

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
**«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)**

**Л.Ю. Солдатова**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И ЗАДАНИЯ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ**

**ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

**«Радиоматериалы и радиокомпоненты»**

**для студентов специальности 160905 –Техническая эксплуатация  
транспортного радиооборудования**

**2012**

## Содержание

1. Общие указания по решению задач . . . . .	3
2. Проводниковые материалы и резисторы. . . . .	4
2.1 Основные соотношения . . . . .	4
2.2 Задания для практических занятий . . . . .	5
3. Диэлектрические материалы и конденсаторы . . . . .	10
3.1 Основные соотношения . . . . .	10
3.2 Задания для практических занятий . . . . .	12
4. Индуктивные элементы . . . . .	16
4.1 Основные соотношения . . . . .	16
4.2 Задачи для практических занятий . . . . .	17
4.3 Расчет параметров катушек индуктивности . . . . .	18
Список литературы . . . . .	29

## 1. Общие указания по решению задач

Прежде чем решать задачу, надо вспомнить физические процессы, законы и соотношения, относящиеся к данному вопросу. Обратите внимание на размерности заданных величин. При необходимости надо перевести размерности в одну систему единиц. Все аналитические решения следует проводить по общеизвестным правилам. Рекомендуется решать задачи в общем виде. Сначала записать исходные формулы, сделать при необходимости соответствующие преобразования, получить конечные формулы, а затем подставить в эти формулы числовые значения и вычислить результат. При выполнении вычислений рекомендуется сначала сократить порядки, а затем производить выполнение арифметических действий со значащими цифрами. Если решение задачи в общем виде связано с громоздкими выражениями, то можно производить решение по шагам. Ход всех преобразований должен быть объяснен. Вычисления, как правило, достаточно делать с точностью до второго знака после запятой, нет смысла производить вычисления с точностью до третьего знака, так как исходные данные обычно бывают заданы с меньшей точностью.

Для выполнения заданий студенту на практических занятиях необходимо иметь при себе тетрадь для практических занятий, ручку, конспект лекций или учебник по курсу, микрокалькулятор или другое устройство, с помощью которого можно проводить вычисления.

## 2. Проводниковые материалы и резисторы

### 2.1 Основные соотношения

Удельное сопротивление проводникового материала  $\rho = \rho_T + \rho_{ост}$

где  $\rho_T$  – сопротивление, обусловленное рассеянием электронов на тепловых колебаниях атомов в узлах кристаллической решетки;

$\rho_{ост}$  – добавочное (остаточное) сопротивление, обусловленное рассеянием электронов на дефектах структуры.

Плотность тока в проводнике можно определить по формуле:

$$j = q \cdot n \cdot v_{др},$$

где  $q$  – заряд электрона;

$n$  – концентрация электронов;

$v_{др}$  – дрейфовая скорость.

В общем случае величина сопротивления резистора  $R$  определяется формулой

$$R = \rho \frac{l}{s}, \text{ Ом}$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление токопроводящего элемента,

$l$  – длина пути прохождения тока,

$s$  – площадь поперечного сечения токопроводящего элемента.

Для резисторов поверхностного типа цилиндрической формы: без спиральной нарезки

$$R = \rho \frac{l}{\pi D h}, \text{ Ом}$$

со спиральной нарезкой

$$R = \rho \frac{N \pi D}{(t - a) h}, \text{ Ом}$$

где  $l$  – длина образующей цилиндра токопроводящего слоя резистора без нарезки,

$h$  – толщина токопроводящего слоя,

$D$  – наружный диаметр стержня,

$N$  – число витков спиральной нарезки,

$t$  – шаг спиральной нарезки,

$a$  – ширина спиральной нарезки.

Для тонкопленочного резистора

$$R = \rho_{\square} \frac{l}{b}, \text{ Ом}$$

где  $\rho_{\square}$  – сопротивление квадрата пленки,

$l, b$  – длина и ширина тонкопленочного резистора.

Сопротивление квадрата пленки  $\rho_{\square}$  связано с удельным сопротивлением следующим соотношением

$$\rho_{\square} = \frac{\rho}{h},$$

где  $h$  – толщина пленки.

Температурный коэффициент сопротивления резистора (ТКС) характеризует относительное изменение сопротивления резистора при изменении температуры окружающей среды на  $1^{\circ}\text{C}$

$$TKC = \frac{\Delta R}{R_0 \Delta T},$$

где  $R_0$  – сопротивление резистора при нормальной температуре  $T_0$ ,

$\Delta T = T - T_0$ ,  $T$  – положительная или отрицательная температура,

$\Delta R = R - R_0$ ,  $R$  – сопротивление резистора при температуре  $T$ .

При прохождении тока через токопроводящий элемент в нем выделяется тепловая энергия, которая рассеивается в окружающую среду. Эта тепловая энергия оценивается мощностью рассеивания резистора

$$P = I^2 \cdot R \text{ Вт,}$$

где  $I$  – величина протекающего через резистор тока.

В соответствии с ГОСТами в нашей стране установлены шесть рядов для выпуска резисторов: E6, E12, E24, E48, E96, E192. Для ряда E6 резисторы имеют в каждой декаде следующие номиналы: 1,0, 1,5, 2,2, 3,3, 4,7, 6,8. А для ряда E12 следующие номиналы: 1,0, 1,2, 1,5, 1,8, 2,2, 2,7, 3,3, 3,9, 4,7, 5,6, 6,8, 8,2.

Сопротивление провода переменному току высокой частоты больше сопротивления этого же провода постоянному току. Коэффициент увеличения сопротивления для провода круглого сечения

$$K_R = \frac{d}{4\Delta},$$

где  $d$  – диаметр провода,

$\Delta$  – глубина проникновения электромагнитного поля в проводник

$$\Delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \gamma \mu \mu_0}},$$

где  $f$  – частота, Гц

$\gamma$  – удельная проводимость токопроводящего материала,

$\mu$  – магнитная проницаемость токопроводящего материала,

$\mu_0$  – магнитная постоянная, равная  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Температурный коэффициент электрического сопротивления провода

$$TKR = TK\rho - TKl$$

где  $TK\rho$  – температурный коэффициент удельного сопротивления материала провода,

$TKl$  – температурный коэффициент линейного расширения материала провода.

## 2.2 Задания для практических занятий по теме

### «Проводниковые материалы и резисторы»

2.2.1 Кабель из алюминия, используемый для передачи электрической энергии, имеет длину 1000 метров, а диаметр его равен 2 сантиметрам. Учитывая, что удельное сопротивление алюминия равно  $2,5 \cdot 10^{-8}$  Ом·м, рассчитайте сопротивление проводника.

2.2.2 Из никелевой ленты шириной 1 см и толщиной 1 мм необходимо изготовить шунт сопротивлением 0,4 Ом. Какой длины должна быть лента, если удельное сопротивление никеля  $\rho = 0,068$  мкОм·м?

2.2.3 Вычислить падение напряжения на полностью включенном реостате, изготовленном из константановой проволоки длиной 10 метров при плотности тока  $5 \text{ А/мм}^2$ , если удельное сопротивление константана  $\rho = 0,5$  мкОм·м.

2.2.4 Определить длину нихромовой проволоки диаметром 0,5 мм, используемой для изготовления нагревательного устройства с сопротивлением 20 Ом при температуре  $1000^\circ\text{C}$ , полагая, что при  $20^\circ\text{C}$  параметры нихрома:

$\rho = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ ,  $\text{TK}_{\rho} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ,  $\text{TK}_1 = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ .

2.2.5 Из железной проволоки диаметром 0,2 мм надо намотать электронагревательный элемент мощностью 90 Вт с рабочей температурой 520°C. Напряжение сети 220 В. Какова должна быть длина проволоки элемента, если удельное сопротивление железа при комнатной температуре  $\rho = 0,1 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ , а  $\text{TK}_{\rho} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ ?

2.2.6 Удельное сопротивление Al при 0°C равно  $\rho = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{мм}^2\cdot\text{м}^{-1}$ , температурный коэффициент удельного сопротивления  $0,0043^{\circ}\text{C}^{-1}$ . Найти в омах сопротивление алюминиевого провода длиной  $l = 200 \text{ м}$  и сечением  $S = 6 \text{ мм}^2$  при температуре  $t = 40^{\circ}\text{C}$ .

2.2.7 Резистор на плоской диэлектрической поверхности образован резистивным слоем прямоугольной формы. Ширина резистивного слоя 0,4 мм, а длина - 3 мм. Электрическое сопротивление резистора равно 4,5 кОм. Как и во сколько раз изменится сопротивление резистора, если ширину резистивного слоя увеличить в 2 раза, а длину уменьшить в 2 раза?

2.2.8 Сопротивление плоской резистивной пленки прямоугольной формы равно 4,5 кОм. Ширина резистивного слоя 0,4 мм, а длина - 3 мм. Чему равно сопротивление квадрата пленки? Какое следует взять соотношение сторон прямоугольника для изготовления из этого резистивного слоя резистора с электрическим сопротивлением 7,5 кОм?

2.2.9 У меди, легированной 0,89 ат.% олова при температуре 20°C удельное электрическое сопротивление равно 0,042 мкОм·м. Во сколько раз изменится удельное сопротивление этого материала при изменении температуры от минус 50°C до плюс 59°C? Удельное сопротивление чистой меди при 20°C равно 0,0168 мкОм·м,  $\text{TK}_{\rho_{\text{Cu}}} = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .

2.2.10 При температуре 20°C удельное электрическое сопротивление меди, легированной 1,01 ат.% мышьяка, равно 0,084 мкОм·м. Чему будет равно удельное электрическое сопротивление сплава при температуре 70°C, если содержание мышьяка в сплаве уменьшить до 0,32 ат.%? Удельное сопротивление чистой меди при 20°C равно 0,0168 мкОм·м,  $\text{TK}_{\rho_{\text{Cu}}} = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .

2.2.11 Электрическое сопротивление проводника (диаметр 0,6 мм, длина 15 м), изготовленного из сплава меди с 0,4 ат.% сурьмы, равно 2 Ом при 20°C. Чему будет равно электрическое сопротивление проводника, если содержание сурьмы в сплаве уменьшить до 0,08 ат.%? Удельное сопротивление чистой меди при 20°C равно 0,0168 мкОм·м,

2.2.12 Во сколько раз активное электрическое сопротивление круглого медного провода диаметром 0,5 мм при температуре 150°C на частоте 50 МГц больше сопротивления этого же провода при температуре 50°C на частоте 1 МГц? Длина провода 7,2 метра,  $\rho_{\text{Cu}} = 0,017 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ,  $\text{TK}_{\rho_{\text{Cu}}} = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .

2.2.13 Во сколько раз активное электрическое сопротивление круглого медного провода диаметром 0,9 мм при температуре 60°C на частоте 1 МГц больше сопротивления этого же провода постоянному току при температуре 20°C? Длина провода 5,6 м,  $\rho_{\text{Cu}} = 0,017 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ,  $\text{TK}_{\rho_{\text{Cu}}} = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .

2.2.14 На переменном токе на частоте 100 МГц активное электрическое сопротивление круглого медного провода равно 4,7 Ом. На поверхность этого провода нанесли слой серебра. Какой должна быть толщина слоя серебра, чтобы сопротивление этого провода на частоте 1 ГГц определялось только слоем серебра?  $\rho_{\text{Cu}} = 0,017 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ,  $\rho_{\text{Ag}} = 0,015 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ .

2.2.15 Для ряда Еб, имеющего допуск  $\pm 20\%$ , необходимо проверить перекрытие всех областей, обеспечиваемое номиналами от 100 до 1000 Ом.

2.2.16 Рассчитать мощность, которая рассеивается на резисторе с номинальным сопротивлением 200 Ом, если к нему приложено напряжение 20 В.

2.2.17 Определить удельное сопротивление нихромовой проволоки, используемой для изготовления проволочного резистора номиналом 100 Ом, длина намотки проволоки 20 мм, количество витков 40, диаметр диэлектрического стержня 6 мм.

2.2.18 Резистор имеет номинальное сопротивление 68 Ом и температурный коэффициент сопротивления  $\text{ТКС} = +100 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Рассчитайте его величину при температурах 100  $^\circ\text{C}$ , 150  $^\circ\text{C}$ , минус 25  $^\circ\text{C}$  (комнатная температура 25 $^\circ\text{C}$ ).

2.2.19 Составить графики изменения сопротивления резистора номиналом 1,5 кОм для следующих температурных коэффициентов сопротивления:  $10 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $100 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $1000 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Определите различия между первым и третьим вариантами при температуре 100 $^\circ\text{C}$ .

2.2.20 На диэлектрическую подложку нанесена металлическая пленка толщиной 0,1 мкм, имеющая прямоугольную форму размерами 1 мм x 5 мм. Сопротивление пленки при напряжении, приложенном в продольном направлении, составляет 100 Ом. Определить сопротивление квадрата пленки, а также сопротивление пленки в поперечном направлении (параллельно меньшей стороне прямоугольника).

2.2.21 Углеродистый резистор и проволочный резистор, изготовленный из нихрома имеют одинаковое номинальное сопротивление 100 Ом. Резисторы соединены параллельно и включены под напряжение 50 В. одинаковая ли мощность будет выделяться в этих резисторах?

2.2.22 Проволочный нихромовый резистор и резистор на основе диоксида олова (полупроводниковый), имеющие одинаковое номинальное сопротивление 100 Ом включены параллельно и на них подано напряжение 40 В. Как будут меняться во времени токи, протекающие через эти резисторы? Отсчет времени вести с момента включения напряжения.

2.2.23 Проволочный нихромовый резистор и резистор на основе диоксида олова (полупроводниковый), имеющие одинаковое номинальное сопротивление 100 Ом включены последовательно и на них подано напряжение 40 В. Как будут меняться во времени токи, протекающие через эти резисторы? Отсчет времени вести с момента включения напряжения.

2.2.24 Стержень из графита соединен последовательно с медным стержнем того же сечения. Определить при каком отношении длин стержней сопротивление этой композиции не зависит от температуры. Удельное сопротивление меди  $\rho_{\text{Cu}} = 0,017 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ,  $\text{ТКР}_{\text{Cu}} = 4,3 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ . Удельное сопротивление углерода  $\rho_{\text{C}} = 8 \text{ мкОм}\cdot\text{м}$ ,  $\text{ТКР}_{\text{C}} = -10^{-3} \text{ К}^{-1}$ .

2.2.25 К графитовому стержню длиной 0,2 м приложено напряжение 6 В. Определить плотность тока в стержне в первый момент времени после подачи напряжения, если удельное сопротивление графита  $\rho_{\text{Cu}} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Как и почему меняется плотность тока в стержне со временем?

2.2.26 Сопротивление квадрата поверхности резистора, покрытого металлической пленкой, равно 100 Ом. Керамическое основание резистора имеет диаметр 7,5 мм, расстояние между контактными узлами равно 11 мм. Чему равно сопротивление этого резистора? Какое сопротивление будет иметь резистор, если сделать на нем спиральную нарезку, удалив часть резистивной пленки? Ширина изолирующей канавки 0,2 мм, шаг нарезки 1 мм.

2.2.27 Электрическое сопротивление квадрата тонкой пленки МЛТ равно 400 Ом, а максимально допустимая удельная мощность рассеяния  $0,01 \text{ Вт/мм}^2$ . Требуется изготовить резистор сопротивлением 3,6 кОм, рассчитанный на рабочий ток 7,5 мА. Каковы должны быть минимальные размеры резистора прямоугольной формы, удовлетворяющие этим требованиям?

2.2.28 Методом вакуумного напыления металла на диэлектрическую подложку необходимо изготовить резистор прямоугольной формы сопротивлением 9 кОм и мощностью рассеяния 0,015 Вт, имеющий минимальные размеры. Удельная мощность рассеяния должна быть не более  $0,01 \text{ Вт/мм}^2$ , а ширина резистивного слоя должна быть не менее 0,2 мм. Определить электрическое сопротивление квадрата такой пленки.

2.2.39 Резистор изготовлен из двух прямоугольных полосок молибденовых пленок, соединенных последовательно. Сопротивление квадрата первой пленки равно 400 Ом, а второй пленки равно 1000 Ом. Температурные коэффициенты сопротивления соответственно равны  $0,8 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  и  $-1,8 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . Пленки имеют одинаковую ширину  $b_1 = b_2$ . Какое должно быть отношение длин пленок  $l_2/l_1$ , чтобы суммарное сопротивление резистора не зависело от температуры в диапазоне от 10 до  $40^\circ\text{C}$ ?

2.2.30 Резистор изготовлен из двух прямоугольных полосок молибденовых пленок, соединенных последовательно. Сопротивление квадрата первой пленки равно 400 Ом, а второй пленки равно 1000 Ом. Температурные коэффициенты сопротивления соответственно равны  $0,8 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$  и  $-1,8 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . Пленки имеют одинаковую длину  $l_1 = l_2 = l$ , а ширина первой пленки равна  $b_1 = 0,2 \text{ мм}$ . Какое должно быть отношение  $b_2/b_1$ , чтобы суммарное сопротивление резистора не зависело от температуры в диапазоне от 10 до  $40^\circ\text{C}$ ?

2.2.31 Определить сопротивление квадрата пленки пиролитического углерода, используемого для изготовления цилиндрического резистора поверхностного типа сопротивлением 320 Ом с геометрическими размерами  $l = 15,5 \text{ мм}$ ,  $D = 7,5 \text{ мм}$ .

2.2.32 Сопротивление отрезка провода из чистого металла при температуре минус  $50^\circ\text{C}$  равно 100 Ом, а при плюс  $50^\circ\text{C}$  равно 160 Ом. Определить температурный коэффициент удельного сопротивления и материал провода.

2.2.33 При повышении температуры от  $20^\circ\text{C}$  до  $94^\circ\text{C}$  удельное электрическое сопротивление проводника из чистого металла возросло в 1,48 раз. Из какого металла изготовлен проводник?

2.2.34 Сопротивление провода из чистого металла при  $20^\circ\text{C}$  и  $100^\circ\text{C}$  соответственно 19,4 Ом и 29,1 Ом. Длина провода 400 м. Чему равна площадь поперечного сечения провода?

2.2.35 При повышении температуры с 20 до  $105^\circ\text{C}$  сопротивление проводника из чистого металла увеличилось в 1,57 раза. Чему равно удельное сопротивление металла?

2.2.36 Сопротивление провода при температурах 20 и  $100^\circ\text{C}$  соответственно равно 6,1 и 9 Ом. Определите среднее значение температурного коэффициента сопротивления материала этого провода. Укажите, какому металлу оно соответствует. Чему равно сечение провода, если его длина 1000 м?

**Физические параметры чистых металлов и сплавов (при 20<sup>0</sup>С)**

Металл	Плотность, Мг/м <sup>3</sup>	Температурный коэффициент линейного расширения 10 <sup>-6</sup> , К <sup>-1</sup>	Удельное сопротивление, мкОм·м	Температурный коэффициент удельного сопротивления 10 <sup>-3</sup> , К <sup>-1</sup>	Работа выхода, эВ	Абсолютная удельная термо-ЭДС, мкВ·К <sup>-1</sup>
Алюминий	2,7	21,0	0,027	4,1	4,25	-1,3
Вольфрам	19,3	4,4	0,055	5,0	4,54	+2,0
Железо	7,87	10,7	0,097	6,3	4,31	+16,6
Золото	19,3	14,0	0,023	3,9	4,30	+1,5
Кобальт	8,85	13,5	0,064	6,0	4,41	-20,1
Медь	8,92	16,6	0,017	4,3	4,40	+1,8
Молибден	10,2	5,3	0,050	4,3	4,30	+6,3
Никель	8,96	13,2	0,068	6,7	4,50	-19,3
Олово	7,29	23,0	0,113	4,5	4,38	-1,1
Платина	21,45	9,5	0,098	3,9	5,32	-5,1
Свинец	11,34	28,3	0,190	4,2	4,00	-1,2
Серебро	10,49	18,6	0,015	4,1	4,30	+1,5
Хром	7,19	6,2	0,130	2,4	4,58	+18,0
Цинк	7,14	30,0	0,059	4,1	4,25	+1,5
Графит			8,0	-1,0		
Константан		10,0		-0,015		
Нихром		15,0	1,0	0,15		
Сталь			0,1			

### 3. Диэлектрические материалы и конденсаторы

#### 3.1 Основные соотношения

Для большинства диэлектриков в слабых электрических полях поляризованность пропорциональна напряженности поля

$$P = \varepsilon_0(\varepsilon - 1)E = \varepsilon_0\chi E,$$

где  $\varepsilon = 1 + \chi$  - относительная диэлектрическая проницаемость;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м - электрическая постоянная.

Общее сопротивление изоляции определяют как результирующее двух параллельно включенных сопротивлений:

$$R = \frac{1}{\gamma} = \frac{R_v R_s}{R_v + R_s}.$$

где  $R_v$  - объемное сопротивление,

$R_s$  - поверхностное сопротивление  $R_s = \rho_s \cdot a/b$ ,

где  $a$  - расстояние между электродами,

$b$  - длина электродов

Удельная проводимость твердых диэлектриков (в См/м) при температуре  $T$  определяется по формуле:

$$\gamma = q \cdot N_T \cdot \mu_T,$$

где  $q$  - заряд иона,

$N_T$  - концентрация ионов при температуре  $T$ ,

$\mu_T$  - подвижность ионов при температуре  $T$ .

Плотность тока в газообразных диэлектриках определяется по следующим формулам:

в области слабых полей:

$$J = q \cdot n \cdot (\mu_+ + \mu_-) \cdot E.$$

В области тока насыщения:

$$J_n = q \cdot N \cdot h,$$

где  $N$  - мощность внешнего ионизатора (число актов ионизации в  $1\text{ м}^3$  за 1 секунду),  $h$  - расстояние между электродами.

В области сильных полей

$J = q \cdot n_0 \cdot \exp(\alpha h)$  где  $n_0$  - концентрация свободных электронов около катода,  $\alpha$  - коэффициент ударной ионизации.

$$\text{Емкость конденсатора } C = \frac{Q}{U},$$

где  $Q$  - заряд конденсатора,

$U$  - напряжение на его обкладках.

В случае плоского конденсатора  $C = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \frac{S}{d}$ ,

$S$  - площадь диэлектрика,  $\text{м}^2$ ,

$d$  - толщина диэлектрика, м.

Напряжение, приложенное к конденсатору, заряжает его, при этом совершается определенная работа ( $W$ ), измеряемая в Дж. Она равна запасенной потенциальной энергии ( $E$ ):

$$W = E = \frac{C \cdot U^2}{2},$$

Скорость заряда и разряда конденсатора определяется постоянной времени  $\tau = R \cdot C$ , где  $R$  – сопротивление конденсатора. Напряжение на зажимах конденсатора при зарядке нарастает со временем по экспоненте, стремясь достичь максимальной величины  $E$

$$U(t) = E(1 - \exp(-t/\tau))$$

Через время, соответствующее  $\tau$ , конденсатор зарядится до 63% от максимальной величины, через время  $3\tau$  – до 95%, а через  $5\tau$  – до 99,3%.

При разрядке конденсатора напряжение на его обкладках уменьшается по экспоненте:

$$U(t) = U(0) \cdot \exp(-t/\tau)$$

При разрядке конденсатора через время, соответствующее  $\tau$ , на конденсаторе остается 37% от первоначального напряжения, через  $3\tau$  останется 5%, а через  $5\tau$  – только 0,7%.

Если в нижеприведенные формулы для определения емкости различных типов конденсаторов геометрические размеры подставлять в сантиметрах, то емкости получатся в пФ.

Так для плоского конденсатора

$$C = 0,0885 \frac{\varepsilon S}{d}, \text{ пФ.}$$

Для многопластинчатых, литых секционированных и пакетных конденсаторов

$$C = 0,0885 \frac{\varepsilon S}{d} (n - 1), \text{ пФ,}$$

где  $n$  – число пластин (обкладок).

Для трубчатых конденсаторов

$$C = 0,241 \frac{\varepsilon l}{\left| \lg \frac{D_2}{D_1} \right|}, \text{ пФ,}$$

где  $l$  – длина обкладок по образующей цилиндра, см,

$D_1, D_2$  – соответственно внешний и внутренний диаметры трубки, см.

Температурный коэффициент емкости (ТКЕ) характеризует относительное изменение емкости конденсатора при изменении температуры окружающей среды на  $1^\circ\text{C}$ :

$$TKE = \frac{\Delta C}{C_0 \Delta T},$$

где  $C_0$  – емкость конденсатора при нормальной температуре,

$\Delta C$  – изменение емкости при отклонении температуры от нормальной на величину  $\Delta T$ .

Величину ТКЕ можно определить через температурные коэффициенты параметров конструкции по формуле

$$TKE = ТК\varepsilon + 2ТКЛР_1 - ТКЛР_d,$$

где  $ТК\varepsilon$  – температурный коэффициент диэлектрической проницаемости диэлектрика,

$ТКЛР_1$  – температурный коэффициент изменения стороны квадратной обкладки, равной  $l$ ,

ТКЛР<sub>d</sub> - температурный коэффициент линейного расширения диэлектрика. Для конденсаторов с напыленными обкладками (слодяные) или вожженными (керамические) ТКЛР обкладок будет определяться ТКЛР диэлектрика, поэтому  $ТКЕ = ТК\varepsilon + ТКЛР_d$ .

Если материал диэлектрика представляет собой сложный диэлектрик, состоящий из химически не взаимодействующих между собой компонентов, то диэлектрическую проницаемость такого материала можно рассчитать с помощью уравнения Лихтенеккера:

$$\varepsilon^x = \Theta_1 \varepsilon_1^x + \Theta_2 \varepsilon_2^x,$$

где  $\varepsilon, \varepsilon_1, \varepsilon_2$  – соответственно относительные диэлектрические проницаемости смеси и отдельных компонентов,

$\Theta_1$  и  $\Theta_2$  – объемные доли компонентов,  $\Theta_1 + \Theta_2 = 1$ ,

$x$  – величина, характеризующая распределение компонентов и принимающая значения от +1 до -1.

При параллельном расположении компонентов  $x = +1$  и выражение для  $\varepsilon$  смеси приобретает вид

$$\varepsilon = \Theta_1 \varepsilon_1 + \Theta_2 \varepsilon_2.$$

При последовательном расположении компонентов  $x = -1$  и

$$\frac{1}{\varepsilon} = \frac{\Theta_1}{\varepsilon_1} + \frac{\Theta_2}{\varepsilon_2}.$$

Если оба компонента распределены хаотически (например, в керамике или пористых диэлектриках), то после некоторого преобразования, получаем

$$\ln \varepsilon = \Theta_1 \ln \varepsilon_1 + \Theta_2 \ln \varepsilon_2.$$

Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости сложного диэлектрика можно получить, дифференцируя соответствующее выражения для  $\varepsilon$  по температуре. Например, в случае хаотического расположения компонентов получаем

$$ТК\varepsilon = \Theta_1 ТК\varepsilon_1 + \Theta_2 ТК\varepsilon_2.$$

### 3.2 Задания для практических занятий

3.2.1 У плоского конденсатора (толщина диэлектрика 0,5 мм, площадь электродов 20 см<sup>2</sup>) при напряжении 750 В поляризованность диэлектрика  $P = 8,8 \cdot 10^{-5}$  Кл/м<sup>2</sup>. Чему равен заряд конденсатора при этом напряжении? Чему равна диэлектрическая проницаемость?

3.2.2 Расстояние между электродами плоского вакуумного конденсатора равно 4 мм. Во сколько раз увеличится емкость конденсатора, если пространство между электродами заполнить диэлектриком, у которого при напряженности электрического поля  $E = 10^5$  В/м поляризованность равна  $3,1 \cdot 10^{-6}$  Кл/м<sup>2</sup>.

3.2.3 Рассчитать энергию заряда, запасенного на обкладках конденсатора емкостью 220 мкФ, если напряжение на его обкладках равно 100 В.

3.2.4 Композиционный керамический материал изготовлен на основе двух диэлектриков с диэлектрическими проницаемостями  $\varepsilon_1 = 40$  и  $\varepsilon_2 = 80$ . Предполагая хаотическое распределение компонентов, определить состав керамики, если  $ТК\varepsilon_1 =$

$2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ;  $\text{TK}\epsilon_2 = -1,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ , а  $\text{TK}\epsilon$  смеси равен нулю. Чему равна диэлектрическая проницаемость такого материала?

3.2.5 Чтобы изготовить пластмассу с диэлектрической проницаемостью 7,5 из связующего (полистирол,  $\epsilon = 2,5$ ) и наполнителя (тиконд Т-150,  $\epsilon = 150$ ), необходимо сделать смесь, содержащую ...% полистирола.

3.2.6 Плоский конденсатор имеет двухслойную изоляцию: полистирол ( $\epsilon = 2,5$ ,  $\text{TK}\epsilon = -1,51 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ , толщина 20 мкм) и лавсан ( $\epsilon = 3,4$ ,  $\text{TK}\epsilon = 4 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ , толщина 15 мкм). Определить температурный коэффициент диэлектрической проницаемости изоляции конденсатора. Ответ округлите до двух значащих цифр.

3.2.7 У конденсатора емкостью 0,18 мкФ постоянная времени саморазрядки равна 72 минутам. Чему равно сопротивление изоляции конденсатора?

3.2.8 Постоянная времени саморазрядки слюдяного конденсатора 177 минут. Диэлектрическая проницаемость слюды равна 6. Чему равно удельное объемное сопротивление слюды?

3.2.9 У керамического цилиндрического конденсатора емкостью  $10^4$  пФ сопротивление изоляции  $1,25 \cdot 10^{10}$  Ом. Диэлектрическая проницаемость керамики равна 141. Геометрические размеры неизвестны. Поверхностные токи утечки пренебрежимо малы. Чему равно удельное объемное сопротивление керамики?

3.2.10 Определите удельное объемное сопротивление полиэтилена, используемого в качестве диэлектрика в плоском конденсаторе, и потери мощности в нем, если известно, что ток через конденсатор при постоянном напряжении 1 кВ равен  $10^{-11}$  А. Толщина диэлектрика 2 мм, площадь обкладок (с каждой стороны)  $40 \text{ см}^2$ . Поверхностной утечкой пренебрегите.

3.2.11 Емкость слюдяного металлизированного конденсатора 200 пФ при  $20^\circ\text{C}$ . Чему будет равна емкость этого конденсатора при  $100^\circ\text{C}$ , если температурный коэффициент диэлектрической проницаемости слюды принять равным  $50 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , а  $\text{TKI} = 14 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ?

3.2.12 Керамический конденсатор емкостью 1,5 нФ при  $20^\circ\text{C}$  имеет  $\text{TK}\epsilon = -750 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Чему равна его емкость при  $T = -40^\circ\text{C}$ ?

3.2.13 При напряжении 2 кВ плоский конденсатор, изготовленный из высокочастотного диэлектрика, имеет заряд  $3,5 \cdot 10^{-8}$  Кл. При том же напряжении и при повышении температуры на 100 К заряд возрастает на 1%. Определить диэлектрическую проницаемость материала и температурный коэффициент диэлектрической проницаемости, если толщина диэлектрика между пластинами конденсатора  $h=2$  мм, а площадь каждой пластины  $S = 5 \text{ см}^2$ . ( $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ ).

3.2.14 Пленочный конденсатор из поликарбоната с диэлектрической проницаемостью равной 3 теряет за время 30 минут половину сообщенного ему заряда. Полагая, что утечка заряда происходит только через пленку диэлектрика, определить его удельное сопротивление.

3.2.15 Полиэтиленовый пленочный конденсатор был заряжен при напряжении 1 кВ, а затем отключен от источника напряжения и оставлен с разомкнутыми электродами. Через 6 минут после отключения разность потенциалов между электродами конденсатора была равна 120 В. Диэлектрическая проницаемость полиэтилена равна 2,3. Чему равно его удельное объемное сопротивление?

3.2.16 Определить сопротивление изоляции конденсатора, если через 20 секунд после отключения его от источника питания разность потенциалов на обкладках уменьшилась на 5%. Толщина диэлектрика равна 0,1 мм, его диэлектрическая проницаемость равна 6, площадь обкладок равна  $100 \text{ см}^2$ .

3.2.17 После отключения внешнего источника напряжение на обкладках конденсатора за 10 минут уменьшилось на 90%. Определить удельное объемное сопротивление диэлектрика, если его диэлектрическая проницаемость равна 4.

3.2.18 Конденсатор емкостью 200 пФ из пленки полистирола заряжен до напряжения 100 В, а затем отключен от источника напряжения. Через 5 суток на выводах конденсатора сохранилось напряжение 10 В. определить сопротивление изоляции конденсатора, вычислить удельное объемное сопротивление полистирола, если его диэлектрическая проницаемость 2,5.

3.2.19 Два дисковых конденсатора, изготовленных из одного и того же керамического материала, имеют различные номинальные емкости и напряжения:  $C_{ном1} = 75$  пФ,  $U_{ном1} = 500$  В,  $C_{ном2} = 510$  пФ,  $U_{ном2} = 100$  В. Чему равно отношение постоянных времени этих конденсаторов?

3.2.20 У плоского воздушного конденсатора при расстоянии между электродами 0,01 м и напряженности электрического поля  $10^4$  В/м плотность тока равна  $6 \cdot 10^{-15}$  А/м<sup>2</sup>. Если расстояние между электродами уменьшить в 2 раза, а напряженность поля увеличить в 1,3 раза, то чему будет равна плотность тока?

3.2.21 Определить ток в плоском воздушном конденсаторе (площадь электродов равна 12 см<sup>2</sup>, расстояние между электродами 2 см) при напряжении 750 В и давлении воздуха 760 мм рт. ст. Мощность внешнего ионизатора примите равной

3.2.22 Цилиндрический стержень диаметром 10 мм и длиной 20 мм из диэлектрика с удельным объемным сопротивлением  $10^{13}$  Ом·м и удельным поверхностным сопротивлением  $10^{14}$  Ом покрыт с торцов металлическими электродами. Чему равно сопротивление между электродами?

3.2.23 Цилиндрический стержень диаметром  $D = 20$  мм и длиной  $l = 50$  мм из фенопласта с удельным сопротивлением  $10^{11}$  Ом·м и удельным поверхностным сопротивлением  $5 \cdot 10^{12}$  Ом зажат между двумя металлическими электродами, между которыми поддерживается напряжение 100 В постоянного тока. Определите ток через стержень и потери мощности в нем.

3.2.24 Цилиндрический стержень диаметром  $D = 5$  мм и длиной  $l = 15$  мм из фторопласта-4 с удельным сопротивлением  $10^{15}$  Ом·м и удельным поверхностным сопротивлением  $10^{16}$  Ом зажат между двумя металлическими электродами, между которыми поддерживается напряжение 500 В постоянного тока. Определите ток через стержень и потери мощности в нем.

3.2.25 Образец прямоугольной формы (высотой 6,6 мм, площадью  $6 \times 4$  мм<sup>2</sup>) подключен к источнику постоянного напряжения 770 В. Удельная поверхностная проводимость диэлектрика равна  $3 \cdot 10^{-12}$  Ом<sup>-1</sup>. Чему равен ток утечки?

3.2.26 На две противоположные грани кубика из фторопласта-3 с ребром 10 мм нанесены слои металла, служащие электродами, через которые кубик включается в электрическую цепь. Определите величину установившегося через кубик тока и потери мощности в нем при постоянном напряжении 2 кВ. Удельное объемное сопротивление полистирола равно  $10^{15}$  Ом·м, а удельное поверхностное сопротивление  $10^{16}$  Ом.

3.2.27 При каком максимальном напряжении может работать слюдяной конденсатор емкостью  $C = 1000$  пФ с площадью обкладок  $S = 6 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>, если он должен иметь четырехкратный запас электрической прочности. Диэлектрическая проницаемость слюды равна 7, ее электрическая прочность  $E = 100$  МВ/м. Какова толщина слюдяной пластинки?

3.2.28 Определить запас по электрической прочности плоского конденсатора и толщину диэлектрика из неорганического стекла, если емкость конденсатора 68 пФ,

площадь обкладки  $10\text{см}^2$ , рабочее напряжение 10 кВ. Диэлектрическую проницаемость стекла принять равной 6,5, а его электрическую прочность равной  $5 \cdot 10^7$  В/м.

3.2.29 В плоском конденсаторе емкостью  $C = 39$  пФ используется неорганическое стекло, имеющее диэлектрическую проницаемость  $\epsilon = 6$  и пробивную напряженность  $E_{\text{пр}} = 100$  МВ/м. Какими следует выбрать толщину диэлектрика  $h$  и площадь обкладок  $S$ , если конденсатор должен работать при напряжении 16 кВ при четырехкратном запасе по электрической прочности? Возможность поверхностного пробоя при расчете не учитывать.

3.2.30 На обкладки конденсатора подали напряжение  $U_1 = 5$  кВ. Между обкладками находится однородный материал с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1 = 6$ . Затем его заменили материалом с другой диэлектрической проницаемостью, а к конденсатору приложили напряжение  $U_2 = 10$  кВ. Напряженность электрического поля в диэлектрике в обоих случаях одинакова, а расстояние между обкладками  $h_2$  во втором случае равно 4 мм. Определить расстояние между обкладками и емкость конденсатора в первом случае, если размер обкладок  $2 \times 4$  см.

3.2.31 В колебательном контуре использован полистирольный пленочный конденсатор. Рабочая температура  $20^\circ\text{C}$ . Резонансная частота 1 МГц. На сколько кГц уменьшится резонансная частота при понижении температуры до минус  $20^\circ\text{C}$  только за счет температурной зависимости диэлектрической проницаемости полистирола? (Для полистирола при  $20^\circ\text{C}$   $\epsilon = 2,5$ , при минус  $20^\circ\text{C}$   $\epsilon = 2,6$ ).

На сколько Гц изменится резонансная частота у контура с воздушным конденсатором в тех же условиях? Для воздуха  $\text{TK}\epsilon = 2,15 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , диэлектрическая проницаемость воздуха при  $20^\circ\text{C}$  равна 1,00058.

3.2.32 При температуре  $20^\circ\text{C}$  у колебательного контура резонансная частота  $f_1 = 40$  кГц. Емкость контура 2,5 мкФ, а среднее значение температурного коэффициента емкости равно  $3 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ , а температурный коэффициент индуктивности равен нулю. Резонансная частота  $f_1$  при  $20^\circ\text{C}$  больше, чем резонансная частота  $f_2$  при температуре  $90^\circ\text{C}$  в ...раза.

3.2.33 В колебательном контуре при температуре  $20^\circ\text{C}$  емкость равна 2,5 мкФ, индуктивность  $10^{-3}$  Гн. У керамического диэлектрика конденсатора среднее значение температурного коэффициента диэлектрической проницаемости  $\text{TK}\epsilon = -2 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ , температурный коэффициент линейного расширения  $\text{TKl} = 7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Толщина диэлектрика 1 мм. Электроды серебряные вожженные. Если температурный коэффициент индуктивности равен нулю, то чему равно отношение резонансной частоты при  $20^\circ\text{C}$  к резонансной частоте при  $105^\circ\text{C}$ ?

## 4. Индуктивные элементы

### 4.1 Основные соотношения

Трансформатор состоит из обмоток, расположенных на металлическом или ферритовом сердечнике. Вследствие чего обмотки пронизываются одним и тем же электромагнитным потоком  $\Phi$ . Предположим, что трансформатор идеален, т.е. обмотки не обладают активным сопротивлением и отсутствует рассеяния.

Для первичной обмотки можно написать

$$V_1 = n_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

Для вторичной обмотки соответственно

$$V_2 = -n_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

Отсюда получаем

$$\frac{V_2}{V_1} = -\frac{n_2}{n_1} = -m,$$

где  $m$  – коэффициент трансформации. Если  $n_1$  много больше, чем  $n_2$ , то напряжение  $V_1$  много больше напряжения  $V_2$ . Знак « - » перед коэффициентом трансформации показывает, что напряжения  $V_1$  и  $V_2$  находятся в противофазе. Напряжение первичной обмотки, подключенной к электросети, синусоидально, а его частота равна 50 Гц.

В случае идеального трансформатора мощность из первичной обмотки полностью передается во вторичную, наоборот, если нагрузка подключенная ко вторичной обмотке потребляет мощность  $P$ , то и первичная обмотка потребляет из сети точно такую же мощность

$$V_1 I_1 = V_2 I_2 = P.$$

При намагничивании магнитного материала переменным магнитным полем в магнитном материале наблюдаются потери на вихревые токи, на гистерезис и на магнитное последствие (или дополнительные потери).

При намагничивании материала с частотой  $f$  мощность потерь на гистерезис на единицу массы находят по формуле

$$P_g = f \oint \frac{HdB}{D},$$

где  $D$  – плотность материала.

Потери на вихревые токи зависят не только от магнитных, но и от электрических (удельное электрическое сопротивление) свойств материала и от формы сердечника. Для листового образца эти потери

$$P_g = \frac{1,64d^2 f^2 B^2 \max}{D\rho},$$

где  $B_{\max}$  – амплитуда магнитной индукции,

$d$  – толщина листа,

$\rho$  – удельное электрическое сопротивление.

## 4.2 Задачи для практических занятий

4.2.1 Трансформатор имеет первичную обмотку в 2000 витков и вторичную обмотку в 50 витков. Чему равен коэффициент трансформации? Определите напряжение на вторичной обмотке, если питание первичной обмотки осуществляется от синусоидального напряжения 220 В.

4.2.2 Трансформатор используется как повышающий. Количество витков первичной обмотки равно 200, а количество витков вторичной – 1600. Каков коэффициент трансформации? Определить чему равно напряжение на вторичной обмотке, если напряжение питания первичной обмотки 220 В. Если нагрузка потребляет 50 Вт, какой ток течет в первичной обмотке?

4.2.3 Трансформатор имеет три вторичные обмотки, каждая из которых отдает в нагрузку 40 Вт, а на первичную обмотку подано напряжение 12 В. Какую мощность потребляет первичная обмотка? В первой и второй вторичной обмотках число витков то же, что и первичной, чему равен ток в этих обмотках? Напряжение на третьей обмотке равно 48 В, какой ток течет по ней?

4.2.4 Если цилиндрический образец (диаметр 13 мм, длина 45 мм) алюминия расположить в участке неоднородного магнитного поля (напряженность магнитного поля изменяется с частотой 2,5 кГц), то при  $T = 293$  К он будет втягиваться в область сильного поля или выталкиваться? А при  $T = 0,8$  К он будет втягиваться или выталкиваться? Соответственно такой же образец цинка при  $T = 293$  К будет втягиваться или выталкиваться, а при  $T = 0,8$  К он втягивается или выталкивается?

4.2.5 Если в катушку индуктивности без сердечника (осевая длина 40 мм) внести на половину ее длины медный сердечник (длина 52 мм), то сердечник будет втягиваться в катушку или выталкиваться из катушки магнитным полем, индуктивность катушки увеличится, уменьшится, не изменится, добротность катушки увеличится, уменьшится, не изменится. Сердечник из алюминия в тех же условиях будет втягиваться, выталкиваться, индуктивность увеличится, уменьшится, не изменится, добротность катушки увеличится, уменьшится, не изменится.

4.2.6 Если цилиндрический образец ниобия (диаметр 12 мм, длина 36 мм) ввести в катушку индуктивности на половину (неоднородное магнитное поле частотой 25 кГц), то при  $T = 293$  К он будет (втягиваться в область сильного магнитного поля или выталкиваться?), а при 9 К он будет втягиваться или выталкиваться? В тех же условиях образец магния при 293 К (втягивается или выталкивается?), а при 9К он втягивается или выталкивается?

4.2.7 На частоте 2 кГц в сердечнике трансформатора удельные магнитные потери на гистерезис равны 2 Вт/кг и удельные магнитные потери на вихревые токи равны 2 Вт/кг. Чему равны суммарные удельные магнитные потери в сердечнике при прочих равных условиях на частоте 400 Гц?

4.2.8 В сердечнике трансформатора суммарные удельные потери на гистерезис и на вихревые токи при частоте 1 и 2 кГц составляют соответственно 2 и 6 Вт/кг при прочих равных условиях. Чему равны удельные магнитные потери на вихревые токи в сердечнике на частоте 2 кГц?

4.2.9 На частоте 50 Гц удельные потери на вихревые токи в сердечнике из электротехнической стали при индукции магнитного поля  $B=1,2$  Тл составляют 6,5 Вт/кг. Чему равны потери на вихревые токи в сердечнике на частоте 400 Гц при магнитной индукции 0,5 Тл, если масса сердечника равна 0,5 кг?

4.2.10 В сердечнике трансформатора на частоте 50 Гц удельные потери на гистерезис при индукции магнитного поля 0,1 и 0,5 Тл составляют 0,15 и 1,97 Вт/кг соответственно. Чему равны удельные потери на гистерезис при индукции магнитного поля 0,6 Тл на частоте 200 Гц? (Зависимость потерь на гистерезис от индукции опишите степенной функцией  $P_r \sim B^n$ , где  $n = \text{const}$ )

4.2.11 Сердечник трансформатора набран из листов электротехнической стали (толщина листа 0,35 мм, плотность  $7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , удельное электрическое сопротивление  $0,5 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$ , магнитная проницаемость 800). Магнитная индукция в сердечнике  $B = 0,5 \cdot \sin 314t$  (Тл) создается переменным током, протекающим по обмотке (число витков равно 150). Вычислить удельные потери на вихревые токи в сердечнике. Также вычислить удельные потери на вихревые токи на частоте 400 Гц.

#### 4.3 РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ [6]

##### 4.3.1 Расчет индуктивности однослойных катушек

Расчет индуктивности катушки с однослойной рядовой обмоткой без сердечника рекомендуется проводить по формуле

$$L = L_0 W^2 D \cdot 10^{-3}, \text{ мкГн} \quad (4.1)$$

где  $W$  – число витков;

$D$  – диаметр катушки, см,

$L_0$  – поправочный коэффициент, являющийся функцией отношения  $l/D$  ( $l$  – длина обмотки). Значения  $L_0$  можно определить по графику рис. 4.1.

Если катушка намотана с шагом  $\tau$ , то ее индуктивность равна

$$L = L' - 2\pi W D (A+B) \cdot 10^{-3}, \text{ мкГн} \quad (4.2)$$

где  $L'$  – индуктивность катушки, определяемая по формуле (4.1). Второе слагаемое – поправка, учитывающая шаг намотки  $\tau$  ( $\tau$  – это расстояние между осевыми или образующими линиями провода двух соседних витков).

$A$  – поправочный коэффициент, учитывающий разницу в индуктивности витка круглого сечения и витка из тонкой узкой ленты.

$A = \varphi(d/\tau)$ , ( $d$  – диаметр провода обмотки без изоляции).

$B$  – поправочный коэффициент, учитывающий разницу во взаимной индукции между действительными витками и витками сплошной обмотки.  $B = \varphi(W)$

Значения коэффициентов  $A$  и  $B$  представлены на рис 4.2 и 4.3.

##### 4.3.2 Расчет собственной емкости катушек индуктивности

Расчет собственной емкости однослойных катушек можно проводить по эмпирической формуле

$$C_0 = K \cdot K_1 \cdot D \quad (4.3)$$

$C_0$  – собственная емкость, пФ,

$D$  – диаметр катушки, см,

$K$  – коэффициент, величина которого зависит от соотношения между шагом намотки и диаметром провода,

$K_1$  – коэффициент, величина которого зависит от соотношения между длиной и диаметром катушки.

Значения коэффициентов  $K$  и  $K_1$  представлены на рис. 4.4 и 4.5 соответственно.

Формула (4.3) дает достаточно точные расчеты для катушек с гладким каркасом из диэлектрика со средним значением диэлектрической проницаемости ( $\varepsilon = 4 - 6$ ). Для катушек с нарезным каркасом  $C_0$  больше на 20 – 25%.

Емкость бескаркасной катушки или катушки с ребристым каркасом больше на 15 – 20%

При каркасах, диэлектрическая проницаемость которых больше или меньше указанного значения, собственная емкость соответственно больше или меньше расчетной.

Пропитка и обволакивание катушки увеличивает емкость на 20 – 30%.

Для приближенных расчетов при  $W = 4 - 6$  можно принимать  $C_0 \approx 0,5D$ .

### 4.3.3 Расчет добротности катушек индуктивности

Добротность катушки индуктивности

$$Q = \frac{wL}{R_L} \quad (4.4)$$

при заданной частоте  $w$  и индуктивности  $L$  определяется ее активным сопротивлением  $R_L$ .

Активное сопротивление катушки складывается из сопротивления переменному току; сопротивления, вносимого диэлектрическими потерями в каркасе; сопротивления, вносимого собственной емкостью и сопротивлений, вносимых потерями в экранах, сердечниках и т.п. Значение того или иного слагаемого определяется частотой.

Сопротивление катушки переменному току как при однослойной, так и при многослойной обмотке одножильным проводом равно

$$r_f = r_0 \left[ F(z) + \left( \frac{K_2 W d}{2D} \right)^2 \cdot G(z) \right], \quad (4.5)$$

где  $r_f$  – сопротивление катушки переменному току при частоте  $f$ ,

$r_0$  – сопротивление провода постоянному току,

$d$  – диаметр провода без изоляции,

$D$  – диаметр катушки с однослойной обмоткой или наружный диаметр многослойной обмотки,

$K_2$  – коэффициент, учитывающий влияние размеров катушки на эффект близости,

$F(z)$  - коэффициент, учитывающий влияние поверхностного эффекта,

$G(z)$  - коэффициент, учитывающий влияние эффекта близости.

Значения коэффициента  $K_2$  для однослойных и для тонких и длинных многослойных обмоток с небольшим числом слоев приведены на рис. 4.6.

Значения коэффициентов  $F(z)$  и  $G(z)$  определяются из таблицы 4.2 при помощи параметра  $z$

$$z = 0,105 \cdot d \cdot \sqrt{f} \quad (4.6)$$

где  $d$  – диаметр провода без изоляции, см,

$f$  – частота, Гц.

Сопротивление постоянному току однослойной катушки

$$r_0 = \rho \frac{l}{s}, \text{ Ом} \quad (4.7)$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление меди 0,0175 Ом•мм<sup>2</sup>/м,

$l$  – длина провода обмотки, м,

$s$  – площадь поперечного сечения провода, мм<sup>2</sup>,

$$l \cong \pi DW, \quad s = \pi d^2/4$$

Все расчетные величины свести в таблицу.

Таблица 4.1

**Технические характеристики катушек для расчетов параметров**

№ катуш	D, мм	l, мм	W	d, мм	$\tau$ , мм	l/D	f, МГц
1	30	54	37	0,67	1,5	1,8	2,4
6	23	12	12	0,67	1,1	0,53	7,6
8	16	13	15	0,67	0,93	0,81	7,6
9	30	30	37	0,67	0,83	1,0	2,4
10	16	27	32	0,2	0,25	1,69	7,6

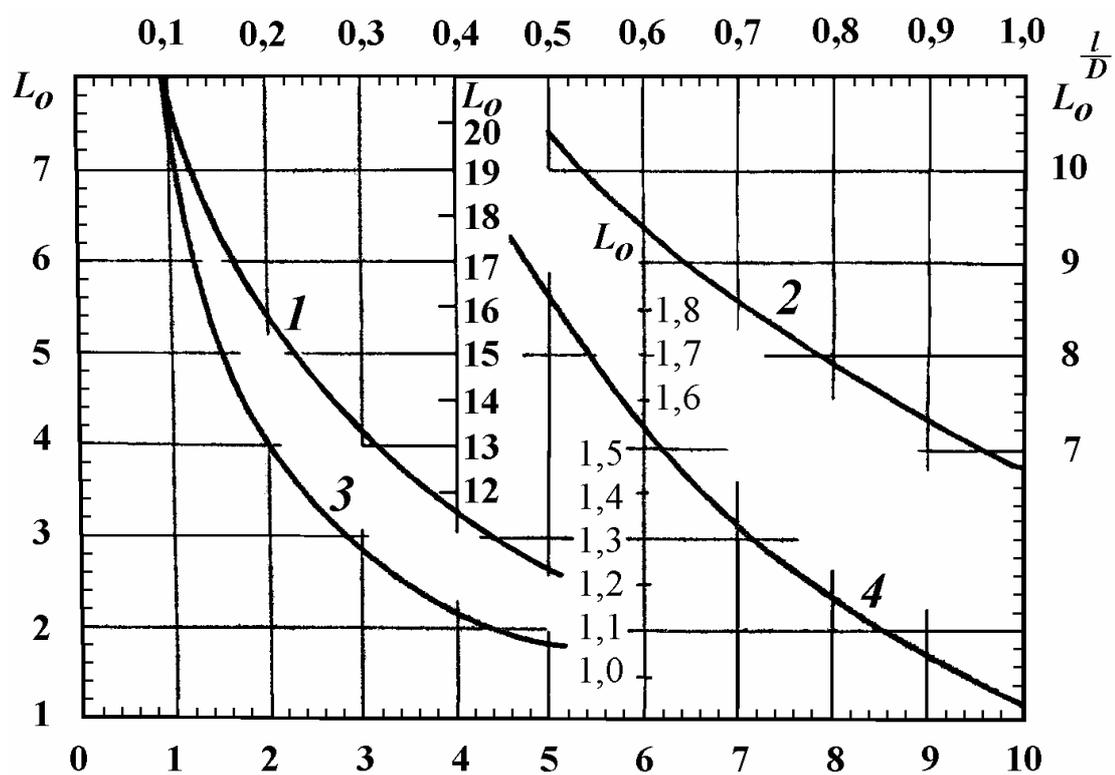


Рис. 4.1 Значения коэффициента  $L_0$  для однослойных катушек

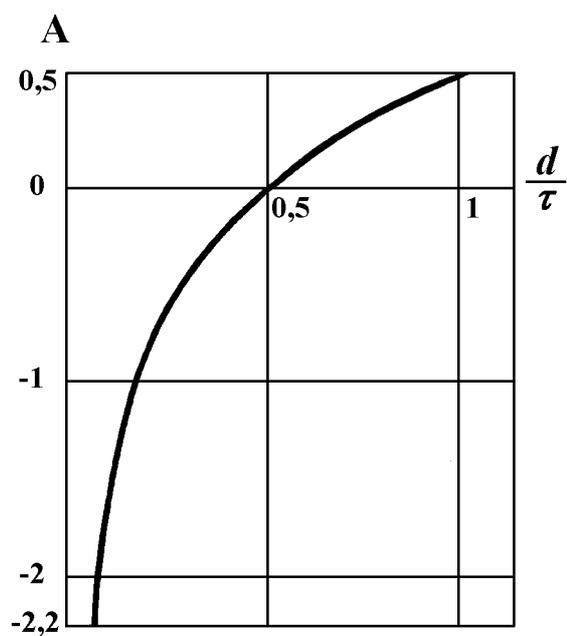


Рис. 4.2 Значения коэффициента **A** в зависимости от отношения диаметра провода в изоляции к шагу намотки

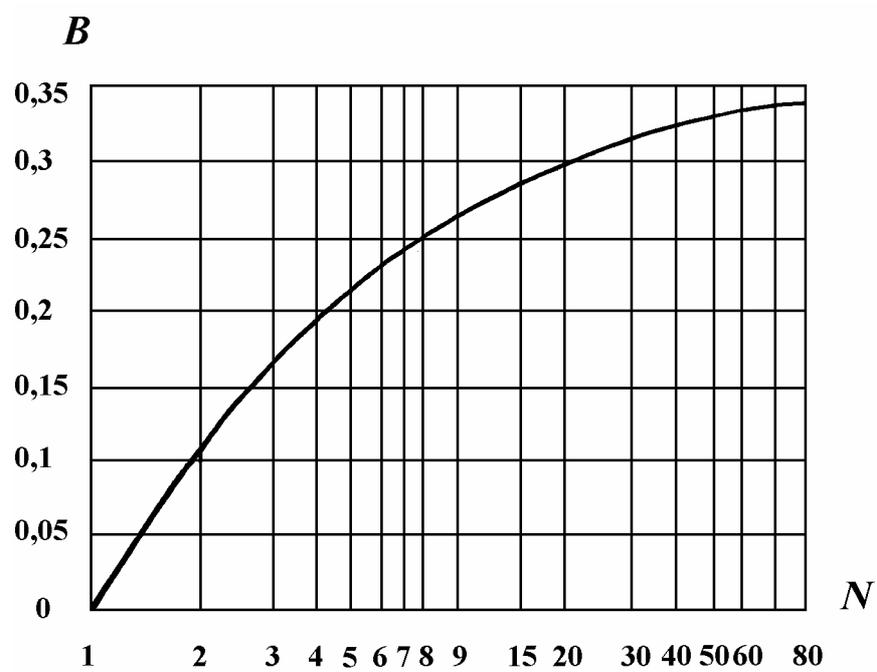


Рис. 4.3 Значения коэффициента  $B$  в зависимости от числа витков

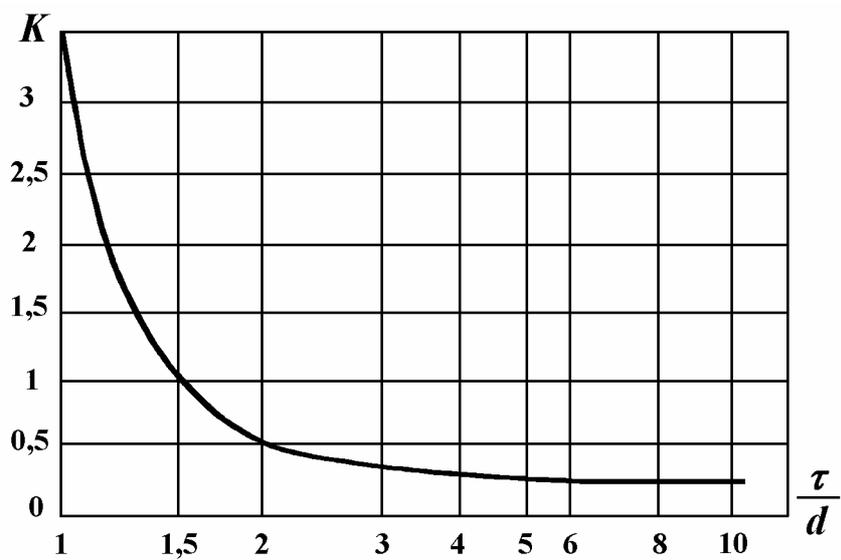


Рис. 4.4 Значения коэффициента  $K$  в зависимости от соотношения между шагом намотки и диаметром провода ( $\tau/d$ )

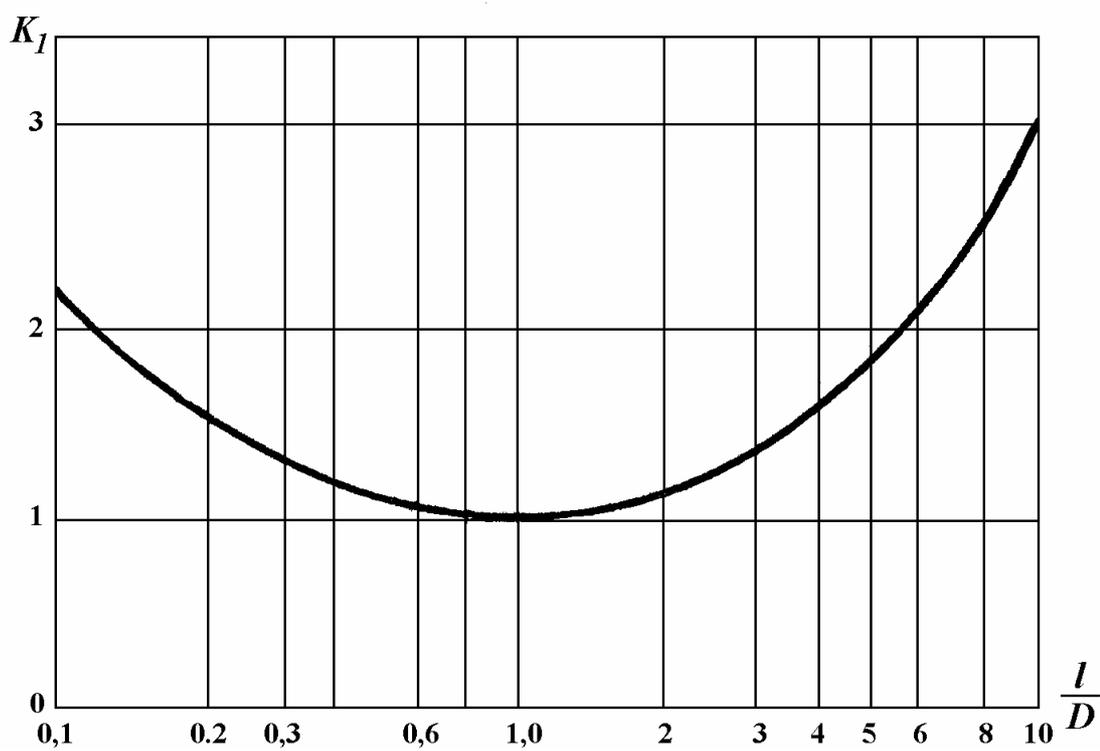


Рис. 4.5 Значения коэффициента  $K_I$  в зависимости от соотношения между длиной катушки и ее диаметром ( $l/D$ )

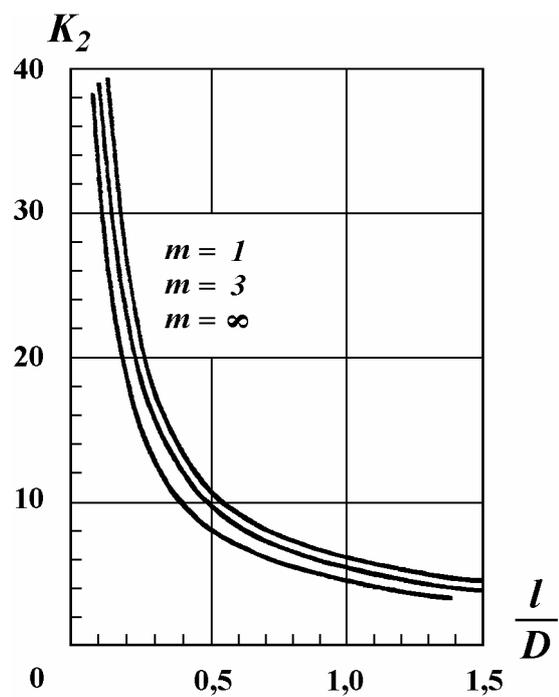


Рис. 4.6 Значения коэффициента  $K_2$  для расчета сопротивления однослойных и тонких многослойных катушек ( $m$  – число слоев)

Таблица 4.2

Таблица значений коэффициента  $F(z)$  и  $G(z)$ 

$z$	$F(z)$	$G(z)$	$z$	$F(z)$	$G(z)$
0,1	1,000	$\left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \frac{z^4}{64}$	4,6	1,899	0,6858
0,2	1,000		4,7	1,935	0,7030
0,3	1,000		4,8	1,971	0,7203
0,4	1,000		4,9	2,007	0,7376
0,5	1,000	0,00097	5,0	2,043	0,7550
0,6	1,001	0,00202	5,2	2,114	0,7902
0,7	1,001	0,03373	5,4	2,184	0,8255
0,8	1,002	0,00632	5,6	2,254	0,8609
0,9	1,003	0,01006	5,8	2,324	0,8962
1,0	1,005	0,01519	6,0	2,394	0,9316
1,1	1,008	0,0220	6,2	2,463	0,9671
1,2	1,011	0,0306	6,4	2,533	1,003
1,3	1,015	0,0413	6,6	2,603	1,038
1,4	1,020	0,0541	6,8	2,673	1,073
1,5	1,026	0,0691	7,0	2,743	1,109
1,6	1,033	0,0863	7,2	2,813	1,144
1,7	1,042	0,1055	7,4	2,884	1,180
1,8	1,052	0,1265	7,6	2,954	1,216
1,9	1,064	0,1489	7,8	3,024	1,251
2,0	1,078	0,1724	8,0	3,094	1,287
2,1	1,094	0,1967	8,2	3,165	1,322
2,2	1,111	0,2214	6,4	3,235	1,357
2,3	1,131	0,2462	8,6	3,306	1,393
2,4	1,152	0,2708	8,8	3,376	1,428
2,5	1,175	0,2949	9,0	3,446	1,464

Продолжение таблицы 4.2

<b>z</b>	<b>F(z)</b>	<b>G(z)</b>	<b>z</b>	<b>F(z)</b>	<b>G(z)</b>
2,6	1,201	0,3184	9,2	3,517	1,499
2,7	1,228	0,3412	9,4	3,587	1,534
2,8	1,256	0,3632	9,6	3,658	1,570
2,9	1,286	0,3844	9,8	3,728	1,605
3,0	1,318	0,4049	10,0	3,799	1,641
3,1	1,351	0,4247	11,0	4,151	1,818
3,2	1,385	0,4439	12,0	4,504	1,995
3,3	1,420	0,4626	13,0	4,856	2,171
3,4	1,456	0,4807	14,0	5,209	2,348
3,5	1,492	0,4987	15,0	5,562	2,525
3,6	1,529	0,5160	16,0	5,915	2,702
3,7	1,566	0,5333	17,0	6,268	2,879
3,8	1,603	0,5503	18,0	6,621	3,056
3,9	1,640	0,5673	19,0	6,974	3,232
4,0	1,678	0,5842	20,0	7,328	3,409
4,1	1,715	0,6010	21,0	7,681	3,586
4,2	1,752	0,6179	22,0	8,034	3,763
4,3	1,789	0,6348	23,0	8,388	3,936
4,4	1,826	0,6517	24,0	8,741	4,117
4,5	1,863	0,6687	25,0	9,094	4,317
30,0	10,86	5,177	90,0	32,07	15,78
40,0	14,40	6,946	100,0	35,61	17,75
50,0	17,93	8,173			
60,0	21,46	10,48			
70,0	25,00	12,25			
80,0	28,54	14,02			

## Список литературы

1. Никулин Н.В., Назаров А.С. Радиоматериалы и радиодетали. – М.: Высшая школа, 1976.-232с.
2. Тареев Б.М. и др. Электрорадиоматериалы.- М.: Высшая школа, 1978.-336с.
3. Антипов Б.Л. и др. Материалы электронной техники: задачи и вопросы. - М.: Высшая школа, 1990.-208с.
4. Трубицын А.М. Электрорадиоматериалы. Диэлектрики. Учебное пособие.- Томск: изд-во ТАСУР. 1995,-76с.
5. Трубицын А.М. Нефедцев Е.В. Электрорадиоматериалы. Магнитные материалы. Учебное пособие. – Томск: изд-во ТАСУР. 1997, - 40 с.
6. Капилевич Р.М. Исследование катушек индуктивности. Руководство к лабораторной работе. Томск: изд-во ТИАСУР 1983,-23с.