

РАСЧЕТ ИНДУКТИВНЫХ ДАТЧИКОВ С РАЗОМКНУТОЙ МАГНИТНОЙ ЦЕПЬЮ И ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

Расчет индуктивности катушек различных поперечных сечений без ферромагнитного сердечника достаточно хорошо освещен в литературе [1, 2] и не вызывает затруднений.

Между тем во многих устройствах информационно-измерительной техники и радиотехники широкое распространение получили катушки с разомкнутыми ферромагнитными, в частности с цилиндрическими ферритовыми сердечниками. Они используются в качестве дросселей, в генераторных каскадах, фильтрах промежуточной частоты, в специальных конструкциях накладных датчиков, в качестве первичных элементов в измерительных устройствах с частотным преобразованием сигнала. Во всех случаях применение ферритовых сердечников позволяет значительно уменьшить габариты катушки, а в индуктивно-частотных преобразователях, кроме того, благодаря использованию датчиков указанного типа удается получить высокую линейность выходной характеристики устройства по частоте [3].

Если в катушках дросселей и фильтров сердечник неподвижен, то в первичных элементах измерительных устройств условия неподвижности и симметричности сердечника не выполняются. В общем случае сердечник только частично вдвинут в катушку. Расчет индуктивности датчиков такого типа представляет значительный интерес и в настоящее время почти не разработан. Основная трудность при расчете заключается в наличии ферромагнитного тела ограниченных размеров в поле короткой катушки, а также в том, что положение сердечника относительно катушки не остается неизменным.

При движении сердечника изменяется магнитное сопротивление потоку и общая картина магнитных силовых линий. Таким образом, каждому его положению соответствует вполне определенная картина поля, и расчет индуктивности датчика классическими ме-

годами становится практически неосуществимым. Поскольку в конечном счете представляет интерес интегральный эффект описанного процесса, заключающийся в изменении индуктивности в функции перемещения, предлагается метод, позволяющий произвести приближенный расчет индуктивности датчика без углубления в структуру поля катушки.

Расчет датчика с катушкой прямоугольного поперечного сечения

Для катушек прямоугольного сечения, если пренебречь спиральностью витков, распределение тока по сечению провода считать равномерным и изоляцию бесконечно тонкой, справедливо [1]:

$$L_0 = \frac{\mu_0}{4\pi} \omega^2 \cdot d_k \cdot P \left(\frac{t_k}{d_k}; \frac{l_k}{d_k} \right), \quad (1)$$

где L_0 — индуктивность катушки без сердечника;
 μ_0 — магнитная постоянная; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ гн/м;
 ω — число витков катушки;

d_k — средний диаметр обмотки; $d_k = \frac{d_n + d_{вн}}{2}$;

$d_n, d_{вн}$ — соответственно наружный и внутренний диаметр обмотки;
 l_k — длина катушки;

t_k — толщина обмотки; $t_k = \frac{d_n - d_{вн}}{2}$;

P — коэффициент, зависящий от геометрических соотношений катушки (рис. 3).

Влияние ферромагнитного сердечника на индуктивность катушки учитывается коэффициентом μ_ω — действующей магнитной проницаемостью сердечника:

$$\mu_\omega = \frac{L_m}{L_0}. \quad (2)$$

Здесь μ_ω — индуктивность катушки с сердечником.

Для катушек прямоугольного сечения с ферромагнитным сердечником, расположенным симметрично относительно концов обмотки и при условии, что средний диаметр обмотки значительно больше диаметра сердечника, имеем [7]:

$$\mu_\omega = 1 + (\mu_{ст} - 1) \left(\frac{d_c}{d_k} \right)^2. \quad (3)$$

Здесь d_c — диаметр сердечника;

$\mu_{ст}$ — магнитная проницаемость разомкнутого цилиндрического сердечника:

$$\mu_{ст} = \frac{\mu}{1 + \frac{N}{4\pi} (\mu - 1)}; \quad (4)$$

μ — магнитная проницаемость материала сердечника;

$\frac{N}{4\pi}$ — размагничивающий фактор. Он является функцией μ и

соотношением геометрических размеров сердечника. При $\mu > 100$ зависимость N от μ можно пренебречь. Графики $\mu_{\omega}(l_c/d_c)$ для разных значений отношения d_c/d_k приведены на рис. 1 (l_k — длина сердечника).

Заменяем катушку индуктивного датчика с разомкнутой магнитной цепью (рис. 2) эквивалентной схемой замещения, состоящей из двух последовательно соединенных коаксиальных катушек, одна из которых имеет ферритовый сердечник, а другая не имеет его. Введем обозначения w_1 и w_2 — числа витков; l_1 и l_2 — аксиальные размеры катушек соответственно без феррита и с ферритом, причем:

$$w_1 + w_2 = w; \quad l_1 + l_2 = l_k.$$

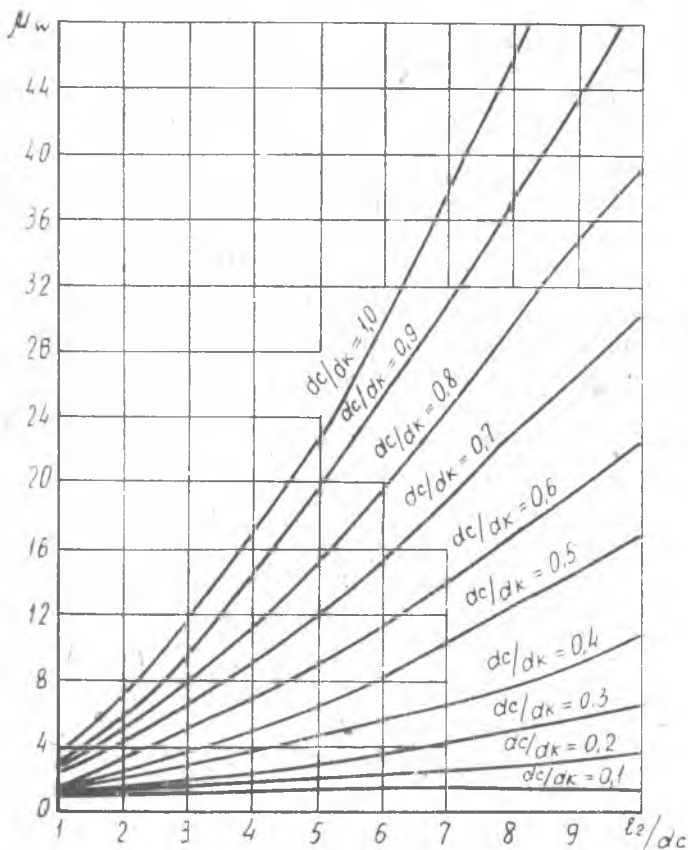


Рис. 1. Графики $\mu_{\omega} \left(\frac{l_c}{d_c} \right)$ для разных значений отношения $\frac{d_c}{d_k}$ (Б-номограмма)

Остальные размеры $d_{нар}$; $d_{вн}$; t_k у обеих катушек одинаковы.

Теперь суммарную индуктивность катушки датчика можно выразить:

$$L = L_1 + L_2 + 2M_{12} \quad (5)$$

Поскольку обе катушки примыкают друг к другу, нельзя не учитывать влияния ферритового сердечника второй катушки на индуктивность первой. Это влияние проявляется в увеличении индуктивности катушки 1 по сравнению с тем ее значением L_{10} , которое имело бы место при отсутствии феррита; и может быть учтено введением некоторого коэффициента $K_1 > 1$:

$$L_1 = L_{10} \cdot K_1; \quad (6)$$

L_{10} определяется по (1).

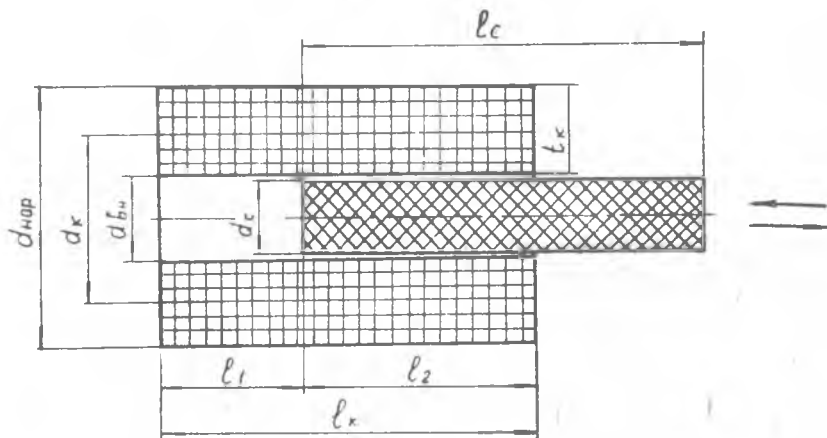


Рис. 2. Катушка датчика с разомкнутой магнитной цепью и подвижным сердечником.

В свою очередь, на индуктивность катушки 2 влияет участок длины ферритового сердечника, выступающий за ее край.

Обозначив через L_{2m} индуктивность катушки 2 с сердечником, равным ей по длине, запишем:

$$L_2 = L_{2m} \cdot K_2, \quad (7)$$

$$\text{где } K_2 > 1; L_{2m} \text{ определяется из } L_{2m} = L_{20} \mu_0. \quad (8)$$

В (5) остается неизвестным коэффициент взаимной индукции катушек 1 и 2.

Ввиду наличия ферромагнитного сердечника среда, в которой находятся катушки 1 и 2, не является изотропной. Область, занятая обмотками катушек и лежащая снаружи их, имеет магнитную

проницаемость μ_0 ; магнитная проницаемость области внутри катушки 2 равна $\kappa_2 \mu_0$, а внутри катушки 1 — $\kappa_1 \cdot \mu_0$.

Для определения M_{12} воспользуемся искусственным приемом: заменим катушку с сердечником, находящуюся в среде с $\mu \neq \text{const}$ катушкой без сердечника. Последнюю будем рассматривать в изотропной среде с магнитной проницаемостью μ_0 . При данном преобразовании необходимо, чтобы L_1 , L_2 , M_{12} остались без изменения.

Для сохранения значений L_1 и L_2 оставляем прежними размеры катушек и вводим условные числа их витков: ω_{1y} и ω_{2y}

$$\omega_{1y} = \omega_1 \cdot \sqrt{K_1}; \quad (10)$$

$$\omega_{2y} = \omega_2 \sqrt{K_2 \cdot \mu_{\omega}}. \quad (11)$$

Число витков, приходящееся на единицу длины исходной катушки, равно

$$p = \frac{\omega}{l_k}. \quad (12)$$

Катушки 1 и 2 имеют разные линейные плотности витков:

$$p_1 = \frac{\omega_1 \cdot \sqrt{K_1}}{l_1} = p \sqrt{K_1}; \quad (13)$$

$$p_2 = \frac{\omega_2 \cdot \sqrt{K_2 \cdot \mu_{\omega}}}{l_2} = p \sqrt{K_2 \cdot \mu_{\omega}}. \quad (14)$$

Для того, чтобы при произведенном преобразовании осталось неизменным значение M_{12} недостаточно выполнения указанных выше условий. Необходимо также, чтобы неизменным осталось и общее потокосцепление катушек. Последнее требование не может быть выполнено со всей строгостью, так как картина поля новых катушек без сердечника в изотропной среде отличается от картины поля исходных катушек, находящихся в изотропной среде и содержащих сердечник. Это обстоятельство служит источником погрешности при определении M_{12} и, следовательно, L . Следует, однако, отметить, что для случая коротких и достаточно тонких катушек эта погрешность невелика, так как соответствующее увеличение эквивалентной плотности витков у этих катушек способствует такой же концентрации магнитных силовых линий поля, как и при наличии ферромагнитного сердечника. Кроме того, M_{12} входит в выражение для L в качестве одного из слагаемых.

Ввиду того, что плотности витков p_1 и p_2 новых катушек неодинаковы, выражение для M_{12} принимает вид

$$M_{12} = \frac{1}{2} (L' - L_1' - L_2') p_1 \cdot p_2, \quad (15)$$

где L' , L_1' , L_2' — индуктивности катушек исходной, 1 и 2 без сердечников при линейной плотности витков, равной единице, то есть при

$$\frac{\omega_1}{l_1} = \frac{\omega_2}{l_2} = \frac{\omega}{l_k} = 1. \quad (16)$$

Подставляя в (15) значения p_1 и p_2 из (13) и (14), получаем

$$M_{12} = \frac{1}{2} (L' - L'_1 - L'_2) p^2 \sqrt{K_1 \cdot K_2 \cdot \mu_\omega}. \quad (17)$$

При соблюдении (16) числа витков катушек 1 и 2 и исходной численно равны длинам этих катушек:

$$\omega'_1 = l_1; \quad \omega'_2 = l_2; \quad \omega = l_k. \quad (18)$$

С учетом (18) из (1) и (17) находим:

$$M_{12} = \frac{\mu_0}{8\pi} \cdot d_k \cdot p^2 \sqrt{K_1 \cdot K_2 \cdot \mu_\omega} (l^2 P - l_1^2 P_1 - l_2^2 P_2). \quad (19)$$

Следует помнить, что значение действующей магнитной проницаемости μ_ω в (19) находится по рис. 1 для части длины сердечника, равной длине катушки 2, внутри которой находится сердечник.

Окончательно для индуктивности катушки прямоугольного сечения с несимметричным ферромагнитным сердечником из (1), (6), (7), (17) имеем:

$$\begin{aligned} L = \frac{\mu_0}{4\pi} d_k \left\{ K_1 \left(\frac{l_1}{d_k}; \frac{l_c}{l_1} \right) \cdot P_1 \left(\frac{l_1}{d_k}; \frac{t_k}{d_k} \right) \cdot \omega_1^2 + K_2 \left(\frac{l_2}{d_k}; \frac{l_c}{l_2} \right) \times \right. \\ \times P_2 \left(\frac{l_2}{d_k}; \frac{t_k}{d_k} \right) \cdot \omega_2^2 \cdot \mu_\omega \left(\frac{l_2}{d_c}; \frac{d_c}{d_k} \right) + p^2 \sqrt{K_1 \cdot K_2 \cdot \mu_\omega} \times \\ \left. \times \left[l^2 P \left(\frac{l_k}{d_k}; \frac{t_k}{d_k} \right) - l_1^2 P_1 \left(\frac{l_1}{d_k}; \frac{t_k}{d_k} \right) - l_2^2 P_2 \left(\frac{l_2}{d_k}; \frac{t_k}{d_k} \right) \right] \right\}. \quad (20) \end{aligned}$$

Приведенный метод расчета индуктивности катушек с ферромагнитными сердечниками основан на введении экспериментальных коэффициентов K_1 и K_2 , значения которых должны зависеть от геометрических соотношений катушек и сердечника, от величины магнитной проницаемости материала сердечника и от взаимного соотношения размеров катушки и сердечников.

Отметим следующие положения:

1. Для получения максимальной чувствительности датчика при данных его габаритах витки катушки должны как можно ближе примыкать к сердечнику. Поэтому увеличение диаметра катушки за счет $d_{\text{внут}}$, то есть за счет удаления витков от сердечника нецелесообразно, и во всех расчетах датчиков с катушками прямоугольного сечения полагаем $d_{\text{внут}} \approx d_c$.

2. Наибольшие преимущества в схемах индуктивно-частотного преобразователя имеют датчики с отношением длины катушки к диаметру, близким к 1. Сердечник таких катушек имеет отношение $\frac{l_c}{d_c}$, равное нескольким единицам и, следовательно, характеризуется значительной величиной размагничивающего фактора. В этих условиях значения коэффициентов K_1 и K_2 практически не зависят от величины магнитной проницаемости материала сердечника, которая может колебаться в пределах, включающих оптимальные значения μ для рабочего частотного диапазона индуктивно-частотного преобразователя (200—700 кГц).

Таблица 1 хорошо иллюстрирует этот факт: для $\frac{l_c}{a_c} = 2,5$ изменение магнитной проницаемости материала в 2,5 раза изменяет коэффициент μ_ω и, следовательно, индуктивность L менее, чем на 1%.

Влияние же коэффициентов K_1 и K_2 на L меньше, чем влияние μ_ω .

3. Изменения значений коэффициентов κ_1 и κ_2 , вызванные вариациями $\frac{l_b}{a_k}$ в значительных пределах (от 1 до 3), соизмеримы с разбросом экспериментальных значений этих коэффициентов, вызванными погрешностями изготовления катушек и постановкой эксперимента, и могут не учитываться.

Графики K_1 и K_2 приведены на рис. 3.

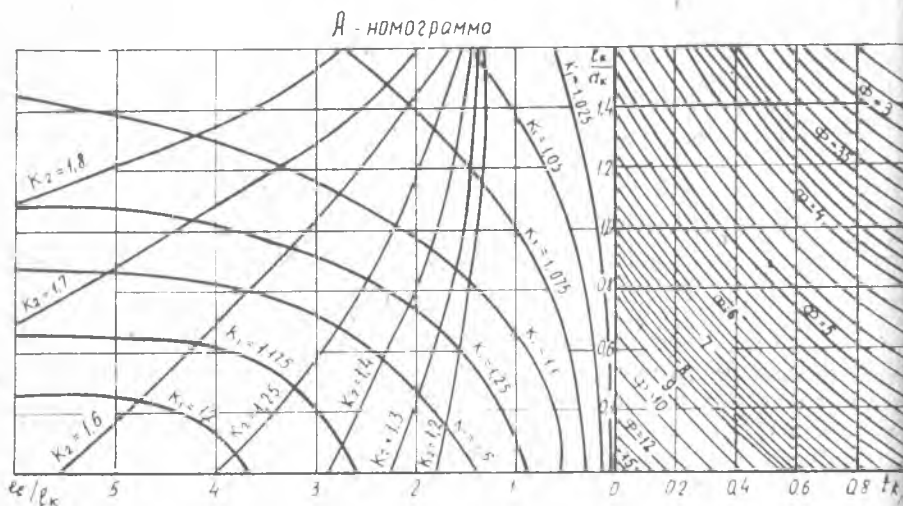


Рис. 3. А — номограмма для определения коэффициентов K_1 , K_2 , P_i

Точность описанного метода расчета индуктивности катушек с разомкнутой магнитной цепью ограничивается:

1. Точностью используемых выражений и зависимостей для μ_ω , $N/4\pi$; P_i .

2. Точностью постановки экспериментов для определения коэффициентов K_1 и K_2 . В серии катушек, изготавливаемых для этой цели, неизбежны отклонения размеров от заданных.

Практически индуктивность катушки прямоугольного поперечного сечения рассчитывается по (20) с точностью до 3—5%.

Выражение (26) довольно громоздко. С целью экономии времени, необходимого для расчета, по (20) построены инженерные но-

мограммы, позволяющие рассчитать составляющие индуктивности катушки x, y, z , где

$$X = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot d_K \cdot P_1 \cdot K_1 \cdot \omega_1^2; \quad (21)$$

$$Y = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot d_K \cdot K_2 \cdot P_2 \cdot \mu_\omega \cdot \omega_2^2; \quad (22)$$

$$Z_i = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot d_K \cdot p^2 \cdot \sqrt{K_1 \cdot K_2 \cdot \mu_\omega \cdot P_i} \cdot \omega_i^2. \quad (23)$$

Искомое значение индуктивности равно:

$$L = X + Y + Z - Z' - Z''. \quad (24)$$

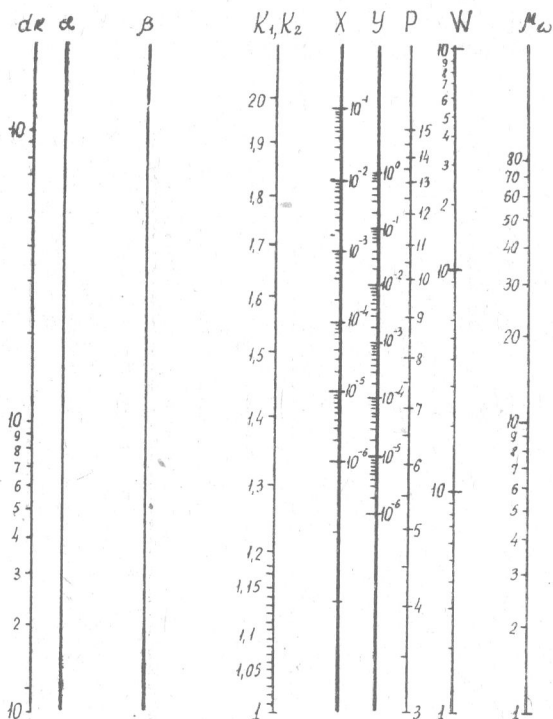


Рис. 4. X—Y — номограмма.

$d_K - K_1 - \alpha$; $\alpha - P - \beta$; $\beta - w - X$; $d_K - K_2 - \alpha$; $\alpha - P - \beta$;
 $\beta - w - X$; $X - \mu_\omega - Y$.

Рассмотрим порядок расчета катушки прямоугольного поперечного сечения с помощью номограмм:

1. По А-номограмме (рис. 3) находятся значения:

$$K_1 \left(\frac{l_1}{d_k}; \frac{l_c}{l_1} \right); K_2 \left(\frac{l_c}{d_k}; \frac{l_c}{l_2} \right); P_i \left(\frac{l_i}{d_k}; \frac{l_k}{d_k} \right), \text{ где } i = 1, 2, 1+2.$$

2. По Б-номограмме (рис. 1) определяется коэффициент

$$\mu_{\omega} \left(\frac{l_c}{d_c}; \frac{d_c}{d_k} \right).$$

3. По X-Y номограмме (рис. 4) находятся составляющие X и Y общей индуктивности L . При этом на шкалах K_1, K_2, P_i и μ_{ω} номограммы откладываются отрезки, соответствующие величинам этих коэффициентов, найденным из номограмм А и Б.

4. По Z-номограмме (рис. 5) определяем составляющие Z, Z' и Z'' общей индуктивности катушки L .

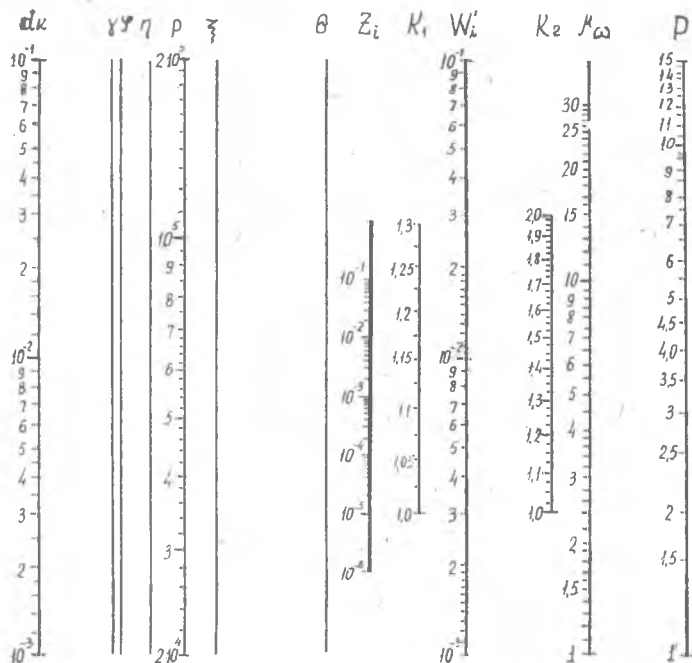


Рис. 5. Z-номограмма.

$d_k \rightarrow \rho \rightarrow \gamma$; $\gamma \rightarrow K_1 \rightarrow \varphi$; $\varphi \rightarrow K_2 \rightarrow \eta$; $\eta \rightarrow \mu_{\omega} \rightarrow \xi$; $\xi \rightarrow w \rightarrow \theta$; $\theta \rightarrow \rho \rightarrow z$.

Напомним, что значения ω_1 численно равны длинам соответствующих катушек.

Ключи к номограммам $X-U$ и Z приведены на соответствующих рисунках.

5. По формуле (24) путем алгебраического суммирования найденных значений X , U , Z_1 определяем искомую индуктивность. Рассмотрим конкретный пример расчета индуктивности катушки прямоугольного сечения с несимметричным сердечником.

Исходные данные: $l_k = l_c = 8$ мм; $d_k = 4,5$ мм; $\omega = 406$;

$$l_1 = 6 \text{ мм}; l_2 = 2 \text{ мм}; d_c = 3 \text{ мм}; t_k = 1 \text{ мм}.$$

Находим предварительно: $\frac{l_1}{d_k} = 1,33$; $\frac{l_2}{d_k} = 0,44$; $\frac{t_k}{d_k} = 0,22$;

$$\frac{l_c}{l_1} = 1,33; \frac{l_c}{l_2} = 4; \frac{l_2}{d_c} = 0,7; \omega_1 = \frac{\omega \cdot l_1}{l_k} = 304; \omega_2 = 102.$$

По А-номограмме находим: $K_1 = 1,07$; $K_2 = 1,55$; $P_1 = 4,6$;

$$P_2 = 8,2; P = 3,75.$$

По Б-номограмме определяем: $\mu_\omega = 2,34$.

По $X-U$ -номограмме: $X = 1,95 \cdot 10^{-4}$ гн; $U = 1,39 \cdot 10^{-4}$ гн.

По Z -номограмме: $Z = 5,48 \cdot 10^{-4}$ гн; $Z' = 3,79 \cdot 10^{-4}$ гн, $Z'' = 0,7 \cdot 10^{-4}$ гн.

Окончательно $L = 4,41 \cdot 10^{-4}$ гн = 441 мкгн.

Для сравнения отметим, что расчет той же катушки по (20) дал: $L = 435$ мкгн; измеренное значение индуктивности этой катушки равно: $L_{изм} = 450$ мкгн. Таким образом, ошибка расчета составляет приблизительно 3%.

Расчет катушек сложного прямоугольного сечения

В ряде случаев в датчиках измерительных устройств используются катушки с ферромагнитными сердечниками, имеющие сложные поперечные сечения, ограниченные ломаными линиями со взаимно перпендикулярными отрезками.

Распространим изложенный выше метод расчета на этот класс катушек.

В основу рассуждений удобно положить теорему о четырех прямоугольниках [5], утверждающую равенство: $F(1 \times 3) = F(2 \times 4)$, где

$$\left. \begin{aligned} F(1 \times 3) &= \iint_{S_1 S_3} \varphi \cdot dS_1 \cdot dS_3 \\ F(2 \times 4) &= \iint_{S_2 S_4} \varphi \cdot dS_2 \cdot dS_4 \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

при условии, что φ , являющаяся функцией координат x и ζ на оси абсцисс и y и η на оси ординат, удовлетворяет условию:

$$\varphi(x, \zeta, y, \eta) = \varphi(\zeta, x, \eta, y). \quad (26)$$

Указанная теорема позволяет при расчете индуктивностей свети вычисление интегралов вида (25) к вычислению алгебраической суммы нескольких величин вида:

$$F = \iint_{S_k} dS'_k \cdot dS''_k, \quad (27)$$

в которых интегрирование производится дважды на площади одного и того же k -го прямоугольника.

Коэффициенты взаимной индукции катушек прямоугольного сечения, расположенных так, что каждая сторона поперечного сечения любой из них лежит на одной прямой с какой-либо стороной поперечного сечения другой катушки, являются функциями вида (25) [6]. Поэтому для их расчета удобно применить указанную теорему.

Таблица 1

Тип феррита	μ_z	$\mu_{ст}$	μ_w
$\Phi - 1000$	1000	9.91	4.21
$\Phi - 600$	600	9.86	4.20
$\Phi - 400$	400	9.80	4.17

В таблице 2 приведены выражения, к вычислению которых сводится расчет коэффициентов взаимной индукции катушек k и p прямоугольного сечения, для ряда случаев взаимного расположения этих катушек.

Приступая к расчету индуктивности катушки сложного поперечного сечения, продолжаем отрезки ломаной линии, ограничивающей ее сечение до их взаимного пересечения. В результате этого сечение катушки оказывается разбитым на некоторое число элементарных прямоугольников.

Индуктивность такой катушки без сердечника равна

$$L = \sum_{i=1}^n L_{i0} + 2 \sum_{\substack{k=1 \\ p=1}}^n M_{kp} \quad (k \neq p), \quad (28)$$

где L_{i0} определяется по (1).

Выражение M_{kp} для конкретного расположения прямоугольников k и p находится по таблице 2 и выражается некоторым числом слагаемых вида: L_i ; $L_{i_1 i_2}$; $L_{i_1 i_2 \dots i_n}$, где $L_{i_1 \dots i_1 \dots i_m}$ — индуктивность катушки, составленной из элементарных прямоугольников n, \dots, i, \dots, m .

При наличии сердечника все входящие в (28) слагаемые можно разделить на три группы: L_α , L_β и L_γ . Теперь

$$L = L_\alpha + L_\beta + L_\gamma. \quad (29)$$

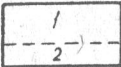
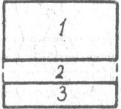
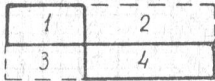
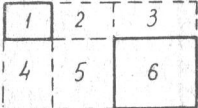
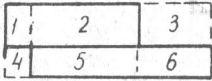
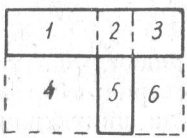
В группу слагаемых L_α войдут индуктивности тех катушек, к которым сердечник примыкает. Имеем:

$$L_\alpha = \sum_{i=1}^{n_1} L\alpha_i, \quad (30)$$

где

$$L\alpha_i = (L\alpha_0)_i (K_1)_i. \quad (31)$$

Таблица 2

N n_1 n_2	Взаимное расположение прямоугольников кр	Выражение для коэффициента взаимной индукции M_{kr}
1		$M_{12} = \frac{1}{2} [L_{12} - L_1 - L_2]$
2		$M_{13} = \frac{1}{2} (L_{123} + L_2 - L_{12} - L_{23})$
3		$M_{14} = M_{23} = \frac{1}{4} (L_{1234} + L_1 + L_2 + L_3 + L_4 - L_{12} - L_{13} - L_{24} - L_{34})$
4		$M_{16} = M_{34} = \frac{1}{4} (L_{123456} + L_{12} + L_{23} + L_{25} + L_{45} + L_{56} - L_{125} - L_{2356} - L_{125} - L_2 - L_5)$
5		$M_{12,56} = \frac{1}{4} (L_{123456} + L_{25} + L_1 + L_3 + L_4 + L_6 - L_{123} - L_{456} - L_{14} - L_{36} - L_2 - L_5)$
6		$M_{5,123} = \frac{1}{4} (L_{1245} + L_{2356} + L_1 + L_3 + L_4 + L_6 - L_{12} - L_{23} - L_{145} - L_{56} - L_{14} - L_{36})$

В группу слагаемых L_β войдут индуктивности катушек, содержащих сердечник. Для них имеем:

$$L_\beta = \sum_{i=1}^{n_2} L\beta_i, \quad (32)$$

$$L_{\beta i} = (L_{\beta 0})_i (K_2)_i \cdot (\mu_{\omega})_i. \quad (33)$$

где $(L_{\alpha 0})_i$ и $(L_{\beta 0})_i$ определяются по (1).

В группу слагаемых L_{γ} войдут индуктивности катушек с частично введенным сердечником.

Для них:

$$L_{\gamma} = \sum_{i=1}^{n_3} L_{\gamma i}, \quad (34)$$

где $L_{\gamma i}$ определяется по (20).

Окончательно получаем:

$$L = \sum_{i=1}^{n_1} L_{\alpha i} + \sum_{i=1}^{n_2} L_{\beta i} + \sum_{i=1}^n L_{\gamma i}. \quad (35)$$

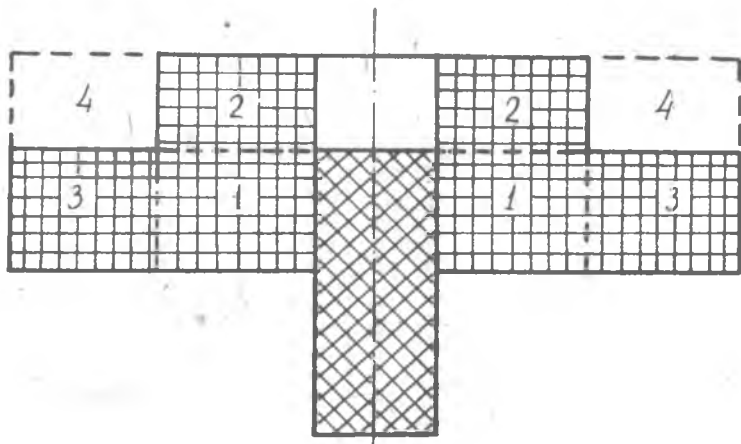


Рис. 6. Катушка с сердечником, имеющая сложное поперечное сечение

Таким образом, вычисление индуктивности катушки, имеющей сложное поперечное сечение и несимметричный ферромагнитный сердечник, сводится к вычислению ряда индуктивностей катушек прямоугольного сечения, которые входят в конечное выражение в виде отдельных слагаемых.

Проиллюстрируем сказанное на примере катушки, изображенной на рис. 6.

Продолжая отрезки ломаной, ограничивающей ее поперечное сечение, получаем четыре элементарных прямоугольника (секция № 4 — фиктивная).

Теперь
$$L = L_1 + L_2 + L_3 + 2(M_{12} + M_{13} + M_{23}). \quad (36)$$

По таблице 2 находим:

$$2M_{12} = L_{12} - L_1 - L_2;$$

$$2M_{13} = L_{13} - L_1 - L_2;$$

$$2M_{23} = \frac{1}{2} (L_{1234} + L_1 + L_2 + L_3 + L_4 - L_{12} - L_{13} - L_{24} - L_{23})$$

(37)

После подстановки выражений для отдельных коэффициентов взаимной индукции в общую формулу и приведения подобных членов запишем для трех групп слагаемых L_α , L_β и L_γ :

$$L_\alpha = \frac{1}{2} (L_2 + L_4 - L_{24}); \quad (38)$$

$$L_\beta = \frac{1}{2} (L_3 - L_1 + L_{13}); \quad (39)$$

$$L_\gamma = \frac{1}{2} (L_{1234} + L_{12} - L_{34}); \quad (40)$$

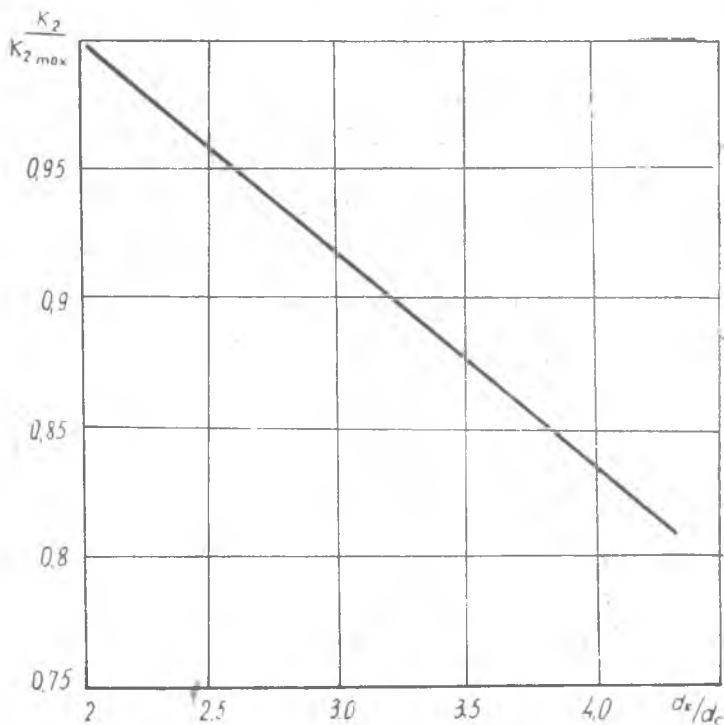


Рис. 7. Убывание коэффициента K_2 с удалением витков катушки от сердечника

Окончательно для индуктивности катушки рис. 6 имеем:

$$L = \frac{1}{2} (L_2 - L_1 + L_3 + L_4 - L_{24} + L_{12} + L_{13} - L_{34} + L_{1234}); \quad (41)$$

Часть слагаемых выражения (41) представляет индуктивности катушек, имеющих $d_{вн} = d_{сер}$. Каждое из этих слагаемых в зависимости от относительного положения катушки и сердечника рассчитывается по (31), (33) или (20).

Однако в (41) входят также индуктивности катушек с $d_{вн} > d_c$ (катушки 34, 3, 4) и катушек, удаленных от сердечника (например, 4, 2, 3). Для расчета катушек с $d_{вн} > d_{сер}$ нужно пользоваться поправочными кривыми к коэффициенту K_2 (рис. 7). Значение коэффициента K_1 при удалении витков катушки от сердечника изменяется незначительно. Так, при увеличении d_k/d_c с 2 до 4 K_2 падает в среднем на $15 \div 20\%$ независимо от l_c/d_c и l_k/d_k , а изменение K_1 не превышает $2-3\%$, что соизмеримо с погрешностью экспериментального определения K_1 . Поэтому убыванием K_1 можно пренебречь, а при $d_k/d_c = 3$ значение K_1 принимаем равным 1.

Для катушек, удаленных от сердечника более, чем на $0,2 l_k$ даже при $d_{вн} = d_c$ можно принять $K_1 = 1$.

ВЫВОДЫ

1. Излагается методика расчета индуктивных датчиков с разомкнутой магнитной цепью и подвижным ферромагнитным сердечником, имеющим прямоугольное и сложное поперечное сечение.

2. Проводятся значения экспериментальных коэффициентов, учитывающих влияние ферромагнитного сердечника, несимметрично расположенного относительно катушки датчика.

3. Приводятся инженерные номограммы, позволяющие рассчитать индуктивные датчики указанного типа.

4. Точность метода расчета лежит в пределах 5% для катушек прямоугольного сложного сечений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Nak J. Eiselose Drosselspulen 1938.
2. П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. Расчет индуктивностей, 1955 г.
3. В. С. Гольдман, Ю. И. Сахаров, Н. М. Старобинский. Авторское свидетельство № 191911.
4. Х. Мейнке, Ф. Гундлах. Радиотехнический справочник, ч. I, Госэнергоиздат, 1961.
5. Nemmeter, Archiv fur Electrotechnik, 14, № 2, 1925.
6. Б. Я. Брунов, Л. М. Гольденберг, И. Г. Клякцин, Л. А. Цейтлин. Теория электромагнитного поля. Госэнергоиздат, 1962 г.
7. Kornetzki M. Ereguen Z, 6, 1952.