

Измерение магнитной проницаемости.

Метод вольтметра – амперметра

Это самый простой и доступный метод. Типичная погрешность измерения составляет 10...15 %. Для измерений этим методом на исследуемый сердечник внавал наматывается катушка, состоящая из двух обмоток, измерительной и намагничивающей. Количество витков в них некритично, и для упрощения их можно мотать одновременно в два провода. Сердечник должен быть тщательно собран. Склеивать половины разрезных ленточных сердечников не обязательно, достаточно несильно стянуть подходящей струбциной. Для повышения точности намагничивающая обмотка должна иметь малое сопротивление. Измерительная обмотка должна иметь сопротивление, по крайней мере, в 100 раз меньшее, чем входное сопротивление вольтметра. Чаще всего бывает достаточно намотать по 50...70 витков проводом толщиной около 1 мм для намагничивающей и 0,2...0,3 мм для измерительной.

Использование катушки с таким малым количеством витков требует малых напряжений, около 10...30 В и больших токов, до 3...5 А. Это удобно с точки зрения измерения тока в случае использования стрелочных приборов, ведь магнитоэлектрические амперметры имеют большую погрешность при измерении малых токов. Однако, при этом потребуется дополнительный трансформатор Т2, который позволит использовать весь диапазон регулировки ЛАТРа, рис. 4.26. **Внимание! При использовании в качестве измерительных приборов звуковой карты компьютера дополнительный изолирующий трансформатор Т2 должен присутствовать обязательно.**

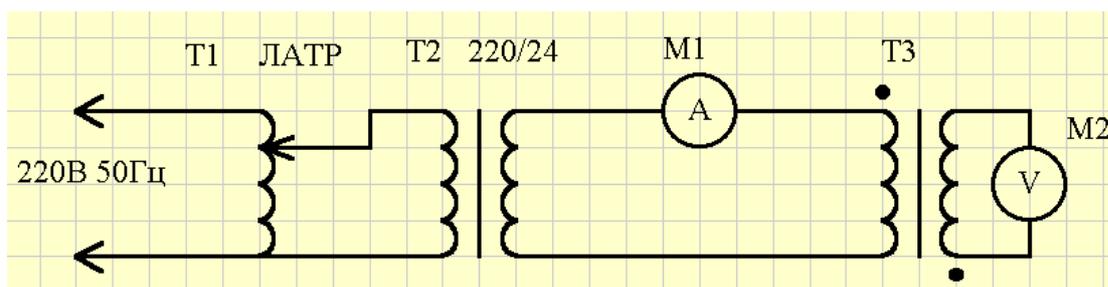


Рис. 4.26 а. Основная схема измерений параметров трансформатора Т3.

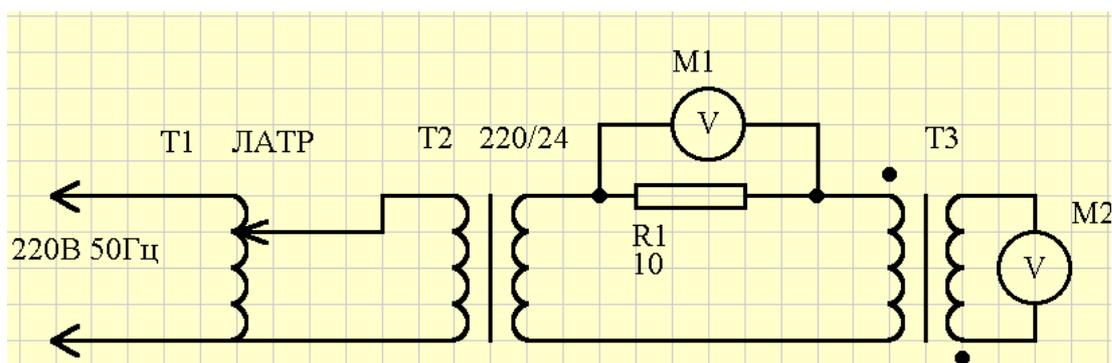


Рис. 4.26 б. Схема с двумя вольтметрами.

Для этих целей удобно использовать унифицированные понижающие трансформаторы серии ТН или ТПП, но лучше всего подыскать понижающий трансформатор, предназначенный для работы в сети 380 В, например, из серии ОСМ. Дело в том, что ЛАТРы и бытовые трансформаторы работают при индукции, близкой к насыщению, при этом напряжение на вторичной обмотке имеет высокий уровень гармоник. Это дополнительно снижает точность измерений. Трансформатор, рассчитанный на более высокое напряжение на первичной обмотке, значительно меньше искажает форму напряжения. Если напряжение на вторичной обмотке дополнительного трансформатора составляет U вольт, то ориентировочное количество витков намагничивающей катушки можно оценить как $w_n = 30U / S$, где S – сечение сердечника в квадратных сантиметрах. При достижении

напряжения, приложенного к намагничивающей катушке $(0,9 \dots 1,0)U$, исследуемый сердечник будет намагничен до насыщения, и тогда диапазон регулировки ЛАТРа Т1 будет использован полностью. Можно рекомендовать напряжение 24 В, как безопасное и удобное в измерениях. К сожалению, обойтись без автотрансформатора практически невозможно. Применение мощных реостатов или других способов регулировки тока не рекомендуется. Активное сопротивление в цепи обмотки намагничивания изменяет фазовые соотношения между током и напряжением, а также приводит к сильным искажениям формы намагнивающего тока см. (4.40). По этой же причине сопротивление шунта или рамки измерительного прибора М1 должно быть как можно меньшим.

Как уже говорилось, наличие на сердечнике б/у трансформатора готовых обмоток может облегчить задачу измерения. В качестве намагничивающей обмотки можно использовать сетевую. При этом дополнительный трансформатор не понадобится, но намагнитить сердечник до полного насыщения не удастся, даже если ЛАТР имеет возможность поднять напряжение до 250 В. Впрочем, для многих применений вполне достаточно получить кривую намагничивания до индукции $1,6 \dots 1,7$ Тл. Количество витков, требуемое для вычислений, в этом случае получают при размотке трансформатора. Если разматывать первичную обмотку нежелательно, можно намотать пробную обмотку из небольшого количества витков поверх имеющейся и рассчитать количество витков первичной обмотки, измерив выходное напряжение получившегося трансформатора.

В случае необходимости можно обойтись без амперметра. Ток намагничивания в этом случае измеряют по падению напряжения на резисторе небольшой величины, рис. 4.26 б.

Сопротивление дополнительного резистора не критично, но падение напряжения на нем должно быть, по крайней мере, в 10 раз меньше напряжения питания обмотки намагничивания. Обычно сопротивление датчика тока может быть выбрано в пределах $1 \dots 2$ Ом. Ток намагничивания равен $I = U_{R1} / R_1$.

С некоторым ухудшением точности измерения можно исследовать сердечники с единственной обмоткой, рис. 4.27. Из-за падения напряжения на активном сопротивлении обмотки показания вольтметра будут завышены.

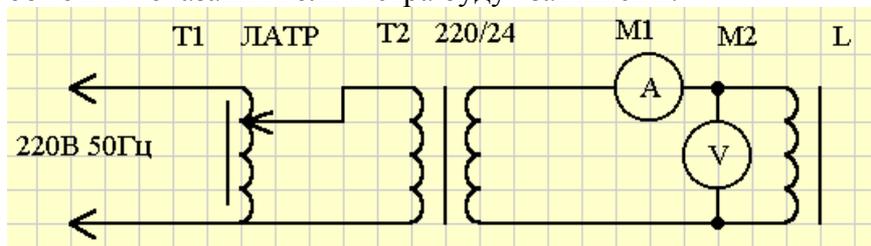


Рис. 4.27. Схема измерений с единственной обмоткой.

Исследование начинается с малых токов намагничивания.

Плавно изменяя положение ручки ЛАТРа от нуля до максимума, следим за показаниями вольтметра и амперметра. В некоторый момент ток начинает быстро расти, но напряжение практически не меняется. Это означает, что индукция в сердечнике достигла величины, при которой материал насыщен.

Показания вольтметра и амперметра следует занести в таблицу. Обычно достаточно $20 \dots 30$ точек, а для быстрой оценки даже меньше. По этим данным может быть построена кривая намагничивания и зависимость магнитной проницаемости сердечника от индукции.

Методом вольтметра-амперметра можно измерять индуктивность рассеяния трансформаторов. Для этого вторичная обмотка замыкается накоротко. Полное сопротивление первичной обмотки при этом определяется активным сопротивлением провода обмотки и индуктивностью рассеяния между первичной и вторичной обмоткой. Обычно активным сопротивлением можно пренебречь без потери точности. Разумеется, следует принять меры по предотвращению перегрузки первичной обмотки, проводя измерения на минимальных напряжениях. Индуктивность рассеяния не зависит от напряжения на обмотке, поэтому достаточно одного измерения.

Использование Spectralab'a.

В этом случае ток намагничивания также вычисляется по падению напряжения на резисторе R1, рис. 4.28. Дополнительный резисторные делитель R2R3 обеспечивает приведение уровня сигнала к чувствительности звуковой карты, которая может составлять $U_{вх.макс} = 0,1...2,5$ ВОЛЬТ.

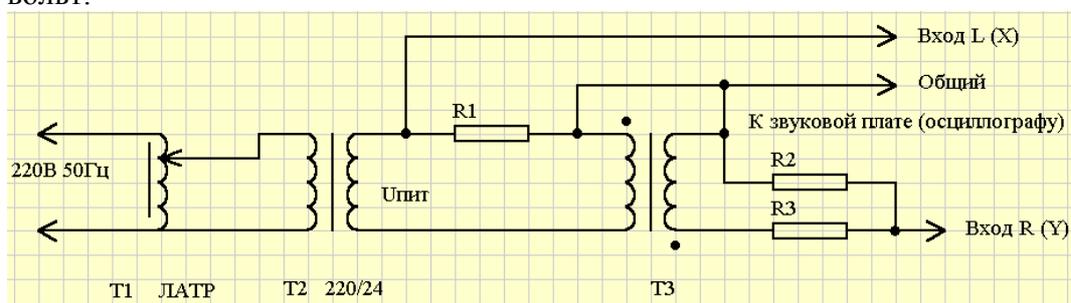


Рис. 4.28. Использование звуковой платы компьютера.

Сопротивление датчика тока рассчитывается по формуле $R_1 = U_{вх.макс} / I_{макс}$, где $I_{макс}$ – максимальный ток намагничивания для данного трансформатора Т3. Сопротивление R3 выбирается в пределах 100...200 кОм, а R2 – из условия $U_{вх.макс} \cdot k \leq U_{пит}$, где $k = \frac{R2 + R3}{R2}$,

т.е.

$$R2 \leq \frac{U_{вх.макс} R3}{U_{пит} - U_{вх.макс}} \quad (4.67)$$

После построения таблицы зависимости напряжения самоиндукции от тока намагничивания можно рассчитать напряженность поля, магнитную индукцию и магнитную проницаемость:

$$H_m = 1,41 \frac{w \cdot I}{lc} \text{ в системе СИ. В расчетах удобнее пользоваться формулой}$$

$$H_m = 0,141 \frac{w \cdot I}{lc}, \quad (4.68)$$

подставляя ток в миллиамперах, а среднюю длину магнитной силовой линии – в сантиметрах. Напряженность поля по-прежнему будет выражена в амперах на метр.

$$B_m = \frac{U}{4,44 f \cdot S \cdot w}, \text{ или в инженерных единицах (Тл, Гц, см)}$$

$$B_m = \frac{U \cdot 10^{-4}}{4,44 f \cdot S \cdot w}, \quad (4.69)$$

а магнитная проницаемость

$$\mu = \frac{B_m}{\mu_0 \cdot H_m}. \quad (4.70)$$

Обычно этих данных достаточно для проверки магнитопровода, но для полноты описания прокомментируем известную методику измерения полного сопротивления низкоомных обмоток для вычисления индуктивности [53]. В этой работе предлагается вычислять параметры катушек немного по другому – через полное сопротивление. Мы будем рассчитывать магнитную проницаемость обоими способами.

Сняв вольтамперную характеристику пробной катушки, попутно можно вычислить полное сопротивление Z и индуктивность обмотки L, как функцию магнитной индукции. Зная эти величины, можно в уме оценить количество витков w' , требуемое для получения нужной индуктивности L' на этом сердечнике:

$$L' = L \left(\frac{w'}{w} \right)^2. \quad (4.71)$$

Полное сопротивление обмотки $Z = \sqrt{(\omega L)^2 + r_1^2}$, но на практике активное сопротивление обмотки r_1 значительно меньше индуктивного, поэтому в расчетах активное сопротивление не учитывается. По измеренным значениям напряжения U и тока I вычисляется полное сопротивление $Z = \frac{U}{I}$, а затем индуктивность

$$L = \frac{Z}{\omega} = \frac{U}{2\pi f \cdot I}, \quad (4.72)$$

или при измерении на частоте 50 Гц,

$$L(\text{Гн}) = \frac{U}{314I}. \quad (4.72)$$

Зависимость индуктивности первичной (или вторичной) обмотки от переменного тока намагничивания весьма информативна при анализе готового трансформатора, но материал сердечника лучше характеризует величина, не зависящая от параметров обмотки, – магнитная проницаемость. Вид графиков индуктивности и магнитной проницаемости полностью совпадает, они отличаются только масштабом. Широко используется формула связи индуктивности обмотки с параметрами сердечника и катушки:

$$L(\text{Гн}) = \frac{0,4\pi \cdot \mu w^2 S_c \cdot 10^{-8}}{l_c}, \quad (4.73)$$

где S_c – площадь сечения сердечника, кв.см., l_c – средняя длина магнитной силовой линии, см. Отсюда можно получить еще одну формулу, которую также можно с успехом использовать для вычисления магнитной проницаемости:

$$\mu = \frac{L \cdot l_c \cdot 10^8}{0,4\pi \cdot w^2 S_c} \quad (4.74)$$

Оба метода исследования иллюстрированы фрагментом Excel – программы, рис. 4.29. Можно заметить, что величина магнитной проницаемости, вычисленная двумя различными методами, столбцы Н и К, практически совпадает. Незначительное различие объясняется тем, что во втором случае в формулах участвует величина площади сечения сердечника, которая отличается от реальной. На самом деле суммарная площадь сечения пластин магнитопровода несколько меньше той величины, которую можно измерить штангенциркулем. Это отличие выражается коэффициентом заполнения сердечника сталью K_c , который обычно находится в пределах 0,92...0,96. Таким образом, в расчетах следует использовать "эффективное" значение площади сердечника: $S_c = a \cdot b \cdot K_c$

Пояснения к программе:

Некоторым ячейкам назначены имена, для удобства использования в формулах и наглядности:

Е5 (количество витков пробной обмотки) имеет имя NNN,

И3 (средняя длина магнитной силовой линии) – lcc;

Е7 ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$) – mu0;

И3 (площадь сечения сердечника) – Scc;

Е6 (частота 50 Гц) – fff50;

Ячейки F10 – К10 содержат формулы:

F10 = 0.14*E10*NNN/lcc

G10 = 100000000*D10/(4.44*fff50*Scc*NNN)

$$H10 = G10 / (10000 * F10 * \mu_0)$$

$$I10 = D10 * 1000 / E10$$

$$J10 = I10 / (2 * \pi * f * f50)$$

$$K10 = 100000000 * I_{cc} * J10 / (0.4 * \pi * (N * N)^2 * S_{cc})$$

Формулы в строках 11–18 получены путем автозаполнения. Для этого ячейки F10–K10 выделяются. После перетаскивания мышью маркера автозаполнения (тонкий крестик в правом нижнем углу выделенной строки) вниз на нужное количество строк программа готова к работе.

	D	E	F	G	H	I	J	K
1		Ширина стержня	Набор	Ширина окна	Высота окна	Длина магн. сил. линии	Площадь сечения	Площадь окна
2		a	b	c	h	lc	Sc	Sok
3	Шл25*40	25	40	25	62.5	21.3	10	15.63
4								
5	W=	78	вит д=1.0					
6	F=	50	Гц					
7	μ_0 =	1.26E-06						
8								
9	U(B)=	I(mA)=	H(A/m)=	B(Гс)=	Mu=B/H	Z(Ом)=	L(Гн)=Z/2Pі*F	Mu=f(z)
10	0.15	5	2.56	87	2691	30	0.10	2660
11	0.35	10	5.13	202	3139	35	0.11	3104
12	0.65	15	7.69	375	3886	43	0.14	3843
13	0.95	20	10.25	549	4260	48	0.15	4212
14	1.2	25	12.82	693	4305	48	0.15	4257
15	3	50	25.63	1733	5381	60	0.19	5321
16	2.3	40	20.51	1328	5157	58	0.18	5099
17	3.8	60	30.76	2195	5680	63	0.20	5616
18	5.7	80	41.01	3292	6390	71	0.23	6319

Рис. 4.29. Расчет параметров сердечника в MS EXCEL.

© Е. Васильченко, 2003г.

© Издательство Солон-Пресс, 2003г.