

Приложение 1

ДОКАЗАТЕЛЬСТВО Ф-Л (2.3), (2.4)

Равенство (2.3) вытекает непосредственно из закона сохранения энергии, поскольку величина $UI \cos(\psi - \varphi) = \frac{U_m I_m}{2} \cos(\psi - \varphi)$, как известно, есть средняя за период мощность, отдаваемая в цепи.

Справедливость равенства (2.4) мы также докажем, исходя из закона сохранения энергии.

Пусть наша цепь разбита на N ветвей и пусть в κ -й ветви ток равен

$$i_\kappa = I_\kappa \cos(\omega t + \varphi_\kappa),$$

а напряжение на ней равно

$$u_\kappa = U_\kappa \cos(\omega t + \psi_\kappa).$$

Введем мысленно в κ -ю ветвь электродвижущую силу

$$e_\kappa = U_\kappa \cos\left(\omega t + \psi_\kappa - \frac{\pi}{2}\right) - U_\kappa \cos(\omega t + \psi_\kappa).$$

Тогда при сохранении прежнего тока через эту ветвь напряжение на ней будет равно

$$u'_\kappa = e_\kappa + u_\kappa = U_\kappa \cos\left(\omega t + \psi_\kappa - \frac{\pi}{2}\right),$$

т.е. оно будет иметь прежнюю амплитуду и будет сдвинуто на 90° по фазе по отношению к первоначальному напряжению u_κ .

Введем аналогичные эдс и в другие ветви. Тогда, при сохранении прежних токов, напряжения на ветвях будут иметь первоначальную амплитуду и будут сдвинуты по фазе на 90° по отношению к первоначальным напряжениям. Очевидно, что при этом ток, подводимый ко всей цепи, также останется первоначальным, а подводимое напряжение сдвинется на 90° и будет равно

$$u' = U_m \cos\left(\omega t + \psi - \frac{\pi}{2}\right).$$

На основании закона сохранения энергии средняя за период мощность, подводимая ко всей цепи, равна сумме средних мощностей, подводимых к ее ветвям.

Таким образом, при введенных эдс

$$\begin{aligned} \overline{u'i} &= \overline{U_m \cos\left(\omega t + \psi - \frac{\pi}{2}\right) I_m \cos * \omega t + \varphi} = \\ &= \frac{1}{2} U_m I_m \cos\left(\psi - \frac{\pi}{2} - \varphi\right) = \frac{1}{2} U_m I_m \sin(\psi - \varphi) = \sum_{\kappa=1}^N \overline{u'_\kappa i_\kappa}. \end{aligned} \quad (\text{П.1})$$

Здесь черта над выражением показывает, что берется среднее значение этого выражения за период. При определении среднего значения учитывалось, что всегда

$$\overline{\cos(\omega t + \alpha) \cos(\omega t + \beta)} = \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta). \quad (\text{П.2})$$

Раскроем произведение $u'_\kappa i_\kappa$:

$$\begin{aligned} u_\kappa &= r_\kappa i_\kappa + L_\kappa \frac{di_\kappa}{dt} + \sum_{i=1}^N M_{\kappa i} \frac{di_i}{dt} + \frac{1}{C_\kappa} \int i_\kappa dt = \\ &= r_\kappa I_\kappa \cos(\omega t + \varphi_\kappa) + \omega L_\kappa I_\kappa \cos\left(\omega t + \varphi_\kappa + \frac{\pi}{2}\right) + \\ &+ \sum_{l=1}^N \omega M_{\kappa l} I_l \cos\left(\omega t + \varphi_l + \frac{\pi}{2}\right) + \frac{1}{\omega C_\kappa} I_\kappa \cos\left(\omega t + \varphi_\kappa - \frac{\pi}{2}\right), \end{aligned}$$

где r_κ , L_κ и C_κ — активное сопротивление, индуктивность и емкость в κ -й ветви, $M_{\kappa l}$ — взаимная индуктивность между κ -й и l -й ветвями.

Напряжение u'_κ будет отличаться от u_κ тем, что его составляющие будут сдвинуты на угол $-\frac{\pi}{2}$, поэтому оно будет равно

$$\begin{aligned} u'_\kappa &= r_\kappa I_\kappa \cos\left(\omega t + \varphi_\kappa - \frac{\pi}{2}\right) + \omega L_\kappa I_\kappa \cos(\omega t + \varphi_\kappa) + \\ &+ \sum_{l=1}^N \omega M_{\kappa l} I_l \cos(\omega t + \varphi_l) - \frac{1}{\omega C_\kappa} I_\kappa \cos(\omega t + \varphi_\kappa). \end{aligned}$$

Умножая эту величину на $i_\kappa = I_\kappa \cos(\omega t + \varphi_\kappa)$ и беря среднее за период от произведения, мы, учитывая ф-лу (П.2),

$$\overline{u'_\kappa i_\kappa} = \overline{L_\kappa i_\kappa^2} + \sum_{l=1}^N \overline{\omega M_{\kappa l} i_l i_\kappa} = \frac{I_\kappa^2}{2\omega C_\kappa},$$

откуда

$$\sum_{\kappa=1}^N \overline{u'_\kappa i_\kappa} = \omega \left(\sum_{\kappa=1}^N L_\kappa i_\kappa^2 + \sum_{\kappa=1}^N \sum_{l=1}^N M_{\kappa l} i_l i_\kappa \right) - \sum_{\kappa=1}^N \frac{I_\kappa^2}{2\omega C_\kappa}. \quad (\text{П.3})$$

Как известно, энергия магнитного поля, создаваемая токами ветвей, равна

$$W_m = \frac{1}{2} \sum_{\kappa=1}^N L_\kappa i_\kappa^2 + \frac{1}{2} \sum_{\kappa=1}^N \sum_{l=1}^N M_{\kappa l} i_l i_\kappa,$$

и энергия электрического поля ветвей равна

$$W_\vartheta = \sum_{\kappa=1}^N \frac{C_\kappa u_{C_\kappa}^2}{2} = \sum_{\kappa=1}^N \frac{I_\kappa^2}{2\omega^2 C_\kappa} \cos^2(\omega t + \psi_{C_\kappa}),$$

где $u_{C_\kappa} = \frac{I_\kappa}{\omega C_\kappa} \cos(\omega t + \psi_{C_\kappa})$ — напряжение на конденсаторе κ -й ветви.

Учитывая это, а также выражения (П.1) и (П.3), получим:

$$\frac{1}{2} U_m I_m \sin(\psi - \varphi) = 2\omega(\overline{W}_m - \overline{W}_\vartheta),$$

что и требовалось доказать.

Приложение 2

**ЗНАЧЕНИЯ ε_R И $\operatorname{tg} \delta$ ДЛЯ НЕКОТОРЫХ
ДИЭЛЕКТРИКОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ
В РАДИОТЕХНИКЕ**

№ пп.	Наименование диэлектрика	ε_r	$\operatorname{tg} \delta \times 10^4$ (на радио- частотах)
1	Слюда мусковит	6 ÷ 7	1 ÷ 3
2	Слюда флогопит	5 ÷ 6	10 ÷ 50
3	Микалекс	7,5	15 ÷ 30
4	Тиконд Т-80	75 ÷ 80	3 ÷ 5
5	Тиконд Т-60	55 ÷ 60	3 ÷ 5
6	Тиконд Т-30	25 ÷ 30	5 ÷ 9
7	Тиконд Т-25	25 ÷ 30	5 ÷ 9
8	Термоконд ТК-М	20 ÷ 25	3 ÷ 5
9	Термоконд ТК-П	15 ÷ 20	3 ÷ 5
10	Алюминоксид	10 ÷ 11	1 ÷ 4
11	Тибар	1000 ÷ 6000	150 ÷ 200
12	Гетинакс	7 ÷ 8	600 ÷ 800
13	Пирофиллит	5,5 ÷ 6,0	60 ÷ 70
14	Радиофарфор	6,0 ÷ 6,5	30 ÷ 35
15	Радиостеатит	6,0 ÷ 6,5	4 ÷ 6
16	Кварц плавленный	3,5	<3
17	Полистирол	около 2,5	1,5 ÷ 3
18	Полиэтилен	2,3	2 ÷ 5
19	Эскапон	2,7 ÷ 3,4	6 ÷ 10
20	Полихлорвинил	3,1 ÷ 3,4	200
21	Полиметилметакрилат (плексиглас)	3,5 ÷ 3,6	200 ÷ 600

Приложение 3

**ЗНАЧЕНИЯ T_{KC} И $\text{tg } \delta$ ДЛЯ НЕКОТОРЫХ
ТИПОВ КОНДЕНСАТОРОВ ПОСТОЯННОЙ
ЕМКОСТИ**

№ пп.	Наименование конденсаторов	$T_{KC} \times 10^6$	$\text{tg } \delta \times 10^4$ (на радиочастотах)
1	Конденсаторы воздушные	$+(2 \div 200)^1$	≈ 1
2	Конденсаторы слюдяные типа КСО группа А группа Б группа В группа Г	$\left. \begin{array}{l} > \pm 200 \\ \pm 200 \\ \pm 100 \\ \pm 50 \end{array} \right\}$	$(30 \div 50)$
3	Конденсаторы слюдяные (серебряная слюда)	$+80$	$(20 \div 30)$
4	Конденсаторы керамические группа Д (диэл.-тиконд Т-80, окраска красная) группа Ж (диэл.-тиконд Т-60, окраска оранжевая) группа К (диэл.-тиконд Т-30, окраска желтая) группа Л (диэл.-тиконд Т-25, окраска зеленая) группа М (диэл.-термоконд ТК-М, окраска голубая) группа Р (диэл.-термоконд ТК-П, окраска серая) группа С (диэл.-алюминоксид, окраска синяя)	$\left. \begin{array}{l} -(730 \pm 70) \\ -(570 \pm 70) \\ -(300 \pm 50) \\ -(130 \pm 50) \\ -(50 \pm 30) \\ +(30 \pm 30) \end{array} \right\}$	$(2 \div 10)$
5	Конденсаторы бумажные	$+(120 \pm 30)$ $+(250 \div 2500)$	$1 \div 5$ $100 \div 500$

¹⁾ В зависимости от коэффициентов линейного расширения материалов, идущих на изготовление конденсатора. $TRC = 2 \cdot 10^{-6}$ для конденсаторов, изготовленных из инвара с керамической изоляцией.

Приложение 4

ЕМКОСТЬ ПЛОСКОГО И ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО КОНДЕНСАТОРОВ

Емкость плоского конденсатора с параллельными пластинами (рис. П.1) может быть вычислена по формуле

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d} (n - 1), \quad (\text{П.4})$$

где C — емкость конденсатора в фарадах, $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi c^2} \cdot 10^9 \text{ Ф/см} = 0,00885 \times 10^{-12} \text{ Ф/см}$ — диэлектрическая проницаемость вакуума (c — скорость света), ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика, используемого в конденсаторе, S — рабочая площадь одной пластины в см^2 (заштрихована на рис. П.1), d — расстояние между соседними пластинами в см, n — число пластин конденсатора.

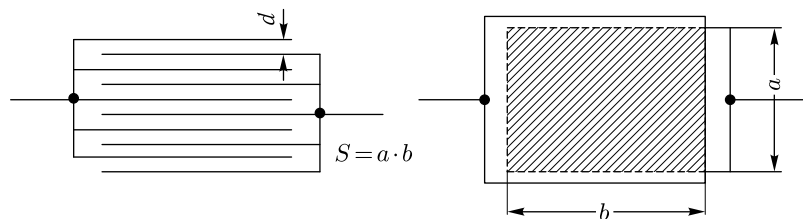


Рис. П.1. Плоский конденсатор

Емкость цилиндрического конденсатора, т. е. конденсатора, состоящего из двух коаксиальных цилиндров (рис. П.2), определяется по формуле

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_rl}{\ln \frac{R}{r}}, \quad (\text{П.5})$$

где l — рабочая длина конденсатора в см (рис. П.2), R — внутренний радиус внешнего цилиндра, r — внешний радиус внутреннего цилиндра (в одинаковых единицах).

Остальные обозначения те же, что в ф-ле (П.4).

Пример П.1. Определить емкость плоского конденсатора, изображенного на рис. П.1, если $a = 20$ мм, $b = 30$ мм, число пластин $n = 10$. В качестве диэлектрика использована слюда мусковит ($\varepsilon_r = 6,5$) толщиной $d = 0,1$ мм.

Решение. Находим рабочую площадь пластины:

$$S = ab = 20 \cdot 30 = 600 \text{ мм}^2 = 6 \text{ см}^2.$$

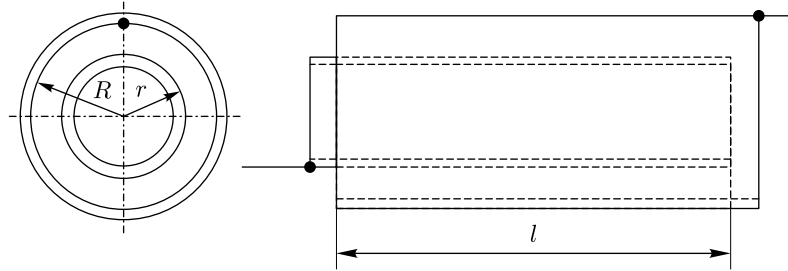


Рис. П.2. Цилиндрический конденсатор

По ф-ле (П. 4) определяем емкость

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d} (n - 1) = \frac{0,08855 \cdot 10^{-12} \cdot 6,5 \cdot 6}{0,01} (10 - 1) =$$

$$= 3100 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 3100 \text{ пФ}.$$

Пример П.2. Определить емкость цилиндрического конденсатора, изображенного на рис. П.2, если $R = 8$ мм, $r = 7$ мм, $l = 40$ мм. Диэлектрик — тиконд Т-60 ($\varepsilon_r = 60$).

Решение. Емкость вычисляем по ф-ле (П.5)

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_rl}{\ln \frac{R}{r}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,08855 \cdot 10^{-12} \cdot 60 \cdot 4}{\ln \frac{8}{7}} = 10^{-9} \text{ Ф} = 1000 \text{ пФ}.$$

Приложение 5

РАСЧЕТ ФОРМЫ ПЛАСТИН КОНДЕНСАТОРОВ ПЕРЕМЕННОЙ ЕМКОСТИ

Если конденсатор переменной емкости имеет конструкцию, подобную изображенной на рис. 2.13, то рабочая площадь пластины конденсатора может быть найдена из выражения (П.4). Она будет равна

$$S = \frac{Cd}{\varepsilon_0 \varepsilon_r (n-1)}.$$

Если повернуть ротор конденсатора на угол $d\varphi$, то площадь S получит приращение

$$dS = \frac{C'(\varphi)d}{\varepsilon_0 \varepsilon_r (n-1)} d\varphi, \quad (\text{П.6})$$

где

$$C'(\varphi) = \frac{dC(\varphi)}{d\varphi}.$$

С другой стороны, из рис. П.3 видно, что если пренебречь накрест заштрихованной площадью, то

$$dS = \frac{1}{2} (r^2 - r_0^2) d\varphi, \quad (\text{П.7})$$

где r — длина радиус-вектора пластины ротора, r_0 — радиус внутреннего выреза статорных пластин, который делается, чтобы пропустить ось ротора.

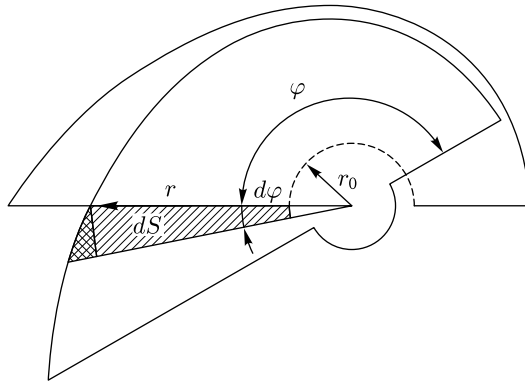


Рис. П.3. Изменение рабочей площади переменного конденсатора при повороте ротора

Приращение площади dS в этой формуле берем по абсолютной величине потому, что для некоторых типов конденсаторов (например для прямоугонного) оно может быть отрицательным (с увеличением φ площадь уменьшается), в то время как правая часть равенства (П.7) всегда положительна.

Приравнявая друг другу выражения (П.6) и (П.7) и сокращая их на $d\varphi$, получим

$$\frac{1}{2}(r^2 - r_0^2) = \frac{d|C'(\varphi)|}{\varepsilon_0 \varepsilon_r (n-1)},$$

откуда

$$r = \sqrt{2 \frac{d|C'(\varphi)|}{\varepsilon_0 \varepsilon_r (n-1)} + r_0^2}. \quad (\text{П.8})$$

Таким образом, найдя производную заданной функции $C(\varphi)$ и подставив значение $|C'(\varphi)|$ в ф-лу (П.8), получим уравнение в полярных координатах, дающее возможность построить контур подвижной пластины.

Неподвижные пластины обычно выбираются такой формы, чтобы они целиком покрывали подвижные пластины при полностью введенном роторе.

Ниже приведены формулы зависимости емкости от угла поворота, выраженные через C_0 и C_m (C_0 — минимальная, а C_m — максимальная емкость конденсатора) для некоторых типов конденсаторов.

Прямоемкостный конденсатор

$$C(\varphi) = (C_m - C_0) \frac{\varphi}{\pi} + C_0. \quad (\text{П.9})$$

Прямочастотный конденсатор

$$C(\varphi) = \frac{C_m}{\left[\left(\sqrt{\frac{C_m}{C_0}} - 1 \right) \frac{\varphi}{\pi} + 1 \right]^2}. \quad (\text{П.10})$$

Логарифмический конденсатор

$$C(\varphi) = C_0 e^{\frac{\varphi}{\pi} \ln \frac{C_m}{C_0}}. \quad (\text{П.11})$$

Пример П.3. Рассчитать форму пластин логарифмического конденсатора, максимальная емкость которого должна быть равной $C_m = 500$ пФ, а минимальная $C_0 = 50$ пФ. Рабочее напряжение 250 В.

Решение. Зависимость емкости логарифмического конденсатора от угла поворота ротора выражается ф-лой (П.11):

$$C(\varphi) = C_0 e^{\frac{\varphi}{\pi} \ln \frac{C_m}{C_0}} = 50 \cdot 10^{-12} e^{\frac{\varphi}{\pi} \ln \frac{500}{50}} = 50 \cdot 10^{-12} e^{0,732\varphi} \text{ Ф.}$$

Находим $C'(\varphi)$:

$$C'(\varphi) = 50 \cdot 10^{-12} 0,732 e^{0,732\varphi} = 36,6 \cdot 10^{-12} e^{0,732\varphi}.$$

Величина d — расстояние между пластинами и r_0 — радиус выреза в статорных пластинах выбираются, исходя из пробивного напряжения, или, если оно невелико, из конструктивных соображений. Необходимо выбирать эти величины такими, чтобы при возможных вибрациях и деформации пластин не происходило замыкания между ними и изменения емкости конденсатора на недопустимую величину.

Кроме того, при величине r_0 , близкой к радиусу оси ротора, начальная емкость C_0 (емкость при полностью выведенных подвижных пластинах) может быть большой, что часто недопустимо.

Задавшись $r_0 = 0,8$ см и $d = 0,1$ см, получим

$$\begin{aligned} r &= \sqrt{\frac{2d|C'(\varphi)|}{\varepsilon_0\varepsilon_r(n-1)}} + r_0^2 = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,1 \cdot 36,6 \cdot 10^{-12} e^{0,732\varphi}}{0,08855 \cdot 10^{-12} \cdot 1(n-1)}} + 0,8^2 = \\ &= \sqrt{\frac{82,6e^{0,732\varphi}}{n-1}} + 0,64. \end{aligned}$$

Подберем число пластин n .

Число пластин выбирается таким, чтобы конденсатор имел габариты, позволяющие удобно поместить его на шасси радиоаппарата. При большом числе пластин конденсатор будет иметь большой размер вдоль оси, при малой — большой размер в плоскости, перпендикулярной оси.

Зададимся $n = 10$. В этом случае пластины займут вдоль оси расстояние порядка

$$(n-1)d = (10-1)0,1 = 0,9 \text{ см,}$$

а максимальный радиус пластины (при $\varphi = \pi$) будет равен

$$r_{\text{макс}} = \sqrt{\frac{82,6e^{0,732\pi}}{10-1}} + 0,64 = \sqrt{\frac{826}{9}} + 0,64 = 9,6 \text{ см.}$$

Конденсатор при этом получается очень громоздким. Зададимся $n = 40$. Тогда размер по оси будет примерно равным

$$(n-1)d = (40-1) \cdot 0,1 = 3,9 \text{ см,}$$

а максимальный радиус пластины

$$r_{\text{макс}} = \sqrt{\frac{826}{39}} + 0,64 = 4,67 \text{ см.}$$

В этом случае размеры вдоль оси и по радиусу соизмеримы.

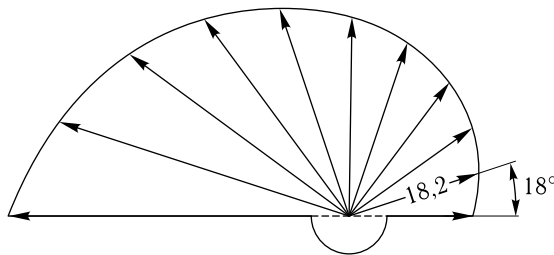


Рис. П.4. Форма пластин ротора логарифмического конденсатора примера П.3

Поэтому окончательно принимаем $n = 40$. Расчет радиусов подвижной пластины производим по формуле:

$$r = \sqrt{\frac{82,6}{39} e^{0,732\varphi} + 0,64} = \sqrt{2,12e^{0,732\varphi} + 0,64}.$$

Результаты расчета сводим в табл. П.1.

Форма пластины ротора этого конденсатора приведена на рис. П.4.

Таблица П.1

φ°	0	18°	36°	54°	72°	90°	108°	126°	154°	162°	180°
φ , рад	0	$\frac{\pi}{10}$	$2\frac{\pi}{10}$	$3\frac{\pi}{10}$	$4\frac{\pi}{10}$	$5\frac{\pi}{10}$	$6\frac{\pi}{10}$	$7\frac{\pi}{10}$	$8\frac{\pi}{10}$	$9\frac{\pi}{10}$	π
r , мм	16,6	18,2	20,0	22,1	24,4	27,1	30,1	33,6	37,5	41,8	46,7

Приложение 6

**ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НЕКОТОРЫХ
ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МАГНИТОДИЭЛЕКТРИКОВ**

(из книги Л. И. Рабкина и Н. А. Шольц «Магнитодиэлектрики и феррокатушки». — М.-Л.: Госэнергиздат, 1948)

№№ пп.	Наименование материала	Относительная магнитная проницаемость μ_r	Температурный коэффициент магнитной проницаемости $T\mu_r \times 10^5$	Составляющие потерь			Примерный диапазон частот, в котором применяется магнитодиэлектрик
				$\rho_h \times 10^3$	$\rho_f \times 10^9$	$\rho_n \times 10^3$	
1	Магнетит прессованный	6 ÷ 9	+(100 ÷ 150)	1,0	10,0	0,5	100 кГц — 10 МГц
2	Карбонильное железное прессованное	8 ÷ 9	+10	0,4	3,0	0,4	100 кГц — 40 МГц
3	Альсифер ВЧ-20	17 ÷ 21	-20	1,0	15,0	1,0	10 кГц — 100 кГц
4	Альсифер РЧ-9	8 ÷ 10	-10	0,8	4,0	0,6	100 кГц — 10 МГц
5	Альсифер РЧ-6	5 ÷ 6	-4	—	2,0	—	100 кГц — 50 МГц
6	Прессперм ВЧ-20	17 ÷ 21	+20	1,0	15,0	1,0	10 кГц — 100 кГц

$$\operatorname{tg} \delta_m = \rho_h H + \rho_f f + \rho_n,$$

где H и f — напряженность и частота магнитного поля (H — в эрстедах, f — в герцах).

Пример П.4. Требуется найти $\operatorname{tg} \delta_m$ для альсифера РЧ-9 при $f = 1$ МГц и малой напряженности магнитного поля.

Решение.

$$\operatorname{tg} \delta_m = \rho_h H + \rho_f f + \rho_n = 0,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0 + 4 \cdot 10^{-9} \cdot 10^6 + 0,6 \cdot 10^{-9} = 4,6 \cdot 10^{-3}.$$

Приложение 7

РАСЧЕТ ИНДУКТИВНОСТИ КАТУШЕК

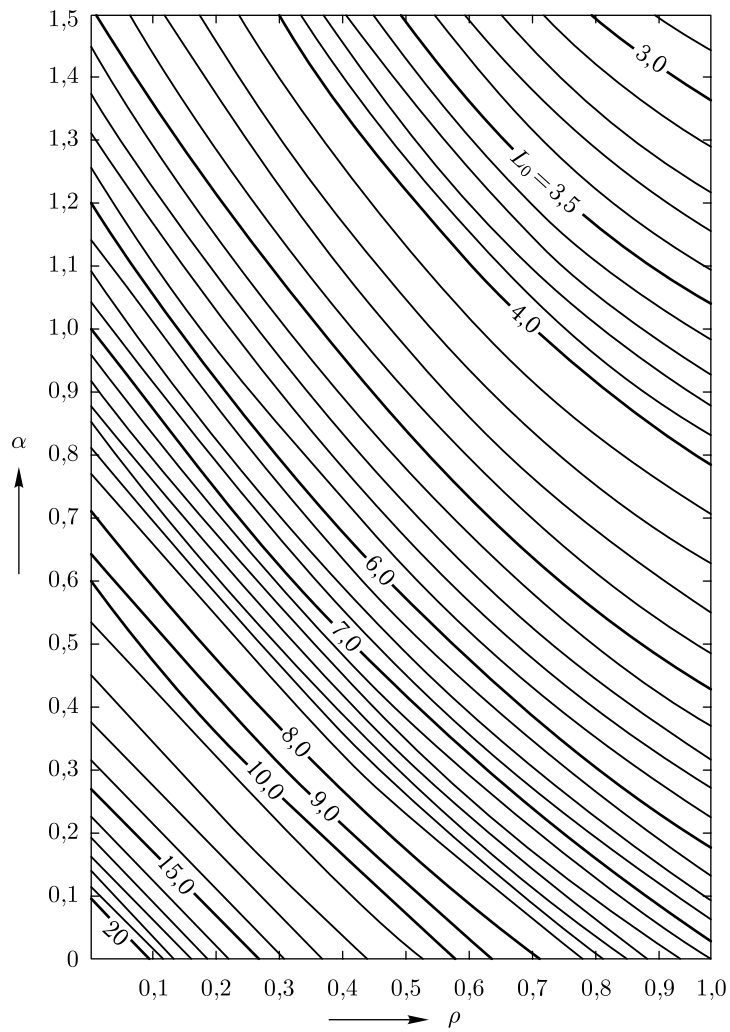


Рис. П.5. График для определения индуктивности катушек

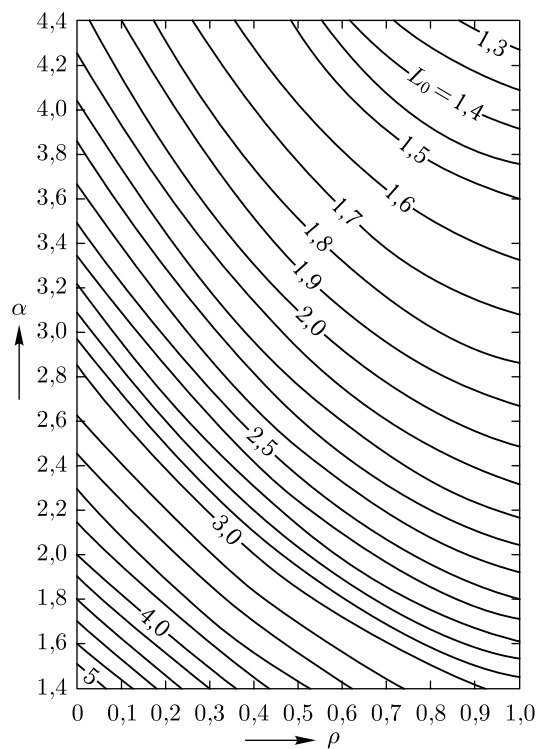


Рис. П.6. График для определения индуктивности катушек

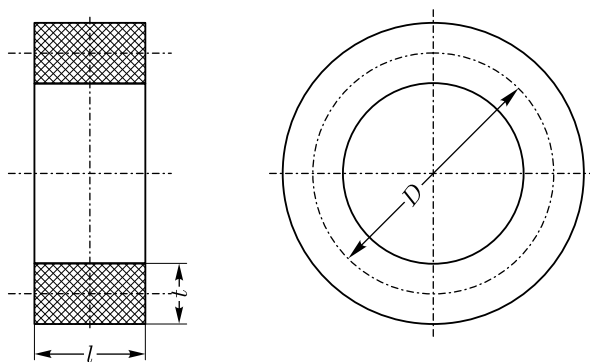


Рис. П.7. Обозначения размеров намотки катушки индуктивности

Формулы для определения индуктивности различных катушек с воздушным магнитопроводом могут быть приведены к виду

$$L = L_0 D n^2 10^{-9} \text{ Гн}, \quad (\text{П.12})$$

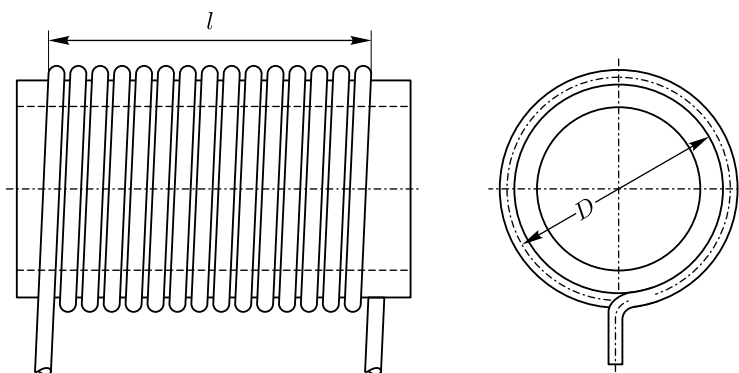


Рис. П.8. Однослойная цилиндрическая катушка индуктивности

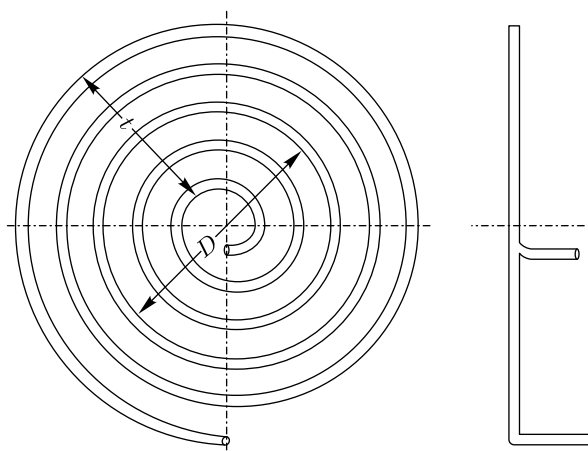


Рис. П.9. Спиральная катушка индуктивности

где L — индуктивность катушки в генри, L_0 — коэффициент, зависящий от соотношения размеров и формы катушки, D — средний диаметр катушки в сантиметрах, n — число витков катушки.

Формула (П.12) справедлива для случая, когда ток равномерно заполняет все сечение намотки. Поправки, учитывающие неравномерное распределение тока, имеющие место тогда, когда медь провода не полностью заполняет сечение намотки или когда из-за поверхностного эффекта ток не заполняет равномерно сечения провода обычно бывают малыми и в большинстве случаев их не учитывают.

На рис. П.5 и П.6 приведены графики для определения L_0 .

На графиках

$$\rho = \frac{t}{D},$$

где t — толщина намотки в сантиметрах (рис. П.7), D — средний диаметр намотки в сантиметрах и

$$\alpha = \frac{l}{D},$$

где l — размер намотки вдоль оси в сантиметрах.

Если намотка однослойная (рис. П.8), то отношение $\frac{t}{D}$ мало и можно считать $\rho = 0$, если спиральная (рис. П.9), то можно считать $\alpha = 0$.

Пример П.5. Катушка (рис. П.7) имеет следующие размеры: $t = 0,5$ см, $l = 0,4$ см, $D = 2$ см, число витков $n = 100$.

Определить индуктивность катушки.

Решение. Найдем величины ρ и α :

$$\rho = \frac{t}{D} = \frac{0,5}{2} = 0,25;$$

$$\alpha = \frac{l}{D} = \frac{0,4}{2} = 0,2.$$

Этим значениям ρ и α соответствует $L_0 = 10,75$.

Поэтому

$$L = L_0 D n^2 \cdot 10^{-9} = 10,75 \cdot 2 \cdot 10^4 \cdot 10^{-9} = 21,5 \cdot 10^{-5} \text{ Гн} = 215 \text{ мкГн}.$$

Приложение 8

**НАХОЖДЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ДИАМЕТРА
ПРОВОДА КАТУШКИ**

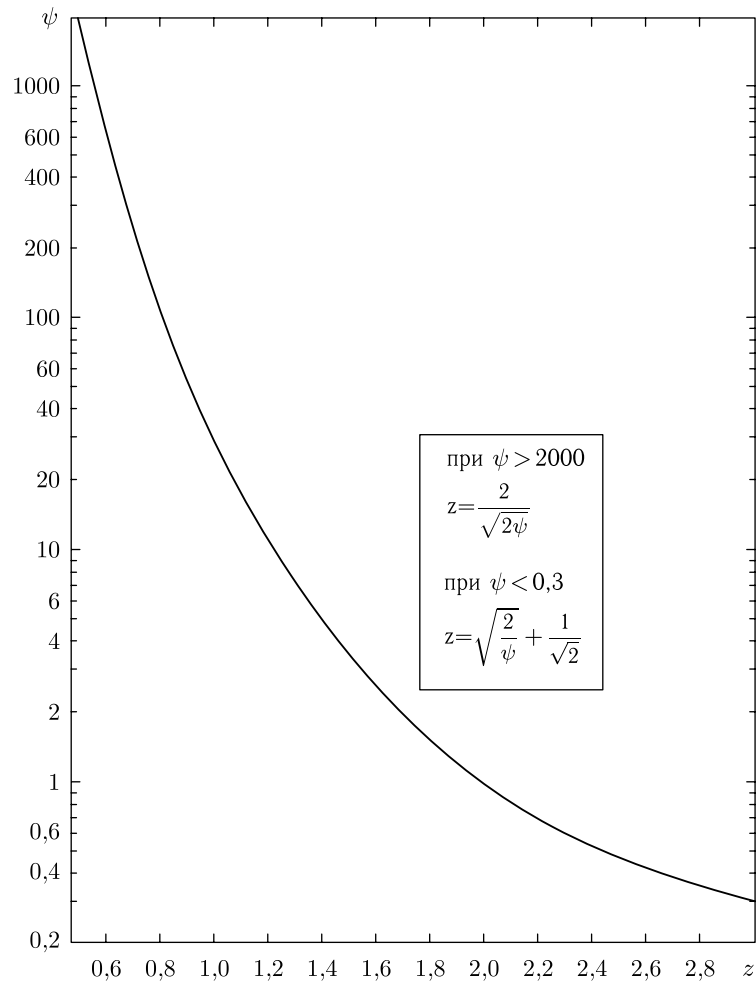


Рис. П.10. График для определения оптимального диаметра провода

Нахождение d_{opt} производят в следующей последовательности:

1. По известным размерам катушки и известному числу витков находят для заданной частоты f величину

$$\psi = \left(\frac{\kappa n}{2aD_n} \right)^2,$$

где $a = \frac{z}{d} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r \omega}{\rho}}$ (для технической меди $a = 0,106\sqrt{f}$).

Остальные обозначения те же, что в ф-ле (2.25).

2. По известной величине ψ находим z (рис. П.10).

3. Находим оптимальный диаметр провода $d_{opt} = \frac{z}{a}$.

Пример П.6. Найти оптимальный диаметр провода катушки, данные которой и рабочая частота приведены в примерах П.5 и 2.3.

Решение. 1. Определяем a :

$$a = 0,106\sqrt{f} = 0,106\sqrt{4 \cdot 10^6} = 212.$$

Находим ψ :

$$\psi = \left(\frac{\kappa n}{2aD_n} \right)^2 = \left(\frac{15 \cdot 100}{2 \cdot 212 \cdot 2,5} \right)^2 = 2.$$

3. По графику, изображенному на рис. П.10, находим, что

$$z = 1,69.$$

4. Определяем оптимальный диаметр

$$d_{opt} = \frac{z}{a} = \frac{1,69}{212} = 0,008 \text{ см} = 0,08 \text{ мм}.$$

Таким образом, диаметр провода катушки надо несколько уменьшить. Расчет будет справедлив лишь в том случае, если при намотке катушки проводом меньшего диаметра, размеры ее сохранятся прежними. Для этого, очевидно, надо взять провод с более толстой изоляцией.

Приложение 9

СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ ТКЛ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ

(из книги В. Б. Пестрякова и Д. Д. Сачкова «Конструирование деталей и узлов радиоаппаратуры». — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1947)

№ пп.	Тип намотки и конструктивные особенности	ТКЛ × 10 ⁶
1	Катушки многослойные типа «Универсаль» на гетинаксовых или бумажных каркасах	100 ÷ 200
2	Катушки однослойные на гетинаксовых или бумажных каркасах	80 ÷ 150
3	Катушки однослойные на керамических каркасах	40 ÷ 80
4	Катушки однослойные на каркасах из высокочастотных диэлектриков. Витки катушек представляют собой слой металла, нанесенный на каркас и прочно связанный с ним	10 ÷ 20
5	Катушки однослойные бескаркасные	50 ÷ 80

Приложение 10

РАСЧЕТ ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ КАТУШЕК

1. Взаимная индуктивность двух коаксиальных колец.

Если диаметры колец соответственно равны D_1 и D_2 ($D_1 \leq D_2$), а расстояние между плоскостями колец равно r (рис. П.11), то взаимную индуктивность M определяют по формуле

$$M = \beta \sqrt{D_1 D_2} \cdot 10^{-9} \text{ Гн.} \quad (\text{П.13})$$

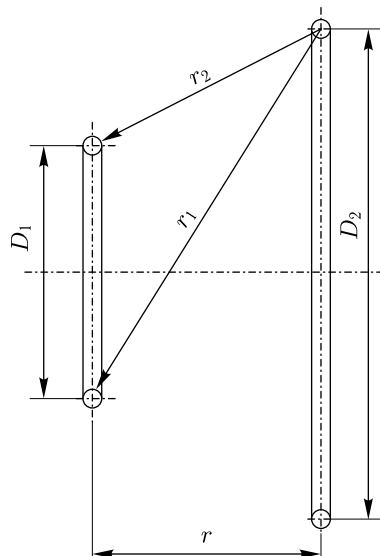


Рис. П.11. Обозначения размеров, необходимых для определения взаимной индуктивности двух коаксиальных колец

Коэффициент β определяют из графика, приведенного на рис. П.12.
На графике

$$r_1 = \sqrt{r^2 + \frac{(D_2 + D_1)^2}{4}},$$
$$r_2 = \sqrt{r^2 + \frac{(D_2 - D_1)^2}{4}}.$$

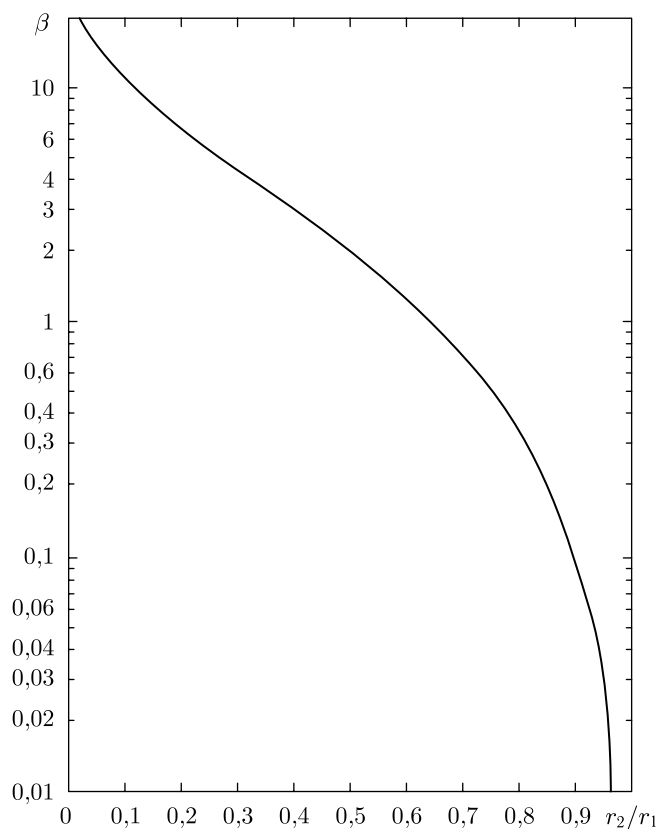


Рис. П.12. График для определения взаимной индуктивности двух коаксиальных колец

2. Взаимная индуктивность двух коаксиальных катушек.

Если числа витков катушек соответственно равны n_1 и n_2 , то взаимную индуктивность M определяют по формуле:

$$M = n_1 n_2 M_{cp}, \quad (\text{П.14})$$

где M_{cp} — среднее значение взаимной индуктивности отдельных витков первой и второй катушки.

Если наибольшее расстояние между витками каждой из катушек много меньше, чем расстояние между катушками, то все витки каждой катушки будут находиться примерно в одинаковых условиях и M_{cp} можно вычислить по ф-ле (П.13), взяв данные средних витков катушек.

Если это условие не удовлетворяется, то каждую катушку мысленно разбивают на несколько частей, вычисляют по ф-ле (П.13) взаимную индуктивность средних витков частей первой и второй катушек (во всех комбинациях) и определяют M_{cp} как среднее арифметическое из полученных значений.

Пример П.7. Определить взаимную индуктивность катушек, обмотки которых изображены на рис. П.13. Число витков катушек $n_1 = n_2 = 100$.

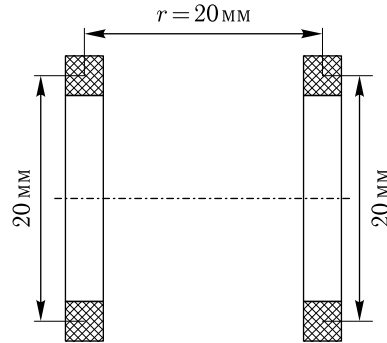


Рис. П.13. Намотка катушек примера П.7

Решение. Из рис. П.13 определяем:

$$D_1 = D_2 = 2 \text{ см},$$

$$r = 2 \text{ см}.$$

Находим r_1 и r_2 :

$$r_1 = \sqrt{r^2 + \frac{(D_2 + D_1)^2}{4}} = \sqrt{2^2 + \frac{(2+2)^2}{4}} = 2,83 \text{ см},$$

$$r_2 = \sqrt{r^2 + \frac{(D_2 - D_1)^2}{4}} = \sqrt{2^2 + \frac{(2-2)^2}{4}} = 2 \text{ см}.$$

Отсюда $\frac{r_2}{r_1} = 0,707$.

Из графика, изображенного на рис. П.12, находим $\beta \approx 0,7$.

Определяем M_{cp} :

$$M_{cp} = \beta \sqrt{D_1 D_2} \cdot 10^{-9} = 0,7 \sqrt{2 \cdot 2} \cdot 10^{-9} = 1,4 \cdot 10^{-9} \text{ Гн}$$

и

$$M = n_1 n_2 M_{cp} = 100 \cdot 100 \cdot 1,4 \cdot 10^{-9} = 14 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} = 14 \text{ мкГн}.$$

Пример П.8. Определить взаимную индуктивность катушек, обмотки которых изображены на рис. П.14. Число витков левой катушки $n_1 = 300$, число витков правой катушки $n_2 = 200$.

Решение. Разобьем левую катушку на три части, а правую на две, как показано на рис. П.14. Средние витки этих частей обозначены на рисунке цифрами. Необходимые размеры будем брать непосредственно из рисунка.

Для витков 1.1 и 2.1 имеем:

$$D_1 = 3 \text{ см}; \quad D_2 = 5 \text{ см}; \quad r = 3 \text{ см},$$

откуда

$$r_1 = 5 \text{ см}; \quad r_2 = 3,16 \text{ см}; \quad \frac{r_2}{r_1} = 0,632;$$

$$\beta = 1,06 \quad \text{и} \quad M_{11-21} = 4,1 \cdot 10^{-9} \text{ Гн}.$$

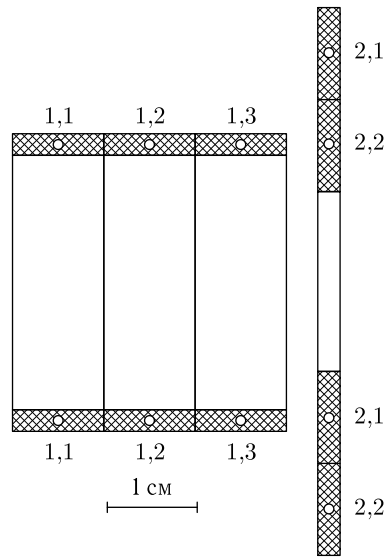


Рис. П.14. Намотка катушек примера П.8

Для витков 1.1 и 2.2:

$$D_1 = 3 \text{ см}; \quad D_2 = 3 \text{ см}; \quad r = 3 \text{ см},$$

откуда

$$M_{11-22} = 2,1 \cdot 10^{-9} \text{ Гн.}$$

Для витков 1.2 и 2.1:

$$D_1 = 3 \text{ см}; \quad D_2 = 5 \text{ см}; \quad r = 2 \text{ см},$$

откуда

$$M_{12-21} = 7,75 \cdot 10^{-9} \text{ Гн.}$$

Для витков 1.2 и 2.2:

$$D_1 = 3 \text{ см}; \quad D_2 = 3 \text{ см}; \quad r = 2 \text{ см},$$

откуда

$$M_{12-22} = 4,65 \cdot 10^{-9} \text{ Гн.}$$

Для витков 1.3 и 2.1:

$$D_1 = 3 \text{ см}; \quad D_2 = 5 \text{ см}; \quad r = 1 \text{ см},$$

откуда

$$M_{13-21} = 14,3 \cdot 10^{-9} \text{ Гн.}$$

Для витков 1.3 и 2.2:

$$D_1 = 3 \text{ см}; \quad D_2 = 3 \text{ см}; \quad r = 1 \text{ см},$$

откуда

$$M_{13-22} = 12,4 \cdot 10^{-9} \text{ Гн.}$$

Находим среднее значение

$$M_{cp} = \frac{M_{11-21} + M_{11-22} + M_{12-21} + M_{12-22} + M_{13-21} + M_{13-22}}{6} =$$

$$= \frac{4,1 + 2,1 + 7,75 + 4,65 + 14,3 + 12,4}{6} \cdot 10^{-9} = 7,55 \cdot 10^{-9} \text{ Гн.}$$

Наконец, по формуле (П.14) находим взаимную индуктивность катушек:

$$M = n_1 n_2 M_{cp} = 300 \cdot 200 \cdot 7,55 \cdot 10^{-9} = 453 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} = 453 \text{ мкГн.}$$

3. Взаимная индуктивность двух коаксиальных цилиндрических катушек малой толщины (рис. П.15).

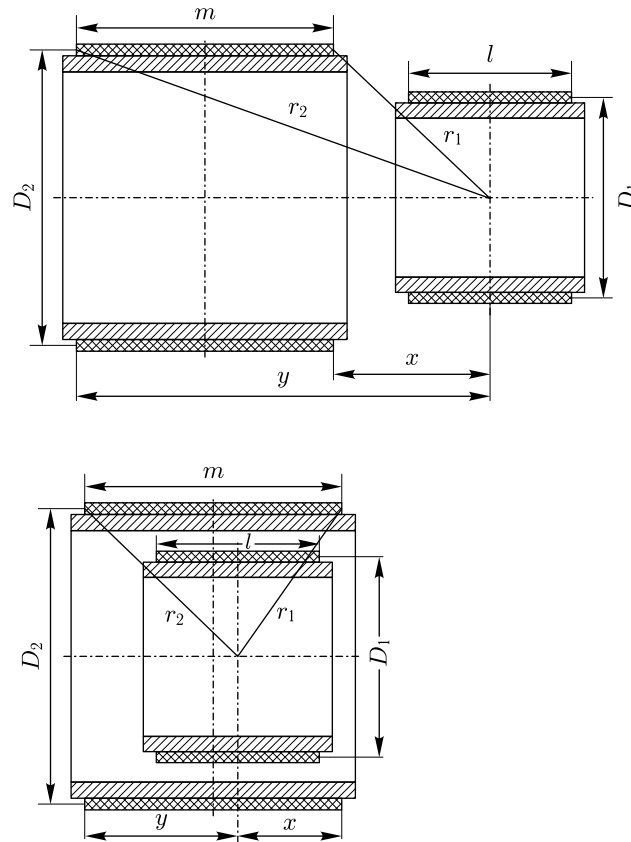


Рис. П.15. Обозначения размеров, необходимых для определения взаимной индуктивности

Расчет взаимной индуктивности в этом случае может быть произведен по формуле

$$M = 0,617 \frac{D_1^2 \cdot D_2^2}{lm} [k_1 q_1 + k_2 q_2] n_1 n_2 \cdot 10^{-9} \text{ Гн,} \quad (\text{П.15})$$

где n_1 и n_2 — числа витков катушек; D_1, D_2 ($D_1 < D_2$), m, l, r_1, r_2, x, y — размеры, указанные на рисунках;

$$k_1 = \frac{8}{D_2^2} \left(\frac{y}{r_2} - \frac{x}{r_1} \right); \quad q_1 = l;$$

$$k_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{y}{r_1^5} - \frac{x}{r_2^5} \right); \quad q_2 = \frac{D_1^2 l}{8} \left(3 - 4 \frac{l^2}{D_1^2} \right). \quad (\text{П.16})$$

Все размеры берутся в сантиметрах.

Если середины намоток обеих катушек совпадают (рис. П.16), ф-ла (П.15) упрощается и приобретает следующий вид:

$$M = 9,87 \frac{D_1^2}{g} \left[1 + \frac{D_1^2 D_2^2}{8g^4} \left(3 - 4 \frac{l^2}{D_1^2} \right) \right] n_1 n_2 \cdot 10^{-9} \text{ Гн},$$

где l и m по-прежнему размеры намоток вдоль оси ($l < m$), D_1 и D_2 — средние диаметры намоток ($D_1 < D_2$),

$$g = \sqrt{D_2^2 + m^2}.$$

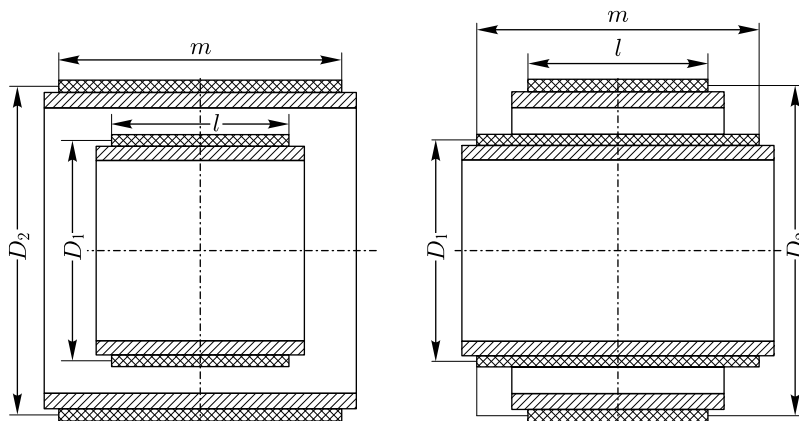


Рис. П.16. Обозначения размеров, необходимых для определения взаимной индуктивности

В большинстве случаев вторым членом, стоящим в квадратных скобках [формулы (П.15)], можно пренебречь.

Пример П.9. Определить взаимную индуктивность двух коаксиальных цилиндрических катушек (рис. П.15), если

$$n_1 = 80; \quad D_1 = 4 \text{ см}; \quad l = 4 \text{ см}; \quad x = 4 \text{ см};$$

$$n_2 = 120; \quad D_2 = 6 \text{ см}; \quad m = 6 \text{ см}; \quad y = 10 \text{ см}.$$

Решение. Находим

$$r_1 = \sqrt{x^2 + \frac{D_2^2}{4}} = \sqrt{4^2 + \frac{6^2}{4}} = 5 \text{ см,}$$

$$r_2 = \sqrt{y^2 + \frac{D_2^2}{4}} = \sqrt{10^2 + \frac{6^2}{4}} = 10,45 \text{ см;}$$

$$k_1 = \frac{8}{D_2^2} \left(\frac{y}{r_2} - \frac{x}{r_1} \right) = \frac{8}{6^2} \left(\frac{10}{10,45} - \frac{4}{5} \right) = 0,0349;$$

$$q_1 = l = 4;$$

$$k_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{y}{r_1^5} - \frac{x}{r_2^5} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{10}{5^5} - \frac{4}{10,45^5} \right);$$

$$q_2 = \frac{D_1^2 l}{8} \left(3 - 4 \frac{l^2}{D_1^2} \right) = \frac{4^2 \cdot 4}{8} \left(3 - 4 \cdot \frac{4^2}{4^2} \right) = -8;$$

затем по ф-ле (П.15) определяем M . При этом произведением $k_2 q_2$ пренебрегаем по сравнению с $k_1 q_1$:

$$M = 0,617 \frac{D_1^2 D_2^2}{lm} (k_1 q_1 + k_2 q_2) \cdot n_1 n_2 \cdot 10^{-9} =$$

$$= 0,617 \frac{4^2 \cdot 6^2}{4 \cdot 6} 0,0349 \cdot 4 \cdot 80 \cdot 120 \cdot 10^{-9} = 19,8 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} = 19,8 \text{ мкГн.}$$

4. Взаимная индуктивность катушек, вращающихся одна в другой (рис. П.17)

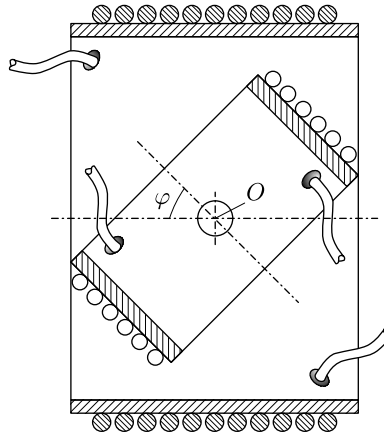


Рис. П.17. Катушки с переменной взаимной индуктивностью (внутренняя катушка может вращаться вокруг оси O)

Можно приближенно считать, что взаимная индуктивность M меняется по закону:

$$M = M_m \cos \varphi, \quad (\text{П.17})$$

где M_m — максимальная взаимная индуктивность (при $\varphi = 0$), определяемая одним из приведенных выше способов, φ — угол между осями катушек.

Приложение 11

**ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ
ЭЛЕМЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ**

№ пп.	Наименование сопротивления	Диапазон номиналь- ных величин сопротивле- ний, Ом	Температур- ный коэффи- циент TKR $\times 10^3$
1	Остеклованные нихромовые	0,3 ÷ 50 000	0,1 ÷ 0,4
2	Остеклованные константановые	0,3 ÷ 50 000	0,05
3	Углеродистые (типа ВС)	50 ÷ 10 ⁷	0,6 ÷ 2,0
4	Карбокерамические	5 ÷ 10 000	0,7 ÷ 1,5

Приложение 12

**СОКРАЩЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН,
ВСТРЕЧАЮЩИХСЯ В КНИГЕ**

№ пп.	Название величин	Единица измерения (практическая)	Сокращенное обозначение
1	Сила тока	ампер	А
2	Напряжение	вольт	В
3	Сопротивление	ом	Ом
4	Проводимость	мо	мо
5	Мощность	ватт	Вт
6	Емкость	фарада	Ф
7	Индуктивность и взаимная индуктивность	генри	Гн
8	Частота	герц	Гц
9	Напряженность магнитного поля	ампервиток на метр	А/м

Наименования кратных и дольных единиц образуются путем применения приставок, указанных в нижеследующей таблице:

Наименование	Отношение к главной единице	Сокращенное обозначение	Наименование	Отношение к главной единице	Сокращенное обозначение
пико	10^{-12}	п	дека	10	дк
нано	10^{-9}	н	гекто	10^2	г
микро	10^{-6}	мк	кило	10^3	к
милли	10^{-3}	м	мега	10^6	М
санти	10^{-2}	с	гига	10^9	Г
деци	10^{-1}	д	тера	10^{12}	Т