, нанесенной на образец двойным проводом для образования двух обмоток при мостовом методе измерения;  
 $w_1$  — число витков намагничивающей обмотки образца;  
 $w_2$  — число витков измерительной обмотки образца;  
 $D_n, D_{в}, D_{ср}, D_r$  — наружный, внутренний, средний и гармонический диаметры кольцевого образца, м;  
 $S$  — площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>;  
 $h$  — толщина образца, м;  
 $m$  — масса образца, кг;  
 $K_f$  — коэффициент формы кривой напряжения;  
 $K_{нл}$  — коэффициент нелинейных искажений;  
 $K_a$  — коэффициент амплитуды;  
 $K_{\omega}$  — коэффициент зависимости активного сопротивления от частоты намагничивающего тока и марки провода (скин-эффект);  
 $t$  — температура по шкале Цельсия, °С.