

СССР
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

ГОСТ 12635—67

**МАТЕРИАЛЫ МАГНИТНОМЯГКИЕ
ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ**

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

Издание официальное

МОСКВА

СССР Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР	ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ	ГОСТ 12635—67
	МАТЕРИАЛЫ МАГНИТНОМЯГКИЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ 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 П99

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 биения (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 $D_{ср}$ диаметры и площадь поперечного сечения S по формулам:

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

$$D_{ср} = \frac{D_H + D_B}{2}, \quad (2)$$

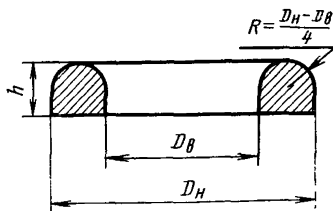
а) для образцов прямоугольного сечения:

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

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

Характеристика методов испытаний

Наименование метода	Пределы измерения по		Определяемые величины	Пределы определяемых величин	Погрешности*
	частоте, кгц	напряженности магнитного поля, а/м			
1. Мостовой метод	10—1000	10 ⁻¹ — 100	$\mu'(L)$	$\mu' = 10 - 10000$	$\frac{\Delta\mu'}{\mu'} \leq 5\% ; \left(\frac{\Delta L_x}{L_x} \leq 1\% \right)$
			$\text{tg}\delta_\mu (r_n, L)$	$\text{tg}\delta_\mu = 10^{-3} - 1$	$\frac{\Delta \text{tg}\delta_\mu}{\text{tg}\delta_\mu} \leq 8\% ; \left(\frac{\Delta r_n}{r_n} \leq 5\% \right)$
			Q_r	$Q_r \geq 1 \cdot 10^{-6} \text{ м/а}$	$\frac{\Delta Q}{Q} < 20\% ; \left(\frac{\Delta r_x}{r_x} \leq 1\% \right)$
			Q_B	$Q_B \geq 1 \cdot 10^{-9} \text{ 1/гц}$	
			Q_d	$Q_d \geq 1 \cdot 10^{-4}$	
			p	$p > 10^{-6} \text{ вт/кг}$	$\frac{\Delta p}{p} \leq 10\% ; \left(\frac{\Delta r_n}{r_n} \leq 5\% \right)$
			β_1	$\beta_1 \geq 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/град}$	$\frac{\Delta \beta_1}{\beta_1} \leq 20\% ; \left(\frac{\Delta L_x}{L_x} \leq 1\% \right)$
β_2	$\beta_2 \geq 2 \cdot 10^{-3} \text{ 1/град}$	$\frac{\Delta \beta_2}{\beta_2} \leq 30\% ; \left(\frac{\Delta r_x}{r_x} \leq 1\% \right)$			
			$\mu' = F(f, H_m, H =, t)$ $\text{tg}\delta_\mu = F(f, H_m, H =, t)$		
2. Резонансный метод	10—1000	Неопределены**	$\mu'(L)$	$\mu' = 10 - 10000$	$\frac{\Delta\mu'}{\mu'} \leq 10\% , \left(\frac{\Delta L}{L} \leq 6\% \right)$

Продолжение

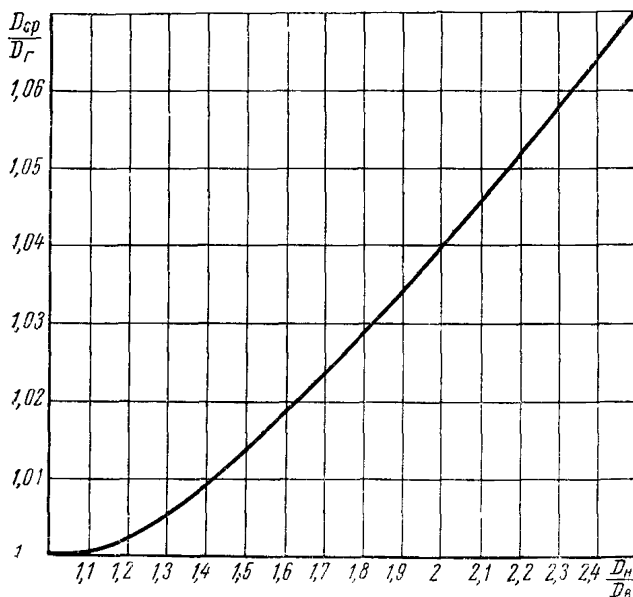
Наименование метода	Пределы измерения по		Определяемые величины	Пределы определяемых величин	Погрешности*
	частоте, кГц	напряженности магнитного поля, а/м			
3. Индукционный метод	10—1000	1—5000	$\operatorname{tg} \delta_{\mu} (Q)$ β_1, β_2 $\mu' = F(f, t)$ $\operatorname{tg} \delta_{\mu} = F(f, t)$ B_{\max} $\mu \sim$ p $B_{\max} = F(I_{\max})$ $B_{\max} = F(H_m)$ $B_{\max} = F(H)$ $B_m = F(I_{\max})$ $B_m = F(H_m)$ $B_m = F(H)$	$\operatorname{tg} \delta_{\mu} - 10^{-3} - 10^{-1}$ $\beta_1 - 5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/град}$ $\beta_2 > 1 \cdot 10^{-2} \text{ 1/град}$ $B_{\max} = (10^{-5} - 10^{-1}) \text{ тл}$ $\mu \sim = 10 - 10000$ $p (10^{-3} - 10^2) \text{ вт/кг}$	$\frac{\Delta \operatorname{tg} \delta_{\mu}}{\operatorname{tg} \delta_{\mu}} \leq 30\% ; \left(\frac{\Delta Q}{Q} \leq 10\% \right)$ $\frac{\Delta \beta_1}{\beta_1} \leq 20\%$ $\frac{\Delta \beta_2}{\beta_2} \leq 30\%$ $\frac{\Delta B_{\max}}{B_{\max}} \leq 15\%$ $\frac{\Delta \mu \sim}{\mu \sim} \leq 20\%$ $\frac{\Delta p}{p} \leq 30\%$
4. Метод биений	100—1000	Неопределены**	β_1	$\beta_1 - (0,02 - 0,5) \cdot 10^{-3} \text{ 1/град}$	$\frac{\Delta \beta_1}{\beta_1} \leq 20\%$

* При многовитковом намагничивании

** Зависит от типа измерителя, частоты и Z образца.

Подсчет магнитных характеристик производят по гармоническому диаметру D_{Γ} . В зависимости от требуемой точности измерений и радиальной толщины образца, характеризуемой отношением $\frac{D_{\text{н}}}{D_{\text{в}}}$, гармонический диаметр D_{Γ} может быть заменен средним $D_{\text{ср}}$. 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:

$$\frac{\Delta D_{\text{ср}}}{D_{\text{ср}}} = \frac{2\Delta D}{D_{\text{н}} + D_{\text{в}}}, \quad (5)$$

$$\frac{\Delta D_{\Gamma}}{D_{\Gamma}} = \frac{2\Delta D}{D_{\text{н}} - D_{\text{в}}} + \frac{D_{\text{в}}}{D_{\text{н}}} \cdot \frac{2\Delta D}{D_{\text{в}}}. \quad (6)$$

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

а) для образцов прямоугольного сечения:

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

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

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

Если размеры образцов соответствуют размерам, приведенным в ГОСТ 8763—58, то при измерении D_H , D_B и h с погрешностью, не превышающей 0,1 мм, наибольшая относительная погрешность определения $D_{ср}$ лежит в пределах от 0,2 до 1%, D_T — 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 30 кГц обмотку допускается выполнять одножильным медным проводом диаметром не свыше 0,25 мм.

Примечание. При многovitковом 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 устанавливается 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 НМ время выдержки должно быть 24 ч, для никель-цинковых ферритов марки НН—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 β_1 и β_2 свыше $1.10^{-3} 1/\text{град}$, 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 μ_{25} и $\text{tg}\delta_{25}$ — характеристики материала, определенные при температуре 25°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 ω_1 выбирают в зависимости от марки испытываемого материала, размеров образца, требуемой напряженности магнитного поля и пределов измерения аппаратуры для определения индуктивности по формуле:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{L_x D_{cp} \cdot 10^7}{4S\mu'}}, \quad (11)$$

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 ω производят по формуле:

$$\omega = \sqrt{\frac{M_x D_{cp} 10^7}{4S\mu'}}, \quad (12)$$

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 ρ_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) $Q_{\text{в}}$ 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 $Q_{\text{д}} \geq 1.10^{-3}$ определяют как разность между тангенсом угла потерь материала и суммой тангенсов угла потерь на гистерезис и частотных.

2.1.8. Коэффициент дополнительных потерь $Q_{\text{д}}$ материалов с малым его значением (порядка 1.10^{-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 $\text{tg} \delta_{\text{г}}$, обусловленный потерями на гистерезис, определяют коэффициент дополнительных потерь.

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

Число витков обмотки подсчитывают по формуле:

$$\omega = \frac{\pi D_{\text{г}}}{l_{\text{=}}} \cdot H_{\text{=}}. \quad (13)$$

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 β_1 и тангенса угла потерь β_2 определяют по изменению индуктивности и сопротивления образца с намагничивающим устройством при изменении его температуры. Для определения $\beta_1 \geq 0,5.10^{-3}$ 1/град и $\beta_2 \geq 2.10^{-3}$ 1/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 и определение намагничивающего тока в обмотке. Поэтому значение намагничивающего тока в обмотке I' следует вычислять по формуле:

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

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 немагнитного 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:

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

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:

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

или (в случае многovitковой обмотки)

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

где:

r_n — сопротивление потерь, Ом,

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

r'_o — 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_ω — поправочный член на влияние поверхностного эффекта.

Коэффициент K_ω 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:

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

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 $\rho_d \geq 1.10^{-3}$ подсчитывают по формуле:

$$\rho_d = \operatorname{tg}\delta_{\mu} - (\operatorname{tg}\delta_r + \operatorname{tg}\delta_{\text{в}}) = \operatorname{tg}\delta_{\mu} - \rho_r H_m - \rho_{\text{в}} f. \quad (34)$$

При измерениях на мосте взаимной индуктивности коэффициент дополнительных потерь $\rho_d \geq 1.10^{-4}$ (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, a/m .

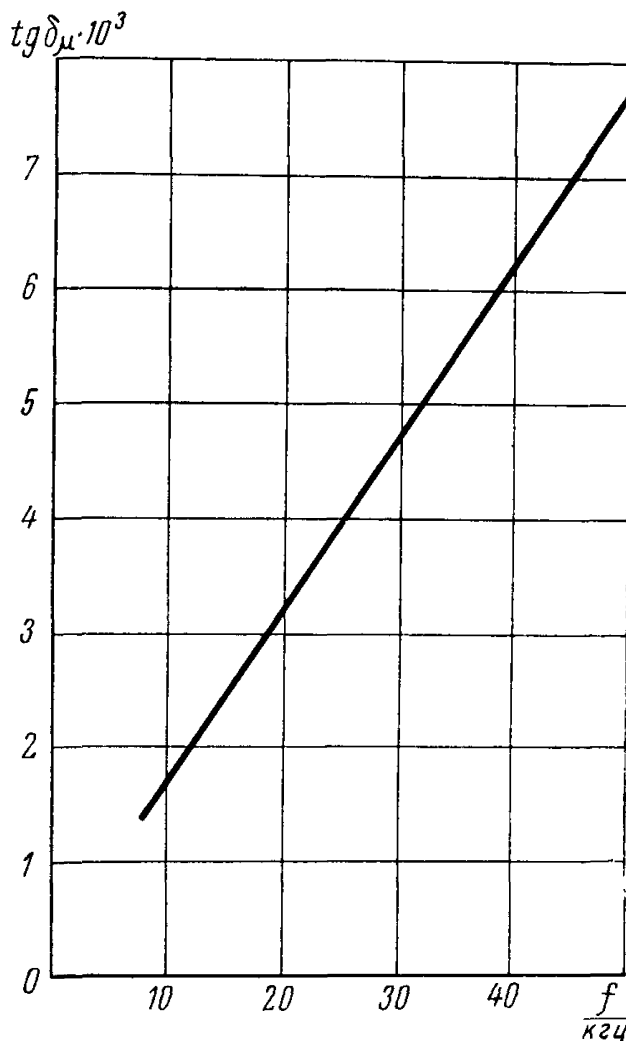
2.1.25. Для получения значений коэффициентов потерь допускается применение графических методов, при этом по оси ординат откладывают значения тангенса угла потерь, а по оси абсцисс — значения частоты или напряженности магнитного поля.

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

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

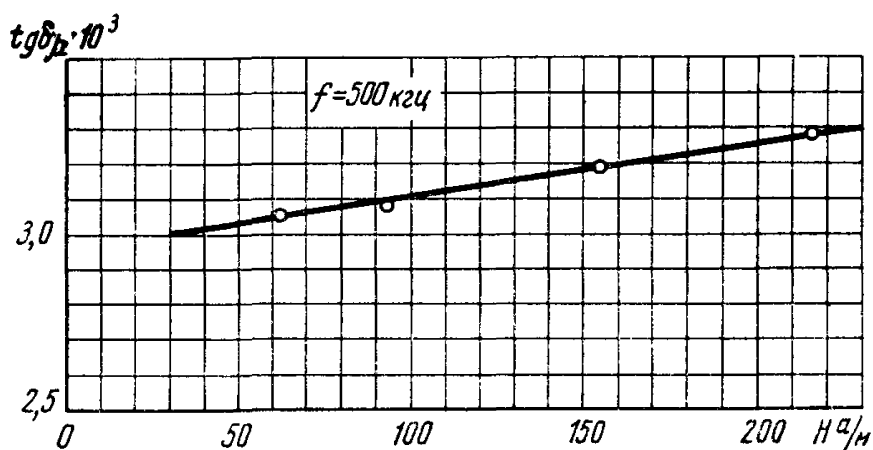
Коэффициент дополнительных потерь графически выражается отрезком на оси ординат, соответствующим $\operatorname{tg}\delta_{\mu}$ при $f=0$ и $H_m=0$ и отсекаемым при экстраполяции прямых $\operatorname{tg}\delta_{\mu} = F_1(f)$ или $\operatorname{tg}\delta_{\mu} = F_2(H_m)$.

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:

$$\frac{\Delta Q_{\text{в}}}{Q_{\text{в}}} = \frac{\frac{1}{f_2} \Delta r_{n_2} + \frac{1}{f_1} \Delta r_{n_1}}{\frac{1}{f_2} r_{n_2} - \frac{1}{f_1} r_{n_1}}. \quad (36)$$

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

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

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:

$$\frac{\Delta Q_{\text{д}}}{Q_{\text{д}}} = \frac{\Delta \text{tg} \delta_{\mu} + \Delta Q_{\text{г}} H_m + Q_{\text{г}} \Delta H_m + f \Delta Q_{\text{в}}}{Q_{\text{д}}}. \quad (38)$$

При определении коэффициента $Q_{\text{д}}$ с помощью моста взаимной индуктивности подсчет погрешности производят по формуле:

$$\frac{\Delta Q_{\text{д}}}{Q_{\text{д}}} = \frac{\Delta(Q_{\text{д}} + Q_{\text{г}} H_m) + \left(\frac{\Delta Q_{\text{г}}}{Q_{\text{г}}} + \frac{\Delta H_m}{H_m} \right) Q_{\text{г}} H_m}{Q_{\text{д}}}. \quad (39)$$

Погрешность члена $\Delta(Q_{\text{д}} + Q_{\text{г}} H_m)$ подсчитывают по формуле:

$$\Delta(Q_{\text{д}} + Q_{\text{г}} H_m) = \Delta H_m \rho_{\text{г}} \frac{f_2 + f_1}{f_2 - f_1} + 2\Delta C_3 \frac{f_2 \cdot f_1}{f_2 - f_1} 2\pi r_3, \quad (40)$$

где:

ΔC_3 — абсолютная погрешность емкости C_3 , уравновешивающей сопротивление потерь (приложение 2), ϕ ;

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

ΔH_m — абсолютная погрешность напряженности магнитного поля, а/м .

2.1.27. Для того, чтобы погрешность определения коэффициентов потерь (особенно при их значениях $Q_B = 1.10^{-9}$ 1/Гц, $Q_T = 1.10^{-6}$ м/а, $Q_d = 1.10^{-4}$) 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 1.10^{-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 1.10^{-6} м/а) определение его должно производиться при напряженностях магнитного поля H_{m_1} и H_{m_2} , 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:

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

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

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{2\Delta I}{I} + \frac{\Delta r_n}{r_n} + \frac{\Delta m}{m} \quad (42)$$

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: μ'_1 и μ'_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 ;

μ'_{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 β_1 не превышала 20% (см. таблицу), значение β_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 измерении 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, ϕ .

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 термостат, 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 μ' — 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:

$$\frac{\Delta \operatorname{tg}\delta_{\mu}}{\operatorname{tg}\delta_{\mu}} = \frac{\frac{\Delta Q}{Q^2} + \left(\frac{\Delta r'_0}{r'_0} + \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta L'_x}{L'_x} \right) \frac{r'_0}{\omega L'_x}}{\operatorname{tg}\delta_{\mu}} \quad (51)$$

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 β_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 , ϕ .

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%, β_1 должно быть не менее 5.10^{-3} 1/град.

2.2.10. Подсчет величины β_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 β_2 подсчитывают по формуле:

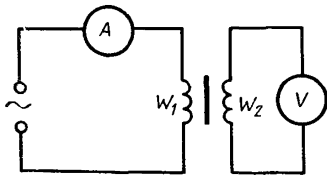
$$\frac{\Delta\beta_2}{\beta_2} = \frac{2\Delta Q}{Q_1 - Q_2} + \frac{\Delta Q_2}{Q_2} + \frac{2\Delta t}{t_2 - t_1}. \quad (54)$$

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 β_2 с погрешностью, не превышающей 30%, величина β_2 должна быть не менее 1.10^{-2} 1/град.

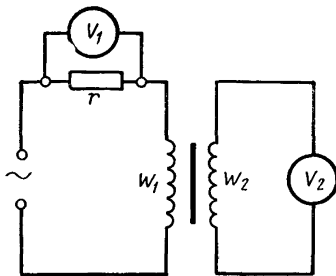
2.3. Индукционный метод

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

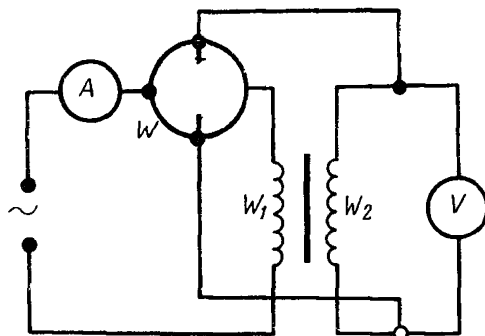
Примечание. В приложении 3 даны перечень соответствующих амперметров, миллиамперметров и микроамперметров и их основные технические характеристики.

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 ваттметрский 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 ω_2 измерительной обмотки подсчитывают по формуле:

$$\omega_2 = \frac{U_{2cp}}{4fSB_{max}} = \frac{U_2}{4K_{jf}SB_{max}}, \quad (55)$$

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

Число витков ω_1 намагничивающей обмотки подсчитывают по формуле:

$$\omega_1 = \frac{\pi D_r H_{max}}{I_{max}}. \quad (56)$$

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:

$$H_{max} = \frac{I_{max}\omega_1}{\pi D_r}. \quad (57)$$

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:

$$B_{max} = \frac{U_{2cp}}{4fS\omega_2} = \frac{U_2}{4K_{jf}S\omega_2}. \quad (58)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\Delta B_{\max}}{B_{\max}} &= \frac{\Delta U_2}{U_2} + \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta K_f}{K_f} = \\ &= \frac{\Delta U_{2\text{ср}}}{U_{2\text{ср}}} + \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta S}{S}. \end{aligned} \quad (59)$$

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:

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

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

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

2.3.13. Наибольшая погрешность определения относительной амплитудной магнитной проницаемости $\mu \sim$ 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:

$$p = \frac{P}{m} = \frac{1}{m} \left(\frac{w_1}{w_2} P_1 - \frac{U_2^2}{r_2'} \right) \left(1 + \frac{r_2}{r_2'} \right), \quad (61)$$

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:

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

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 β_1 при его малом численном значении ($\beta_1 \geq \pm 20 \cdot 10^{-6}$ 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.

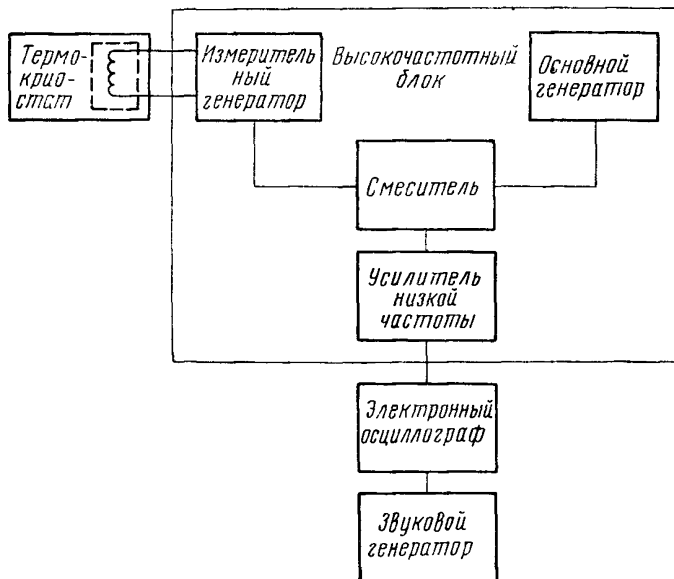
С помощью электронного осциллографа сравнивают разностную частоту, полученную при смешении колебаний двух высокочастотных генераторов (основного и измерительного), с частотой генератора звуковых частот.

2.4.3. Блок-схема, по которой осуществляют измерения β_1 методом биений, изображена на черт. 8.

Высокочастотный блок позволяет получать напряжения, частоты которых пропорциональны измеряемому коэффициенту β_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°K , провод для обмотки должен иметь эмалевую изоляцию.

2.4.6. Перед измерением образец с обмоткой высушивают при температуре 373°K в течение 1 ч (в отдельном термостате или в том же термокриостате, в котором производят измерение). 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 β_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 термокриостате.

Если выбирать разностную частоту таким образом, чтобы увеличению емкости резонансного контура, в который включен испытываемый образец, соответствовало увеличение разностной частоты, то β_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 β_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 Δf_1 измерения разностной частоты на выходе установки для определения β_1 не должна превышать 10 Гц.

Примечание При погрешности измерения температуры в термокриостате не более 0,5 град и интервале температур 30 град наибольшая относительная погрешность определения β_1 не превысит 20%.

ПЕРЕЧЕНЬ

**основных буквенных обозначений, применяемых
в формулах настоящего стандарта**

- $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ гн/м — магнитная постоянная;
- μ — относительная амплитудная магнитная проницаемость;
- μ' — действительная составляющая относительной комплексной магнитной проницаемости $\tilde{\mu}$;
- μ'_{25} — то же, при температуре 25°C;
- μ'' — мнимая составляющая относительной комплексной магнитной проницаемости $\tilde{\mu}$;
- $\mu_{об}$ — относительная обратимая магнитная проницаемость;
- α_n — коэффициент амплитудной нестабильности проницаемости, м/а;
- $tg\delta_\mu$ — тангенс угла магнитных потерь;
- $tg\delta_{25}$ — то же, при температуре 25°C;
- $tg\delta_r$ — тангенс угла потерь на гистерезис;
- $tg\delta_v$ — тангенс угла частотных потерь;
- Q_r — коэффициент потерь на гистерезис, м/а;
- Q_v — коэффициент частотных потерь, 1/гц;
- Q_d — коэффициент дополнительных потерь;
- β_1 — температурный коэффициент магнитной проницаемости, 1/град;
- β_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;
- $H_{=}$ — напряженность постоянного магнитного поля, а/м;
- $I_{=}, I$ — 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, v ;
 U_m — максимальное значение синусоидальной кривой напряжения, v ;
 U_{max} — максимальное значение искаженной кривой напряжения, v ;
 U_{cp} — среднее значение напряжения, v ;
 r — сопротивление переменному току, $ом$;
 r_p — 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, $ом$;
 α_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_L — собственная емкость обмотки образца, $ф$;
 Q — добротность;
 f — частота, $гц$;
 ω — 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_b, D_{cp}, D_r — наружный, внутренний, средний и гармонический диаметры кольцевого образца, $м$;
 S — площадь поперечного сечения образца, $м^2$;
 h — толщина образца, $м$;
 m — масса образца, $кг$;
 K_f — коэффициент формы кривой напряжения;
 $K_{нн}$ — коэффициент нелинейных искажений;
 K_a — коэффициент амплитуды;
 K_ω — коэффициент зависимости активного сопротивления от частоты намагничивающего тока и марки провода (скин-эффект);
 t — температура по шкале Цельсия, $^{\circ}C$.

ХАРАКТЕРИСТИКИ

аппаратуры, применяемой при испытаниях образцов магнитномягких материалов мостовым методом

Наименование аппаратуры и ее параметров	Основные характеристики аппаратуры		
	Мост по резонансной схеме (измерительная установка УИММ-2, завод „Эталон“)	Мост по резонансной схеме (измерительная установка УИМ-2, завод „Эталон“)	Мост по схеме со взаимной индуктивностью (измерительная установка УВИМ-1, завод „Эталон“)
Частотный диапазон, кГц	10—1000	10—1000	10—50
Погрешности аппаратуры, %	1 для L_x 5 для r_x	0,3 для L_x 1 для r_x 10 для Q_r и Q_b	0,5 для M_x 10 для Q_d и Q_r
Магазин сопротивления:			
а) пределы	$(1-10^4) \text{ ом}$ + реохорд на 1,1 ом	$(10^{-3} - 10^3) \text{ ом}$, $r_0 = 0,4 \text{ ом}$	—
б) погрешность, %	0,1	0,1	—
в) дополнительные характеристики	—	$L_0 \approx 0,4 \text{ мкГн}$, $\Delta L \leq 0,1 \text{ мкГн}$. Измерение сопротивления с частотой (до 1 МГц) не превышает 0,1%	—
Постоянные сопротивления:			
а) пределы, ом	$r_1 = r_2 = 100$	$r_1 = r_2 = 5$	$r_3 = 159$; $r_2 = 314$

Наименование аппаратуры и ее параметров	Основные характеристики аппаратуры		
	Мост по резонансной схеме (измерительная установка УИММ-2, завод „Эталон“)	Мост по резонансной схеме (измерительная установка УИМ-2, завод „Эталон“)	Мост по схеме со взаимной индуктивностью (измерительная установка УВИМ-1, завод „Эталон“)
б) погрешность, %	0,1	0,05	0,05
в) постоянные времени, <i>сек</i>	$\leq 1 \cdot 10^{-7}$	$\leq 1 \cdot 10^{-8}$	$\leq 1 \cdot 10^{-8}$
Магазин емкости: а) пределы	(0,0001—1) <i>мкф</i>	(50—11150) <i>пф</i> —воздушные конденсаторы (0,01—1) <i>мкф</i> —слюдяные конденсаторы	$C_1 = (50—10000) \text{ пф}$ $C_3 = (20—1500) \text{ пф}$
б) погрешность	0,1%	Воздушные конденсаторы: $0,05 \left(1 + \frac{100}{C}\right) \%$, где C —емкость в <i>пф</i> Слюдяные конденсаторы: 0,1%	$0,05 \left(1 + \frac{100}{C}\right) \%$, где C —емкость в <i>пф</i> (для C_1) 0,1% (для C_3)
в) тангенс угла потерь конденса- торов	$\leq 5 \cdot 10^{-4}$	$\leq 5 \cdot 10^{-5}$ (для воздушных конденсаторов) $\leq 5 \cdot 10^{-4}$ (для слюдяных конденсаторов)	$\leq 5 \cdot 10^{-5}$ (для C_1) $\leq 1 \cdot 10^{-3}$ (для C_3)
Индикатор: а) чувстви- тельность <i>дел/мкв</i>	0,2—1	0,2—1	5

Основные характеристики аппаратуры

Наименование аппаратуры и ее параметров

Мост по резонансной схеме (измерительная установка УИММ-2, завод „Эталон“)

Мост по резонансной схеме (измерительная установка УИМ-2, завод „Эталон“)

Мост по схеме со взаимной индуктивностью (измерительная установка УВИМ-1, завод „Эталон“)

б) избирательность, *дБ*

50

50

50

Генератор:

а) выходная мощность, *вт*

10

10

10

б) искажения, %

≤ 1

≤ 1

≤ 1

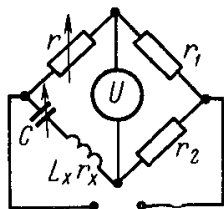
в) погрешность, %

0,01

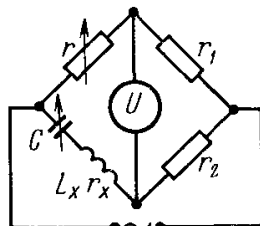
0,01

0,01

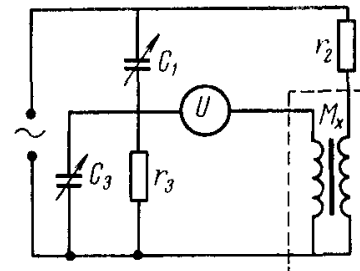
Схемы и уравнения равновесия



$$L_x = \frac{1}{\omega^2 C}; r_x = r \frac{r_2}{r_1}$$



$$L_x = \frac{1}{\omega^2 C}; r_x = r \frac{r_2}{r_1}$$



$$M_x = C_1 r_2 r_3, \text{tg} \delta_\mu = \omega C_3 r_3$$

ПЕРЕЧЕНЬ

амперметров, миллиамперметров и микроамперметров и их основные характеристики

Тип прибора	Пределы измерений	Погрешность в номинальном диапазоне частот, %	Номинальный диапазон частот	Погрешность в расширенном диапазоне частот, %	Расширенный диапазон частот	Система прибора	Дополнительные характеристики
T13	1—3 <i>ма</i>	1,5	50 <i>гц</i> —15 <i>Мгц</i>	3	15—40 <i>Мгц</i>	Термоэлектрическая	
T15	10—30—50 <i>ма</i> 100 <i>ма</i> 300 <i>ма</i>	1	20 <i>гц</i> —25 <i>Мгц</i> 20 <i>гц</i> —20 <i>Мгц</i> 20 <i>гц</i> —10 <i>Мгц</i>	2	до 75 <i>Мгц</i> до 60 <i>Мгц</i> до 30 <i>Мгц</i>	Термоэлектрическая	
T15/1	5 <i>ма</i>	1	20 <i>гц</i> —25 <i>Мгц</i>	2	до 75 <i>Мгц</i>	Термоэлектрическая	
T18	0,5—1—2; 5 <i>а</i>	1,5	50 <i>гц</i> —2 <i>Мгц</i>	3	2—5 <i>Мгц</i>	Термоэлектрическая	
T133	100—250—500— —1000 <i>мка</i>	1,5	20 <i>гц</i> —0,5 <i>Мгц</i>	3	0,5—1 <i>Мгц</i>	Термоэлектрическая	$C_{вх} \leq 15 \text{ пф}$ $U = 60 \text{ мв}$
Ф506	10—30—100— —300 <i>мка</i> 1—3—10—30— —100—300 <i>ма</i>	1,0	20 <i>гц</i> —40 <i>кгц</i>	2	40 <i>кгц</i> —60 <i>кгц</i>	Электронная	$U = 10—40 \text{ мв}$
Ф533	0,03—0,1—0,3—1— —3—10—30—100— —300—1000 <i>ма</i>	0,5	40 <i>гц</i> —20 <i>кгц</i>	1	20 <i>гц</i> —50 <i>кгц</i>	Электронная	$U = 0,3 \text{ в}$

ПЕРЕЧЕНЬ

вольтметров и милливольтметров и их основные характеристики

Тип прибора	Пределы измерения	Погрешность в номинальном диапазоне частот, %	Номинальный диапазон частот	Погрешность в расширенном диапазоне частот, %	Расширенный диапазон частот	Система прибора	Дополнительные характеристики	Примечание
T16	0,75—1,5—3 в 7,5—15—30 в	1,5	20 гц— —20 Мгц 20 гц— —15 Мгц	3	20— —40 Мгц	Термо- электри- ческая	$C_{ВХ} < 3,5$ пф, $I = 3$ ма	
T132	3—7,5—15— —30 в	1,5	20 гц— —200 кгц	3	0,2— —0,4 Мгц	Термо- электри- ческая	$r_{ВХ} = 10$ ком/в, $C_{ВХ} \leq 15$ пф	
T131	75—150—300 мв 750—1500 мв	1,5	20 гц— —1 Мгц 20 гц— —0,5 Мгц	3	1—2 Мгц 0,5— —1 Мгц	Термо- электри- ческая	$r_{ВХ} = 10$ ком/в, $C_{ВХ} \leq 15$ пф	
ВЗ 2А	10—30—100— —300 мв 1—3—10—30— —100—300 в	2,5	55 гц— —20 кгц	4 6	40 гц— —400 кгц 20 гц— —1 Мгц	Элек- тронная	$r_{ВХ} \geq 1$ Мом, ($f = 1000$ гц), $C_{ВХ}$ (10 мв—1 в) \leq < 25 пф, $C_{ВХ} < 15$ пф (3—300 в)	
ВЗ—3	10—30—100— —300—1000 мв	3	50 гц— —20 кгц	5	30 гц— —5 Мгц	Элек- тронная	$r_{ВХ} = 1$ Мом, $K_{НИ} < 1\%$, $C_{ВХ} \sim 10$ пф	

Тип прибора	Пределы измерения	Погрешность в номинальном диапазоне частот, %	Номинальный диапазон частот	Погрешность в расширенном диапазоне частот, %	Расширенный диапазон частот	Система прибора	Дополнительные характеристики	Примечание
ВЗ-4	10-30-100- -300-1000 мв	2,5	400 гц- -20 кгц	4	20 гц- -500 кгц 500 кгц- -5 Мгц	Элек- тронная	$r_{вх}=1 \text{ Мом,}$ $C_{вх} \leq 12 \text{ пф}$	$K_{ни} < 1\%$
ВЗ-5	0,05-0,1- -0,2-0,5-1- -2-5-10- -20-50-100- 200-500- -1000 мв	4	40 гц- -500 кгц	10	20 гц- -1 Мгц	Элек- тронная	$r_{вх} \geq 600 \text{ ком,}$ ($f=1000 \text{ гц}$), $C_{вх} \leq 12-25 \text{ пф}$	$K_a \sim 4$
ВЗ-С	0,5-1-2-5- -10-20-50- -100-200 мв 0,5-1-2-5- -10-20-50- -100-200 в	6	30 гц- -200 кгц	10	5 гц- 1 Мгц	Элек- тронная	$r_{вх}=5 \text{ Мом,}$ ($f=400 \text{ гц}$), $C_{вх} < 25 \text{ пф}$	для $f < 20 \text{ кгц}$ $K_{ни} \leq 10\%$, $\gamma_{доп}=3\%$, $K_{ни} < 20\%$, $\gamma_{доп}=4\%$, $K_{ни} \leq 100\%$, $\gamma_{доп}=8\%$,
ВЗ-7	3-10-30- -100-300- -1000-3000 мв 1 мв 10-30-100- -300 в	1,5 2,5 2,5	100 гц- -3 кгц	2 2,5 3 4	40 гц- -50 кгц 20 гц- -200 кгц 40 гц- -50 кгц 20 гц- -200 кгц	Элек- тронная	$r_{вх}=2 \text{ Мом,}$ $C_{вх} < 25 \text{ пф}$	$K_{ни} < 1\%$

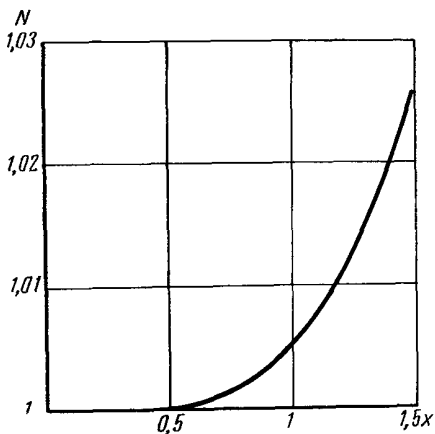
Тип прибора	Пределы измерения	Погрешность в номинальном диапазоне частот, %	Номинальный диапазон частот	Погрешность в расширенном диапазоне частот, %	Расширенный диапазон частот	Система прибора	Дополнительные характеристики	Примечание
				5	20 гц— —200 кгц			
				4	40 гц— —50 кгц			
V3—9	20—1250 мв	$0,2 + \frac{0,08}{U_x}$	1000 гц— —30 Мгц	—	—	—	—	$\gamma_{доп} = 0,5 K_f$ для $K_f < 15\%$
V3—12	20—50 мв 0,1—0,3—1— —3 в	4	100 кгц— —150 Мгц	6	150— —200 Мгц	Элек- тронная	$r_{вх} \geq 10 \text{ ком,}$ ($f = 100 \text{ Мгц}$), $C_{вх} \leq 2 \text{ пф}$	
V3—15	0,25—0,5—1— 2,5—5—10— —20—40—100— —200 в	4—6	1 кгц— —100 Мгц	6—10	50 гц— —300 Мгц	Элек- тронная	$r_{вх} = 1—5 \text{ ком,}$ ($f = 1 \text{ кгц}$), $C_{вх} \leq 2—5 \text{ пф}$	$K_{ни} < 1\%$
V3—19	1—3—10—30— —100—300 мв 1—3—10—30— —100—300 в	4	50 гц— 200 кгц	6	20 гц— —1 Мгц	Элек- тронная	$r_{вх} = 1 \text{ Мом,}$ ($f = 1 \text{ кгц}$), $C_{вх} \leq 15 \text{ пф}$	$K_a \leq 4$
VК7—7	1,5—5—15— —50—150 в	2,5	400 гц— —25 Мгц	6	100— —200 Мгц	Элек- тронная	$r_{вх} = 10 \text{ Мом,}$ ($f = 1 \text{ кгц}$), $r_{вх} = 5 \text{ ком,}$ ($f = 100 \text{ Мгц}$), $C_{вх} \leq 2—2,5 \text{ пф}$	

Тип прибора	Пределы измерения	Погрешность в номинальном диапазоне частот, %	Номинальный диапазон частот	Погрешность в расширенном диапазоне частот, %	Расширенный диапазон частот	Система прибора	Дополнительные характеристики	Примечание
Ф506	10—30—100— —300 мв 1—3—10—30— —100—300 в	1	20 гц— —40 кГц	2	40 кГц— —60 кГц	Электронная	$r_{вх}=1 \text{ Мом},$ $C_{вх} \leq 100 \text{ пф}$	
Ф534	0,3—1—3—10— —30—100— —300 в	0,5	40 гц— —20 кГц	1	20 гц— —40 кГц	Электронная	$r_{вх}=0,5 \text{ Мом},$ $C_{вх} \leq 50 \text{ пф}$	

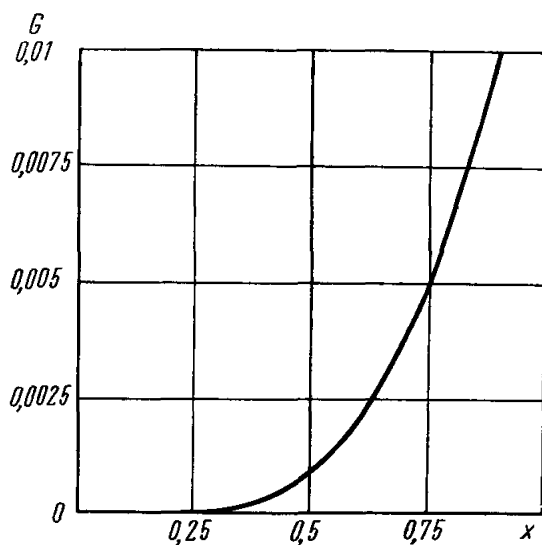
ГРАФИКИ

коэффициентов N , G и K (черт. 1, 2 и 3) и пример
расчета K_{ω} для провода марки ЛЭШО
 $12 \times 0,07$

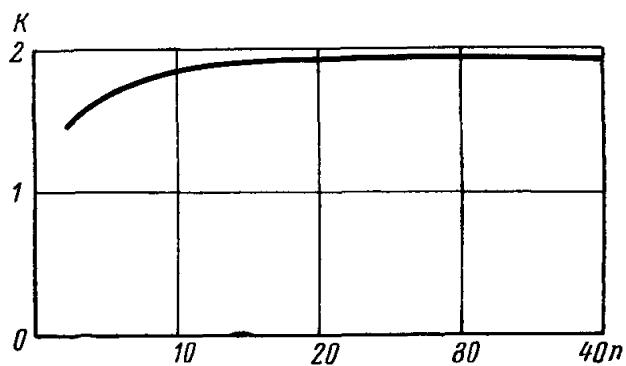
f , кгц	X	N	G	K_{ω}
100	0,25	1,0000	0,00006	1,000
200	0,34	1,0000	0,00020	1,0022
300	0,41	1,0000	0,00035	1,0039
500	0,53	1,0000	0,00122	1,0134
600	0,58	1,0005	0,00175	1,0198
1000	0,75	1,0015	0,00480	1,0543



Черт. 1



Черт. 2



Черт. 3

Редактор *Л. И. Горбасева*
 Техн. редактор *С. Н. Кобог*
 Корректор *И. Л. Хиниц*

Издательство стандартов. Москва, К-1, ул. Щусева, 4
 Сдано в наб. 10/III 1967 г. Подп. к печ. 31/V 1967 г. 2,5 печ. л. Тир. 10 000
 Тип. «Московский печатник». Москва, Лялин пер., 6. Зак. 553