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



gost.e-ecolog.ru

УДК 621.318.13

*Издание официальное*

СССР

Комитет стандартов, мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ

# 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

ГОСТ 12635—67

Группа Л99

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.

Срок введения 1/I 1969 г.

Перепечатка воспрещена

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 $D_г$ и средний $D_{ср}$ диаметры и площадь поперечного сечения $S$ по формулам:

$$D_г = \frac{D_н - D_в}{\ln \frac{D_н}{D_в}}, \qquad (1)$$

$$D_{ср} = \frac{D_н + D_в}{2}, \qquad (2)$$

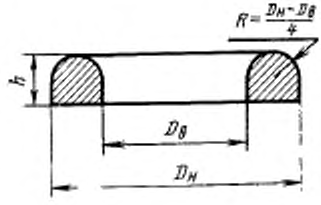
а) для образцов прямоугольного сечения:

$$S = \frac{D_н - D_в}{2} h, \qquad (3)$$

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

$$S = \frac{\pi}{2}\left(\frac{D_н - D_в}{4}\right)^2 + \frac{D_н - D_в}{2}\left(h - \frac{D_н - D_в}{4}\right). \qquad (4)$$

**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 | $10^{-1} - 100$ | $\mu'(L)$ | $\mu' = 10 - 10000$ | $\frac{\Delta\mu'}{\mu'} < 5\%$; $\left(\frac{\Delta L_x}{L_x} < 1\%\right)$ |
| | | | $\mathrm{tg}\delta_\mu\ (r_n,\ L)$ | $\mathrm{tg}\delta_\mu = 10^{-3} - 1$ | $\frac{\Delta \mathrm{tg}\delta_\mu}{\mathrm{tg}\delta_\mu} \leqslant 8\%$; $\left(\frac{\Delta r_n}{r_n} \leqslant 5\%\right)$ |
| | | | $\varrho_r$ | $\varrho_r \geqslant 1 \cdot 10^{-6}$ *ом/а* | |
| | | | $\varrho_в$ | $\varrho_в \leqslant 1 \cdot 10^{-9}$ 1/*гц* | $\frac{\Delta\varrho}{\varrho} < 20\%$; $\left(\frac{\Delta r_x}{r_x} \leqslant 1\%\right)$ |
| | | | $\varrho_д$ | $\varrho_д \geqslant 1 \cdot 10^{-4}$ | |
| | | | $p$ | $p \leqslant 10^{-6}$ *вт/кг* | $\frac{\Delta p}{p} \leqslant 10\%$; $\left(\frac{\Delta r_n}{r_n} \leqslant 5\%\right)$ |
| | | | $\beta_1$ | $\beta_1 \geqslant 0{,}5 \cdot 10^{-3}$ 1/*град* | $\frac{\Delta\beta_1}{\beta_1} < 20\%$; $\left(\frac{\Delta L_x}{L_x} < 1\%\right)$ |
| | | | $\beta_2$ | $\beta_2 \geqslant 2 \cdot 10^{-3}$ 1/*град* | $\frac{\Delta\beta_2}{\beta_2} < 30\%$; $\left(\frac{\Delta r_x}{r_x} \leqslant 1\%\right)$ |
| | | | $\mu' = F(f,\ H_m,\ H_-,\ t)$<br>$\mathrm{tg}\delta_\mu = F(f, H_m, H_-, t)$ | | |
| 2. Резонансный метод | 10 – 1000 | Неопределены** | $\mu'\ (L)$ | $\mu' = 10 - 10000$ | $\frac{\Delta\mu'}{\mu'} \leqslant 10\%$, $\left(\frac{\Delta L}{L} < 6\%\right)$ |

*Продолжение*

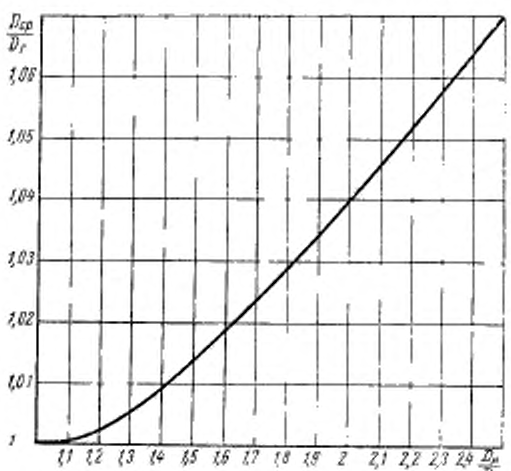
| Наименование метода | Пределы измерения по: частоте, кгц | Пределы измерения по: напряженности магнитного поля, а/м | Определяемые величины | Пределы определяемых величин | Погрешности* |
|---|---|---|---|---|---|
| 3. Индукционный метод | 10—1000 | 1—5000 | $tg\delta_\mu(Q)$ | $tg\delta_\mu = 10^{-3}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

* При многовитковом намагничивании.

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

Подсчет магнитных характеристик производят по гармоническому диаметру $D_г$. В зависимости от требуемой точности измерений и радиальной толщины образца, характеризуемой отношением $\frac{D_н}{D_в}$, гармонический диаметр $D_г$ 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:

$$\frac{\Delta D_{ср}}{D_{ср}} = \frac{2\Delta D}{D_н + D_в}, \qquad (5)$$

$$\frac{\Delta D_г}{D_г} = \frac{2\Delta D}{D_н - D_в} + \frac{D_в}{D_н} \cdot \frac{2\Delta D}{D_н}. \qquad (6)$$

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

а) для образцов прямоугольного сечения:

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{2\Delta D}{D_н - D_в} + \frac{\Delta h}{h}, \qquad (7)$$

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

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\frac{\pi}{8}(D_н - D_в)\Delta D + \frac{D_н - D_в}{2}\left(\Delta h + \frac{\Delta D}{2}\right) + \Delta D\left(h - \frac{D_н - D_в}{4}\right)}{S}. \qquad (8)$$

Если размеры образцов соответствуют размерам, приведенным в ГОСТ 8763—58, то при измерении $D_н$, $D_в$ и $h$ с погрешностью, не превышающей 0,1 *мм*, наибольшая относительная погрешность определения $D_{ср}$ лежит в пределах от 0,2 до 1%, $D_г$ — 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 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±10°К (25±10°С), относительной влажности воздуха до 80% и атмосферном давлении 100000±4000 *н/м*$^2$ (750±30 *мм рт. ст.*).

При определении магнитных характеристик материалов, обладающих температурными коэффициентами $\beta_1$ и $\beta_2$ свыше $1.10^{-3}$ 1/*град*, необходимо вносить поправки, вычисленные по формулам:

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

$$\mathrm{tg}\delta_{25} = \frac{\mathrm{tg}\delta_t}{1 + \beta_2(t-25)}, \qquad (10)$$

где $\mu_{25}$ и $\mathrm{tg}\delta_{25}$ — характеристики материала, определенные при температуре 25°С.

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:

$$w_1 = \sqrt{\frac{L_x D_{cp} \cdot 10^7}{4S\mu'}}, \qquad (11)$$

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:

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

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 уравновешивают 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 $\varrho_r$ 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) $\varrho_в$ 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 $\varrho_д \geqslant 1.10^{-3}$ определяют как разность между тангенсом угла потерь материала и суммой тангенсов угла потерь на гистерезис и частотных.

2.1.8. Коэффициент дополнительных потерь $\varrho_д$ 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 $\mathrm{tg}\delta_г$, 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 $I_=$, дроссель и источник питания.

Число витков обмотки подсчитывают по формуле:

$$w = \frac{\pi D_г}{I_=} \cdot H \ldots \qquad (13)$$

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 $\beta_1 \geqslant 0{,}5.10^{-3}$ 1/*град* и $\beta_2 \geqslant 2.10^{-3}$ 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:

$$H_m = \frac{w_1 I'_m}{\pi D_r} \quad \text{или} \quad H_m = \frac{w_1 I'_m}{\pi D_{ср}}, \tag{14}$$

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

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

Для сердечников с отношением $\frac{D_н}{D_в}$ 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:

$$I' = \frac{I}{1 + \omega^2 L_x C_L} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \mathrm{tg}^2 \delta_L}}. \tag{15}$$

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:

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

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:

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

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:

$$\mu' = \frac{L_x' D_r 10^7}{4Sw^2} \qquad (18)$$

или

$$\mu' = \frac{L_x' D_{cp} 10^7}{4Sw^2}; \qquad (19)$$

$$\mu' = \frac{M_x D_r 10^7}{4Sw^2} \qquad (20)$$

или

$$\mu' = \frac{M_x D_{cp} 10^7}{4Sw^2}, \qquad (21)$$

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

Индуктивность $L_x'$ находят по формуле:

$$L_x' = L_x\,(1 - \omega^2 L_x C_L) = L_x(1 - A). \qquad (22)$$

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

$$\frac{\Delta\mu'}{\mu'} = \frac{\Delta D_r}{D_r} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta L_x'}{L_x'}. \qquad (23)$$

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:

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

2.1.19. Тангенс угла потерь материала подсчитывают по формуле:

$$\operatorname{tg}\delta_\mu = \frac{r_n}{\omega L_x} \qquad (25)$$

или (в случае многовитковой обмотки)

$$\operatorname{tg}\delta_\mu = \frac{r_n}{\omega L_x} = \frac{r'_x - r'_0}{\omega L'_x}, \qquad (26)$$

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:

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

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:

$$r_0' = r_0 K_\omega , \qquad (28)$$

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:

$$K_\omega = \frac{r_0'}{r_0} = N + K\left(\frac{n d_s}{d_0}\right)^2 G, \qquad (29)$$

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:

$$\frac{\Delta \mathrm{tg}\delta_\mu}{\mathrm{tg}\delta_\mu} = \frac{\Delta r_n}{r_n} + \frac{\Delta\omega}{\omega} + \frac{\Delta L_x'}{L_x'} . \qquad (30)$$

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

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

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 $H_m = \mathrm{const}$ по формуле:

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

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:

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

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 $\varrho_д \geqslant 1.10^{-3}$ подсчитывают по формуле:

$$\rho_д = \operatorname{tg}\delta_\mu - (\operatorname{tg}\delta_r + \operatorname{tg}\delta_э) = \operatorname{tg}\delta_\mu - \rho_r H_m - \rho_э f. \qquad (34)$$

При измерениях на мосте взаимной индуктивности коэффициент дополнительных потерь $\varrho_д \geqslant 1.10^{-4}$ (п. 2.1.8) подсчитывают по формуле:

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

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*.

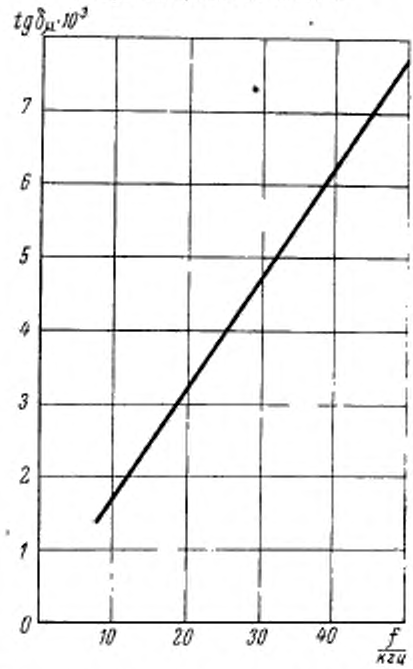
2.1.25. Для получения значений коэффициентов потерь допускается применение графических методов, при этом по оси ординат откладывают значения тангенса угла потерь, а по оси абсцисс — значения частоты или напряженности магнитного поля.

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

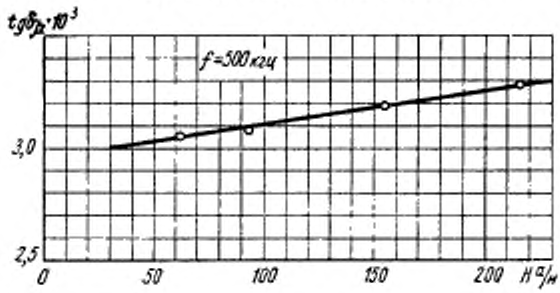
Коэффициент дополнительных потерь графически выражается отрезком на оси ординат, соответствующим $\operatorname{tg}\delta_\mu$ при $f=0$ и $H_m=0$ и отсекаемым при экстраполяции прямых $\operatorname{tg}\delta_\mu = F_1(f)$ или $\operatorname{tg}\delta_\mu = F_2(H_m)$.

**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:

$$\frac{\Delta Q_в}{Q_в} = \frac{\frac{1}{f_2}\Delta r_{n_2} + \frac{1}{f_1}\Delta r_{n_1}}{\frac{1}{f_2} r_{n_2} - \frac{1}{f_1} r_{n_1}}. \qquad (36)$$

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

$$\frac{\Delta Q_г}{Q_г} = \frac{2\Delta r_n}{r_{n_2} - r_{n_1}} + \frac{\Delta H_{m_2} + \Delta H_{m_1}}{H_{m_2} - H_{m_1}} + \frac{\Delta L_x'}{L_x'}, \qquad (37)$$

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:

$$\frac{\Delta Q_д}{Q_д} = \frac{\Delta \operatorname{tg}\delta_L + \Delta Q_г H_m + Q_г \Delta H_m + f\Delta Q_в}{Q_д}. \qquad (38)$$

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

$$\frac{\Delta Q_д}{Q_д} = \frac{\Delta\left(Q_д + Q_г H_m\right) + \left(\frac{\Delta Q_г}{Q_г} + \frac{\Delta H_m}{H_m}\right) Q_г H_m}{Q_д}. \qquad (39)$$

Погрешность члена $\Delta(Q_д + Q_г H_m)$ подсчитывают по формуле:

$$\Delta(Q_д + Q_г H_m) = \Delta H_m Q_г \frac{f_2 + f_1}{f_2 - f_1} + 2\Delta C_3 \frac{f_2 \cdot f_1}{f_2 - f_1} 2\pi r_3, \qquad (40)$$

где:

$\Delta C_3$ — абсолютная погрешность емкости $C_3$, уравновешивающей 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 $\varrho_в = 1.10^{-9}$ 1/гц, $\varrho_г = 1.10^{-6}$ м/а, $\varrho_д = 1.10^{-4}$) 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:

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

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

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

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:

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

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°С.

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

$$\frac{\Delta\beta_1}{\beta_1} = \frac{2\Delta\mu_1'}{\mu_2' - \mu_1'} + \frac{\Delta\mu_1'}{\mu_1'} + \frac{2\Delta t_1}{t_2 - t_1}. \qquad (44)$$

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:

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

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:

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

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

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

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 $\beta_2 \geqslant 2 \cdot 10^{-3}$ 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 многовитковая, так и одновитковая обмотка (одновитковая рамка, коаксиальный держатель, высокочастотный пермеаметр). Методы определения магнитных характеристик при одновитковом намагничивании аналогичны изложенным в ГОСТ 12636—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 многовитковой обмоткой находят по формуле:

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

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

2.2.3. При испытании образца с многовитковой 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 многовитковой 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:

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

Если погрешность куметра по частоте не превышает ±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:

$$\operatorname{tg}\delta_\mu = \frac{1}{Q_x} - \frac{r_0'}{\omega L_x'}, \qquad (50)$$

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:

$$\frac{\Delta \operatorname{tg}\delta_\mu}{\operatorname{tg}\delta_\mu} = \frac{\frac{\Delta Q}{Q^2} + \left(\frac{\Delta r_0'}{r_0'} + \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta L_x'}{L_x'}\right)\frac{r_0'}{\omega L_x'}}{\operatorname{tg}\delta_\mu}. \qquad (51)$$

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:

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

где $C_1$ и $C_2$ — емкости при резонансе, соответствующие температурам $t_1$ и $t_2$, *ф*.

Примечание. При погрешности температуры не более ±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 $5.10^{-3}$ 1/*град*.

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

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

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:

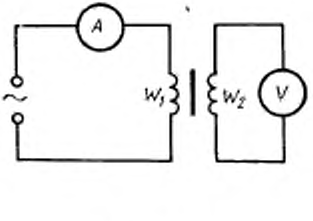
$$\frac{\Delta\beta_2}{\beta_2} = \frac{2\Delta Q}{Q_1 - Q_2} + \frac{\Delta Q_2}{Q_2} + \frac{2\Delta t}{t_2 - t_1}. \qquad (54)$$

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*.

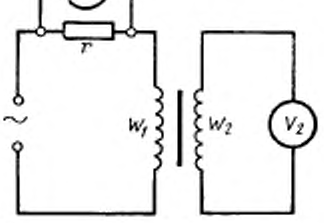
2.3. Индукционный метод

2.3.1. Индукционный метод определения перечисленных в таблице величин заключается в измерении намагничивающего тока в первичной обмотке образца, э. д. с., индуктированной 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

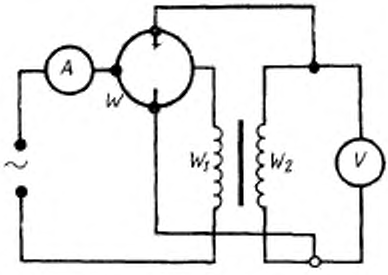
Примечание. В приложении 3 даны перечень соответствующих амперметров, миллиамперметров и микроамперметров и их основные технические характеристики.

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

Если форма кривой э. д. с., индуктированной 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:

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

где $U_{2ср}$ 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., индуктированные 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., индуктированной 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:

$$B_{max} = \frac{U_{2ср}}{4fSw_2} = \frac{U_2}{4K_f fSw_2}. \quad (58)$$

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

$$\frac{\Delta B_{max}}{B_{max}} = \frac{\Delta U_2}{U_2} + \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta K_f}{K_f} + \frac{\Delta U_{1cp}}{U_{1cp}} + \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta S}{S}. \quad (59)$$

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:

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

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 $r_2' \geqslant 100\, r_2$) поправочным членом $\left(1+\frac{r_2}{r_2'}\right)$ можно пренебречь.

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

$$\frac{\Delta p}{p}=\frac{\frac{\Delta P_1}{P_1}+\frac{2U^2}{\frac{w_1}{w_2}P_1r_2'}\cdot\frac{\Delta U}{U}}{1-\frac{U^2}{\frac{w_1}{w_2}P_1r_2'}}+\frac{\Delta m}{m} \qquad (62)$$

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 ($\beta_1 \geqslant \pm 20 \cdot 10^{-6}$ 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.

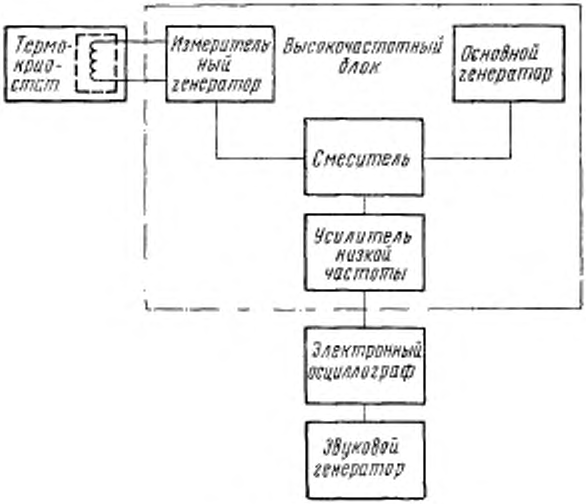
С помощью электронного осциллографа сравнивают разностную частоту, полученную при смешении колебаний двух высокочастотных генераторов (основного и измерительного), с частотой генератора звуковых частот.

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 $10.10^{-6}$ 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°К, 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 термокриостате, 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 термокриостате.

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:

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

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:

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

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 термокриостате 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

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ *гн/м* — магнитная постоянная;

$\mu_\sim$ — относительная амплитудная магнитная проницаемость;

$\mu'$ — действительная составляющая относительной комплексной магнитной проницаемости $\underline{\mu}$;

$\mu_{25}$ — то же, при температуре 25°С;

$\mu''$ — мнимая составляющая относительной комплексной магнитной проницаемости $\underline{\mu}$;

$\mu_{об}$ — относительная обратимая магнитная проницаемость;

$\alpha_и$ — коэффициент амплитудной нестабильности проницаемости, *м/а*;

$tg\delta_\mu$ — тангенс угла магнитных потерь;

$tg\delta_{25}$ — то же, при температуре 25°С;

$tg\delta_г$ — тангенс угла потерь на гистерезис;

$tg\delta_в$ — тангенс угла частотных потерь;

$\varrho_г$ — коэффициент потерь на гистерезис, *м/а*;

$\varrho_в$ — коэффициент частотных потерь, *1/гц*;

$\varrho_д$ — 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*;

$H_=$ — 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, *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*;
$r_o$ — 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*;
$r_м$ — 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*;
$C_L$ — 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;
$D_н$, $D_в$, $D_{ср}$, $D_г$ — наружный, внутренний, средний и гармонический диаметры кольцевого образца, *м*;
$S$ — площадь поперечного сечения образца, *м²*;
$h$ — толщина образца, *м*;
$m$ — масса образца, *кг*;
$K_f$ — коэффициент формы кривой напряжения;
$K_{нк}$ — 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.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ

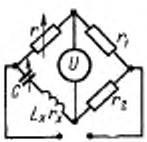
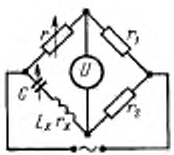
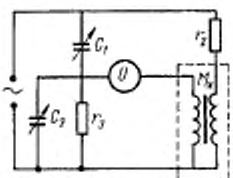
**аппаратуры, применяемой при испытаниях образцов магнитномягких материалов мостовым методом**

| 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 $L_x$<br>5 для $r_x$ | 0,3 для $L_x$<br>1 для $r_x$<br>10 для $Q_r$ и $Q_в$ | 0,5 для $M_x$<br>10 для $Q_д$ и $Q_г$ |
| Магазин сопротивления: | | | |
| а) пределы | (1—$10^4$) *ом* + реохорд на 1,1 *ом* | ($10^{-3}$—$10^2$) *ом*, $r_0$ = 0,4 *ом* | — |
| б) погрешность, % | 0,1 | 0,1 | — |
| в) дополнительные характеристики | — | $L_0 \approx 0{,}4$ *мкгн*, $\Delta L \leqslant 0{,}1$ *мкгн*. Измерение сопротивления с частотой (до 1 *Мгц*) не превышает 0,1% | — |
| Постоянные сопротивления: | | | |
| а) пределы, *ом* | $r_1 = r_2 = 100$ | $r_1 = r_2 = 5$ | $r_3 = 159$; $r_2 = 314$ |

*Продолжение*

| Наименование аппаратуры и ее параметров | Основные характеристики аппаратуры | | |
|---|---|---|---|
| | Мост по резонансной схеме (измерительная установка УИМ-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, *сек* | $<1.10^{-7}$ | $\leqslant 1.10^{-8}$ | $<1.10^{-8}$ |
| Магазин емкости: | | | |
| а) пределы | (0,0001—1) *мкф* | (50—11150) *пф*—воздушные конденсаторы<br>(0,01—1) *мкф*—слюдяные конденсаторы | $C_1$=(50—10000) *пф*<br>$C_3$=(20—1500) *пф* |
| б) погрешность | 0,1% | Воздушные конденсаторы: $0.05\left(1+\frac{100}{C}\right)\%$, где $C$—емкость в *пф*<br>Слюдяные конденсаторы: 0,1% | $0,05\left(1+\frac{100}{C}\right)\%$, где $C$—емкость в *пф* (для $C_1$)<br>0,1% (для $C_3$) |
| в) тангенс угла потерь конденсаторов | $\leqslant 5\cdot10^{-4}$ | $\leqslant 5\cdot10^{-5}$ (для воздушных конденсаторов)<br>$<5\cdot10^{-4}$ (для слюдяных конденсаторов) | $\leqslant 5\cdot10^{-5}$ (для $C_1$)<br>$\leqslant 1\cdot10^{-3}$ (для $C_3$) |
| Индикатор: | | | |
| а) чувствительность *дел/мкв* | 0,2—1 | 0,2—1 | 5 |

*Продолжение*

| 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) избирательность, *дб* | 50 | 50 | 50 |
| Генератор: | | | |
| а) выходная мощность, *вт* | 10 | 10 | 10 |
| б) искажения, % | $<1$ | $<1$ | $\leqslant 1$ |
| в) погрешность, % | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Схемы и уравнения равновесия |  $L_x = \frac{1}{\omega^2 C}$ ; $r_x = r \cdot \frac{r_2}{r_1}$ |  $L_x = \frac{1}{\omega^2 C}$ ; $r_x = r \cdot \frac{r_2}{r_1}$ |  $M_x = C_1 r_2 r_3$, $tg\delta_0 = \omega C_3 r_3$ |

## 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 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Т13 | 1–3 *ма* | 1,5 | 50 *гц*—15 *Мгц* | 3 | 15—40 *Мгц* | Термоэлектрическая | |
| Т15 | 10—30—50 *ма*<br>100 *ма*<br>300 *ма* | 1 | 20 *гц*—25 *Мгц*<br>20 *гц*—20 *Мгц*<br>20 *гц*—10 *Мгц* | 2 | до 75 *Мгц*<br>до 60 *Мгц*<br>до 30 *Мгц* | Термоэлектрическая | |
| Т15/1 | 5 *ма* | 1 | 20 *гц*—25 *Мгц* | 2 | до 75 *Мгц* | Термоэлектрическая | |
| Т18 | 0,5—1—2; 5 *а* | 1,5 | 50 *гц*–2 *Мгц* | 3 | 2—5 *Мгц* | Термоэлектрическая | |
| Т133 | 100—250—500—<br>—1000 *мка* | 1,5 | 20 *гц*—0,5 *Мгц* | 3 | 0,5—1 *Мгц* | Термоэлектрическая | $C_{вх} \leqslant 15$ *пф*<br>$U = 60$ *мв* |
| Ф506 | 10—30—100—<br>—300 *мка*<br>1—3—10—30—<br>—100—300 *ма* | 1,0 | 20 *гц*—40 *кгц* | 2 | 40 *кгц*—60 *кгц* | Электронная | $U = 10$—$40$ *мв* |
| Ф533 | 0,03—0,1—0,3—1—<br>—3—10—30—100—<br>—300—1000 *ма* | 0,5 | 40 *гц*—20 *кгц* | 1 | 20 *гц*—50 *кгц* | Электронная | $U = 0{,}3$ *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 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Т16 | 0,75—1,5—3 *в*<br>7,5—15—30 *в* | 1,5 | 20 *гц*—20 *Мгц*<br>20 *гц*—15 *Мгц* | 3 | 20—40 *Мгц* | Термоэлектрическая | $C_{вх}<3,5$ *пф*, $I=3$ *ма* | |
| Т132 | 3—7,5—15—30 *в* | 1,5 | 20 *гц*—200 *кгц* | 3 | 0,2—0,4 *Мгц* | Термоэлектрическая | $r_{вх}=10$ *ком/в*, $C_{вх}\leqslant 15$ *пф* | |
| Т131 | 75—150—300 *мв*<br>750—1500 *мв* | 1,5 | 20 *гц*—1 *Мгц*<br>20 *гц*—0,5 *Мгц* | 3 | 1—2 *Мгц*<br>0,5—1 *Мгц* | Термоэлектрическая | $r_{вх}=10$ *ком/в*, $C_{вх}\leqslant 15$ *пф* | |
| В3-2А | 10—30—100—300 *мв*<br>1—3—10—30—100—300 *в* | 2,5 | 55 *гц*—20 *кгц* | 4<br>6 | 40 *гц*—400 *кгц*<br>20 *гц*—1 *Мгц* | Электронная | $r_{вх}\geqslant 1$ *Мом*, ($f=1000$ *гц*), $C_{вх}$ (10 *мв*—1 *в*) $\leqslant$ $\leqslant 25$ *пф*, $C_{вх}\leqslant 15$ *пф* (3—300 *в*) | |
| В3-3 | 10—30—100—300—1000 *мв* | 3 | 50 *гц*—20 *кгц* | 5 | 30 *гц*—5 *Мгц* | Электронная | $r_{вх}=1$ *Мом*, $K_{вн}<1\%$, $C_{вх}\leqslant 10$ *пф* | |

*Продолжение*

| 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 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| В3–4 | 10–30–100–300–1000 *мв* | 2,5 | 400 *гц* – –20 *кгц* | 4 | 20 *гц* – –500 *кгц* 500 *кгц* – –5 *Мгц* | Электронная | $r_{вх}$=1 *Мом*, $C_{вх}$<12 *пф* | $K_{ни}$<1% |
| В3–5 | 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* | Электронная | $r_{вх}\geqslant$600 *ком*, ($f$=1000 *гц*), $C_{вх}\leqslant$12–25 *пф* | $K_{в}$<4 |
| В3–6 | 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* | Электронная | $r_{вх}$=5 *Мом*, ($f$=400 *гц*), $C_{вх}\leqslant$25 *пф* | для $f$<20 *кгц* $K_{ни}\leqslant$10%, $\gamma_{доп}$=3%, $K_{ни}\leqslant$20%, $\gamma_{доп}$=4%, $K_{ни}\leqslant$100%, $\gamma_{доп}$=8%, |
| В3–7 | 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 *Мом*, $C_{вх}\leqslant$25 *пф* | $K_{ни}$<1% |

*Продолжение*

| 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* | | | |
| В3—9 | 20—1250 *мв* | $0{,}2+\frac{0{,}08}{U_x}$ | 1000 *гц*—30 *Мгц* | — | — | — | — | $\gamma_{изм}=0{,}5\ K_f$ для $K_f<15\%$ |
| В3—12 | 20—50 *мв* 0,1—0,3—1—3 *в* | 4 | 100 *кгц*—150 *Мгц* | 6 | 150—200 *Мгц* | Электронная | $r_{вх}\geqslant 10$ *ком*, ($f=100$ *Мгц*), $C_{вх}\leqslant 2$ *пф* | |
| В3—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* | Электронная | $r_{вх}=1-5$ *ком*, ($f=1$ *кгц*), $C_{вх}\leqslant 2-5$ *пф* | $K_{вн}<1\%$ |
| В3 -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* | Электронная | $r_{вх}=1$ *Мом*, ($f=1$ *кгц*), $C_{вх}<15$ *пф* | $K_д<4$ |
| ВК7—7 | 1,5—5—15—50—150 *в* | 2,5 | 400 *гц*—25 *Мгц* | 6 | 100—200 *Мгц* | Электронная | $r_{вх}=10$ *Мом*, ($f=1$ *кгц*), $r_{вх}=5$ *ком*, ($f=100$ *Мгц*), $C_{вх}\leqslant 2-2{,}5$ *пф* | |

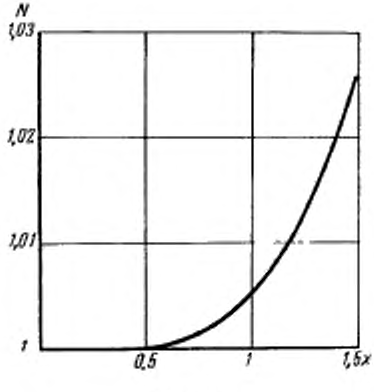
*Продолжение*

| 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—<br>—300 *мв*<br>1—3—10—30—<br>—100—300 *в* | 1 | 20 *гц*—<br>—40 *кгц* | 2 | 40 *кгц*—<br>—60 *кгц* | Электронная | $r_{вх}$=1 *Мом*,<br>$C_{вх} \leqslant 100$ *пф* | |
| Ф534 | 0,3—1—3—10—<br>—30—100—<br>—300 *в* | 0,5 | 40 *гц*—<br>—20 *кгц* | 1 | 20 *гц*—<br>—40 *кгц* | Электронная | $r_{вх}$=0,5 *Мом*,<br>$C_{вх} \leqslant 50$ *пф* | |

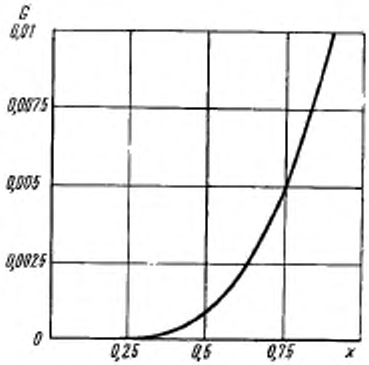
## ГРАФИКИ

**коэффициентов $N$, $G$ и $K$ (черт. 1, 2 и 3) и пример расчета $K_\omega$ для провода марки ЛЭШО 12×0,07**

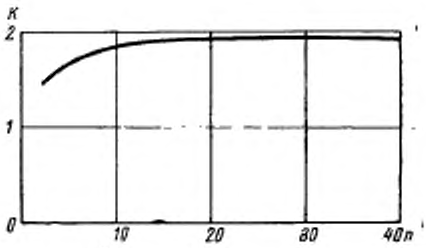
| $f$, кгц | $X$ | $N$ | $G$ | $K_\omega$ |
|---|---|---|---|---|
| 100 | 0,25 | 1,0000 | 0,00006 | 1,000 |
| 200 | 0,34 | 1,0000 | 0,00020 | 1,0022 |
| 300 | 0,41 | 1,0000 | 0,00035 | 1,0039 |
| 500 | 0,53 | 1,0000 | 0,00122 | 1,0134 |
| 600 | 0,58 | 1,0005 | 0,00175 | 1,0198 |
| 1000 | 0,75 | 1,0015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




Черт. 1




Черт. 2




Черт. 3

Редактор *Л. И. Горбачева*
Техн. редактор *С. Н. Кобот*
Корректор *И. Л. Хинец*

gost.e-ecolog.ru

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