

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ И ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ СО ЗНАЧИТЕЛЬНЫМИ ПОТЕРЯМИ

Я. П. Цар

Харьков

В связи с ограниченной чувствительностью измерителей магнитной проницаемости возникают дополнительные погрешности измерений, называемые порогами чувствительности по измеряемой величине.

Как правило, измерители комплексной магнитной проницаемости состоят из пермеаметра и куметра, обладающего определенной величиной порога чувствительности индикатора резонанса модуля напряжения на контуре. В связи с этим становится невозможным точное установление резонансного состояния измерительного контура, что в конечном итоге приводит к возникновению порога чувствительности по измеряемой величине, т. е. к дополнительным погрешностям измерений компонентов комплексной магнитной проницаемости.

Ниже на основании анализа структурной измерительной схемы установки пермеаметр — куметр найдены общие выражения чувствительности и порогов чувствительности по компонентам комплексной магнитной проницаемости.

ВЫВОД ОСНОВНЫХ СООТНОШЕНИЙ

Структурная измерительная схема установки пермеаметр — куметр, представленная на рисунке, преобразует измеряемую величину — комплексную магнитную проницаемость — в отклонение указателя индикатора резонанса.



Рис. Структурная измерительная схема установки пермеаметр-куметр.

Воспользуемся одной из форм чувствительности [1]:

$$S^{\mu} = \lim_{\Delta \bar{\mu} \rightarrow 0} \frac{\bar{\mu} - 1}{U_a} \frac{\Delta U_a}{\Delta \bar{\mu}} = (\bar{\mu} - 1) \frac{\partial \ln U_a}{\partial \bar{\mu}}, \quad (1)$$

где $\frac{\Delta U_a}{U_a}$ — относительное приращение отклонения указателя индикатора резонанса при относительном изменении магнитной проницаемости на $\frac{\Delta \bar{\mu}}{\bar{\mu}}$.

Выражение (1) также связывает относительные пороги чувствительности индикатора резонанса по отклонению $\left(\frac{\Delta U_a}{U_a}\right)_n$ и измерительной установки по комплексной магнитной проницаемости $\left(\frac{\Delta \bar{\mu}}{\bar{\mu}}\right)_n$, т. е. имеет место соотношение

$$\left(\frac{\Delta U_a}{U_a}\right)_n = |S^{\bar{\mu}}| \left(\frac{\Delta \bar{\mu}}{\bar{\mu}}\right)_n. \quad (2)$$

Таким образом, задача сводится к определению порога чувствительности по комплексной магнитной проницаемости, т. е. дополнительной погрешности измерений, связанной с ограниченной чувствительностью индикатора резонанса. Для ее решения необходимо на основании анализа структурной измерительной схемы определить комплектную чувствительность измерительной установки:

$$S^{\bar{\mu}} = \left(\frac{1}{S^{\mu'}} - \frac{1}{S^{\mu''}}\right)^{-1}, \quad (3)$$

где

$$S^{\mu'} \cong \frac{\partial \ln U_a}{\partial \mu'} \quad (4)$$

— чувствительность измерительной установки к действительной части комплексной магнитной проницаемости;

$$S^{\mu''} \cong \frac{-\partial \ln U_a}{\partial \mu''} \quad (5)$$

— чувствительность измерительной установки к мнимой части комплексной магнитной проницаемости;

$\frac{\Delta \bar{\mu}}{\bar{\mu}} - 1$ — относительное изменение магнитной проницаемости;

$\frac{\Delta U_a}{U_a}$ — относительное изменение напряжения на выходе индикатора резонанса.

Изменения компонент комплексной магнитной проницаемости

$$\Delta \mu' = \frac{\partial \mu'}{\partial C} \Delta C + \frac{\partial \mu'}{\partial Q} \Delta Q; \quad (6)$$

$$\Delta \mu'' = \frac{\partial \mu''}{\partial C} \Delta C + \frac{\partial \mu''}{\partial Q} \Delta Q, \quad (6a)$$

вызывающие нарушение резонансного состояния измерительного контура, приводят к необходимости изменения емкости контура на ΔC для восстановления нарушенного резонансного состояния. Одновременно с этим произойдет снижение добротности контура на величину ΔQ .

Из выражений (3) — (6) чувствительность измерительной установки к компонентам комплексной магнитной проницаемости будет:

$$S^{\mu'} = \frac{S_{U_a}^k}{\frac{1}{S_{kC}^{\mu'}} + \frac{1}{S_{kQ}^{\mu'}}}; \quad (7)$$

$$S^{\mu''} = \frac{S_{U_a}^k}{\frac{1}{S_{kC}^{\mu''}} + \frac{1}{S_{kQ}^{\mu''}}}, \quad (8)$$

где

$$S_{kc}^{\mu'} = S_{U_k}^c \cdot S_c^{\mu'} \quad (9)$$

— чувствительность измерительного контура к действительной части комплексной магнитной проницаемости по емкости;

$$S_{kQ}^{\mu'} = S_{U_k}^Q \cdot S_Q^{\mu'} \quad (10)$$

— чувствительность измерительного контура к действительной части комплексной магнитной проницаемости по добротности;

$$S_{kc}^{\mu''} = S_{U_k}^c \cdot S_c^{\mu''} \quad (11)$$

— чувствительность измерительного контура мнимой части комплексной магнитной проницаемости по емкости;

$$S_{kc}^{\mu''} = S_{U_k}^Q \cdot S_Q^{\mu''} \quad (12)$$

— чувствительность измерительного контура к мнимой части комплексной магнитной проницаемости по добротности;

$$S_{U_k}^c = C \frac{\partial \ln U_k}{\partial C} \quad (13)$$

— чувствительность измерительного контура к емкости по напряжению на элементе контура U_k ;

$$S_c^{\mu'} = \frac{1}{C \frac{\partial \ln \mu'}{\partial C}} \quad (14)$$

чувствительность измерительной схемы к действительной части комплексной магнитной проницаемости по емкости;

$$S_{U_k}^Q = Q \frac{\partial \ln U_k}{\partial Q} \quad (15)$$

чувствительность измерительного контура к добротности по напряжению U_k на элементе измерительного контура;

$$S_Q^{\mu'} = \frac{1}{Q \frac{\partial \ln \mu'}{\partial Q}} \quad (16)$$

чувствительность измерительной схемы к действительной части комплексной магнитной проницаемости по добротности;

$$S_c^{\mu''} = \frac{1}{C \frac{\partial \ln \mu''}{\partial C}} \quad (17)$$

чувствительность измерительной схемы к мнимой части комплексной магнитной проницаемости по емкости;

$$S_Q^{\mu''} = \frac{1}{Q \frac{\partial \ln \mu''}{\partial Q}} \quad (18)$$

чувствительность измерительной схемы к мнимой части комплексной магнитной проницаемости по добротности;

$$S_{U_a}^{U_k} = U_k \frac{\partial \ln U_a}{\partial U_k} \quad (19)$$

чувствительность индикатора резонанса к напряжению на контуре по выходному напряжению;

U_k — напряжение на элементе измерительного контура куметра;

U_a — напряжение на выходе индикатора резонанса.

На основании формул (3) — (19) общее выражение комплектной чувствительности установки

$$S^{\bar{\mu}} = \frac{S_{U_n}^{U_k} (1 - j \operatorname{tg} \delta)}{\left(\frac{1}{S_{U_k}^c \cdot S_c^{\mu'}} + \frac{1}{S_{U_k}^Q \cdot S_Q^{\mu''}} \right) - j \operatorname{tg} \delta \left(\frac{1}{S_{U_k}^c \cdot S_c^{\mu''}} + \frac{1}{S_{U_k}^Q \cdot S_Q^{\mu'}} \right)}, \quad (20)$$

где $\operatorname{tg} \delta$ — тангенс угла магнитных потерь исследуемого сердечника.

Из анализа основных выражений [2, 3], связывающих комплексную магнитную проницаемость с резонансной емкостью и добротностью измерительного контура, вытекает, что добротность пермеаметра с испытуемым сердечником в первом приближении не зависит от действительной части комплексной магнитной проницаемости. В связи с этим при $S_Q^{\mu''} = \infty$ из выражения (20) получим приближенное выражение комплектной чувствительности измерительной установки пермеаметр — куметр

$$S^{\bar{\mu}} = \frac{S_{U_n}^{U_k} (1 - j \operatorname{tg} \delta)}{\frac{1}{S_{U_k}^c \cdot S_c^{\mu'}} - j \operatorname{tg} \delta \left(\frac{1}{S_{U_k}^c \cdot S_c^{\mu''}} - \frac{1}{S_{U_k}^Q \cdot S_Q^{\mu''}} \right)}. \quad (21)$$

Характерной особенностью комплектной чувствительности является то, что ее величина равна нулю чувствительности хотя бы одного из промежуточных преобразователей.

Из всех чувствительностей только чувствительности (14), (16—18) измерительной схемы к компонентам магнитной проницаемости изменяются при измерениях, так как зависят от параметров исследуемого материала.

Рассмотрим более подробно чувствительности промежуточных преобразователей.

Для определения чувствительностей измерительной схемы к компонентам комплексной магнитной проницаемости воспользуемся выражениями работы [2, 3]

$$\mu' - 1 = \frac{C_x L_{2x}}{C_k L_a} \cdot \frac{C_k - C}{C - C_x}; \quad (22)$$

$$\mu'' = (\mu' - 1) \left[\operatorname{tg} \delta_{2x} + \frac{C_k}{Q} \frac{C}{Q_k} + \frac{C_x - C}{C - C_x} \right], \quad (23)$$

связывающими результаты прямых измерений с компонентами магнитной проницаемости. Здесь Q_x , Q , Q_k ; C_x , C , C_k — добротности и резонансные емкости первичной цепи соответственно разомкнутого и замкнутого пермеаметров с испытуемым сердечником и без него (L_{2x} и $\operatorname{tg} \delta_{2x}$ — индуктивность и тангенс угла потерь вторичной цепи). Для упрощения формул удобно принять обозначения

$$k = \frac{C_k}{C_x}; \quad x = \frac{C}{C_k}.$$

На основании формул (14), (16), (17), (18), (22) и (23) находим чувствительности измерительной схемы к компонентам комплексной магнитной проницаемости по емкости и добротности соответственно:

$$S_c^{\mu'} = - \frac{(1-x)(kx-1)}{(k-1)x}; \quad (24)$$

$$S_Q^{\mu''} = \infty; \quad (25)$$

$$S_c^{\mu''} = \frac{\operatorname{tg} \delta}{kx \left(\frac{1}{Q_x} - \frac{1}{Q} \right) x \left(\frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_k} \right)}{\frac{(kx - 1)^2}{(1-x)^2}}; \quad (26)$$

$$S_c^{\mu''} = S_c^{\mu'} Q \operatorname{tg} \delta. \quad (27)$$

Рассмотрим характер изменения отдельных чувствительностей. Чувствительность $S_c^{\mu'}$ (24) отрицательна, что указывает на необходимость уменьшения резонансной емкости контура куметра при увеличении действительной части комплексной магнитной проницаемости.

Абсолютная величина чувствительности $S_c^{\mu'}$ достигает максимального значения

$$(S_c^{\mu'})_{\max} = \frac{\sqrt{k} - 1}{\sqrt{k} + 1} \quad (28)$$

при нормированной резонансной емкости $x = \frac{1}{\sqrt{k}}$. Чувствительность измерительной схемы к мнимой части комплексной магнитной проницаемости по добротности по (27) отличается от рассмотренной чувствительности только постоянным множителем.

Уравнение (25) указывает на тот факт, чувствительность измерительной схемы к действительной части комплексной магнитной проницаемости равна бесконечности, так как требуется бесконечное приращение добротности контура для того, чтобы восстановить резонанс, нарушенный конечным приращением действительной части комплексной магнитной проницаемости.

Характерным для чувствительности $S_c^{\mu''}$ (26) является полюс при нормированной емкости

$$x_n = \frac{a+b}{a+bk} + \sqrt{\left(\frac{a+b}{a+bk} \right)^2 - \frac{a+\frac{b}{k}}{a+bk}}, \quad (29)$$

где

$$a = \frac{1}{Q_x} - \frac{1}{Q}; \quad b = \frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_k}.$$

В связи с тем, что исследование экстремальных свойств выражения (26) чувствительности измерительной схемы к потерям по емкости сводится к нахождению громоздких решений четвертой степени, малопригодных для использования в практике, ограничимся лишь анализом характера функций.

Чувствительность $S_c^{\mu''}$ по абсолютной величине растет от нуля при $x = \frac{1}{k}$ до бесконечности в точке x_n , затем плавно падает до нуля при $x = 1$. При измерениях параметров материалов с низкими потерями выполняется неравенство $a > 0 > b$ и увеличивается чувствительность от 0 до $+\infty$ при изменении нормированной резонансной емкости от $x = \frac{1}{k}$ до $x = x_n$. В точке $x = x_n$ чувствительность меняет знак и при дальнейшем увеличении x до $x = 1$ изменяется от $-\infty$ до 0. Чувствительность $S_c^{\mu''}$ меняет знак в точке x_n и в случае $a < 0 < b$, что соответствует исследованиям параметров материалов со значительными потерями.

В тех случаях, когда магнитные потери исследуемого сердечника близки к потерям вторичной цепи пермеаметра, у которого $Q_x = Q_k$, что

имеет место на частотах 0,5—10 Мгц, чувствительность $S_c^{\mu'}$ равна бесконечности при произвольном значении нормированной резонансной емкости. Это указывает на то, что равновесие измерительной схемы, нарушенное приращением потерь исследуемого сердечника, не может быть восстановлено конечным изменением резонансной емкости контура, величина которой зависит от действительной части комплексной магнитной проницаемости.

Из анализа общего выражения чувствительности (20) следует, что в связи с переменной знака чувствительностей промежуточных преобразователей абсолютная величина комплексной чувствительности может изменяться в значительных пределах.

Чувствительности измерительного контура (13), (15) к добротности и к емкости по напряжению U_k следующие:

$$S_{U_k}^Q = 1; \quad (30)$$

$$S_{U_k}^c = Q^2 \left(-\frac{\Delta C}{C} \right), \quad (31)$$

где $\frac{\Delta C}{C}$ — относительная расстройка измерительного контура;

Q — добротность измерительного контура.

В работе [4] показано, что чувствительность индикатора резонанса к напряжению на контуре по выходному напряжению для промышленных типов куметров равна единице.

Таким образом, на основании формул (24) — (31) при известных параметрах пермеаметра, а также резонансной емкости и добротности измерительного контура с исследуемым сердечником возможно определение чувствительностей промежуточных преобразователей и численного значения комплексной чувствительности измерительной установки (21).

Используя выражения (2), (7), (8), находим пороги чувствительности по компонентам магнитной проницаемости, т. е. дополнительные погрешности измерений, связанные с ограниченной чувствительностью индикатора резонанса,

$$\left(\frac{\Delta \mu'}{\mu'} \right)_n = \frac{\left(\frac{\Delta U_a}{U_a} \right)_n}{S_{U_a}^k S_{U_k}^c (S_c^{\mu'})_{\text{мин}}}; \quad (32)$$

$$\left(\frac{\Delta \mu''}{\mu''} \right)_n = \frac{\left(\frac{\Delta U_a}{U_a} \right)_n}{S_{U_a}^k} \left(\frac{1}{S_{U_k}^c S_c^{\mu'}} - \frac{1}{S_{U_k}^Q S_Q^{\mu''}} \right). \quad (33)$$

Полученные выражения позволяют определить дополнительные погрешности измерений комплексной магнитной проницаемости, связанные с недостаточной чувствительностью устройства сравнения измеряемой величины комплексной магнитной проницаемости со значением образцовой емкости и отношением напряжений на участках измерительного контура.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. И. Кирпатовский. К вопросу о чувствительности, «Научные записки ЛПИ», вып. IX, серия электротехническая, № 5, 75, 1949.
2. Я. П. Цар. Погрешности измерений комплексной магнитной проницаемости с помощью пермеаметра. «Материалы радиоэлектроники и электрические машины». Изд-во Львовского ун-та, Львов, 1964.
3. Я. П. Цар. Применение радиочастотного пермеаметра для измерения комплексной магнитной проницаемости. «Вопросы радиоэлектроники», серия VI, вып. 5, 1964.
4. Я. П. Цар. Порог чувствительности куметра при измерениях низких добротностей. Тезисы докладов конференции НТО РиЭ им. А. С. Попова, Киев, 1965.