

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

*Длительно допустимые температуры
для изоляционных материалов различных классов*

Класс	Материал	Допустимая температура, °С
У	Непропитанные и непогружённые в жидкий электроизоляционный материал волокнистые материалы из целлюлозы, щёлка и др.	90
А	То же, но погруженные в жидкий электроизоляционный состав	105
Е	Некоторые синтетические и органические плёнки и др.	120
В	Материалы на основе слюды (в том числе на органических подложках), асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами	130
Ф	То же, но применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами	155
Н	То же, но применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами, а также кремнийорганические эластомеры	180
С	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц, применяемые без связующих составов или с неорганическими или кремнийорганическими связующими составами	180

Таблица П.2

*Допустимые превышения температуры для многослойных катушек
(температура окружающего воздуха 40°С)*

Класс нагрево- стойкости	Аппараты распределения энергии. Продолжительный режим работы		Аппараты управления при- ёмниками энергии. Преры- висто-продолжительный, повторно-кратковременный и кратковременный режимы работы	
	в воздухе	в трансфор- маторном масле	в воздухе	в трансфор- маторном масле
А	65	60	80	60
Е	80	60	90	60
В	90	60	100	60
Ф	110	---	120	---
Н	130	---	140	---

Примечания: 1. Измерение температуры катушек производится по изменению их сопротивления.

2. В случае применения в аппаратах трансформаторного масла превышение температуры масла в верхнем слое допускается: в аппаратах распределения энергии до 40°С, в аппаратах управления приёмниками энергии до 60°С.

Таблица П.3

*Допустимые превышения температуры, °С,
для электрических контактов в аппаратах низкого напряжения
(температура окружающего воздуха 40 °С)*

Наименование	Аппараты распределения энергии. Продолжительный режим работы		Аппараты управления приемниками энергии. Продолжительный, прерывисто-продолжительный и кратковременный режимы работы	
	в воздухе	в трансформаторном масле	в воздухе	в трансформаторном масле
Контакты, коммутирующие цепи				
а) из меди	55	40	65 (примечания 1, 2)	65 (примечание 1)
б) гальванически покрытые серебром	примечание 3	50	примечание 3	65
в) с накладками из серебра и металлокерамических композиций на базе серебра с окисью кадмия или меди по ГОСТ 388-67	примечание 4	50	примечание 4	65
г) с накладками из других материалов	примечание 5	50	примечание 5	65
д) массивные скользящие с накладками из серебра	80	50	80	65
Блок-контакты с накладками из серебра	80	50	80 (примечание 2)	65

Окончание табл. № П.3

Наименование	Аппараты распределения энергии. Продолжительный режим работы		Аппараты управления приемниками энергии. Продолжительный, прерывисто-продолжительный и кратковременный режимы работы	
	в воздухе	в трансформаторном масле	в воздухе	в трансформаторном масле
<p>Контактные соединения внутри аппаратов и неразмыкаемые винтовые, болтовые, заклёпочные и другие жесткие (кроме паяных и сварных):</p> <p>а) из меди и её сплавов, из алюминия и его сплавов, без защитных покрытий контактных поверхностей</p> <p>б) из меди и её сплавов, из алюминия и его сплавов и из низкоуглеродистой стали, защищённые от коррозии покрытием контактных поверхностей соответствующим металлом, обеспечивающим стабильность переходного сопротивления лучше меди</p>	55	50	55	55
	65	50	65	65

Примечания: 1. При продолжительном режиме превышение температуры должно быть не более 55°C.

2. Указанное превышение температуры при повторно-кратковременных режимах работы не должно быть больше, чем при испытаниях в условиях, когда на контактах возникает электрическая дуга.

3. Температура ограничивается теплостойкостью соседних частей, если слой серебра не повреждается электрической дугой и не стирается при испытаниях на механическую износостойчивость при нагретых контактах.

4. Температура ограничивается теплостойкостью соседних частей, но не должна превышать 200°C.

5. Температура устанавливается в соответствии со свойствами материала.

Таблица П.4

Физические постоянные проводниковых материалов, применяемых в электрических аппаратах

Материал	Плотность, кг/м ³	Удельное сопротивление при 0 ⁰ С, 10 ⁻⁸ Ом·м	Температурный коэффициент сопротивления, 10 ⁻³ К ⁻¹	Теплопроводность при 0 ⁰ С, Вт/(м·К)	Температурный коэффициент теплопроводности, 10 ⁻⁴ К ⁻¹	Теплоемкость, (Дж/кг×К)	Температурный коэффициент теплоемкости, 10 ⁻⁴ К ⁻¹	Температура плавления, ⁰ С	Температура испарения, ⁰ С	Модуль упругости, 10 ¹⁰ Н/м ²
Алюминий твердотянутый	2700	2,62	4,2	210	4,5	950	4,7	660	1800	7,06
Бронза оловянистая твердотянутая	8700	14...16	0,6...0,7	64	17...20	360	-	900...950	-	10,8...11,8
Бронза бериллиевая литая	8220	7,2...9	-	84,0	-	140	-	-	-	-
Бронза бериллиевая твердотянутая	-	5,3	-	170	-	-	-	-	-	10,3
Вольфрам	19300	5,1	4,2	170	3	140	0,3	3410	5900	34,3
Гранит	1700... 1800	700...1400	-1,3	160	-5...-10	650...850	35	-	3650	0,3...0,9
Дюралюмин	2750	3,3	2,2	160	-	930	-	650	-	7,0
Железо	7900	9...10	6,5	79,5	-3,9	640	0,5	1530	2450	19,6...21,6
Кадмий	8640	7,0	4,3	92	-1,2	230	-	321	770	4,9...6,7

Продолжение табл. № П.4

Материал	Плотность, кг/м ³	Удельное сопротивление при 0 ⁰ С, 10 ⁻⁸ Ом·м	Температурный коэффициент сопротивления, 10 ⁻³ К ⁻¹	Теплопроводность при 0 ⁰ С, Вт/(м·К)	Температурный коэффициент теплопроводности, 10 ⁻⁴ К ⁻¹	Теплоемкость, (Дж/кг×К)	Температурный коэффициент теплоемкости, 10 ⁻⁴ К ⁻¹	Температура плавления, ⁰ С	Температура испарения, ⁰ С	Модуль упругости, 10 ¹⁰ Н/м ²
Константан (400...700)	8700...8900	45...52	0,003...0,005	-	-	-	-	1270	-	-
Латунь Л68 твердотянутая	8500	7,0	1,5	100	-	380	1,1	900	-	10,8
Латунь Л62 твердотянутая	-	7,2	-	-	-	-	-	900	-	9,8
Латунь Л59 отожженная	8900	7,2	-	-	-	-	-	900	-	19,9...9,8
Манганин (250...300)	8100...8400	42...50	0,03...0,06	-	-	-	-	960	-	-
Медь твердотянутая	8700...8900	1,62	4,3	390	-	390	1,0	1083	2600	10,8...8,12
Молибден	10200	4,5...5,0	4,3	146	-3,0	272	-	2620	3560	34,3
Никель	8800	7,2	6,1	70	-0,5	460	4,3	1455	2730	20,6

Окончание табл. № П.4

Материал	Плотность, кг/м ³	Удельное сопротивление при 0 ⁰ С, 10 ⁻⁸ Ом·м	Температурный коэффициент сопротивления, 10 ⁻³ К ⁻¹	Теплопроводность при 0 ⁰ С, Вт/(м·К)	Температурный коэффициент теплопроводности, 10 ⁻⁴ К ⁻¹	Теплоемкость, (Дж/кг×К)	Температурный коэффициент теплоемкости, 10 ⁻⁴ К ⁻¹	Температура плавления, ⁰ С	Температура испарения, ⁰ С	Модуль упругости, 10 ¹⁰ Н/м ²
Нихром (Х20Н80) (1000...1100)	8200	10...112	0,14	-	-	-	-	1390	-	-
Олово	7300	11,0	4,5	64	-4,7	230	1,3	232	2270	3,9...5,9
Свинец	11300	19,5	4,1	35	-5	130	0,9	327,4	1540	1,57
Серебро твердотянутое	10500	1,5	4,0	420	-0,5	234	0,77	960	1955	7,4
Сталь	7800	10...13	9,0	40	-4	470	7,3	1300...1400	-	20,6...21,6

Таблица П.5

Основные свойства листовой электротехнической стали

Марка стали	Толщина листа	Магнитная индукция В, Тл, при напряженности магнитного поля, А/см						Полные удельные потери, Вт/кг, при 50 Гц и макси- мальных значениях индук- ции			Удельное электриче- ское сопро- тивление, 10^{-8} Ом·м
		500	1 000	2 500	5 000	10 000	30 000	1,0	1,5	1,7	
		не менее						не более			
Горячекатаные стали											
1211	0,5	-	-	1,53	1,64	1,74	2,0	3,3	7,7		25
1212	0,5	-	-	1,5	1,62	1,75	1,98	3,2	7,5		25
1213	0,5	-	-	1,5	1,62	1,75	1,98	2,8	6,5		25
1311	0,5	-	-	1,48	1,59	1,73	1,95	2,5	6,1		40
1312	0,5	-	-	1,48	1,59	1,73	1,95	2,2	5,3		40
1411	0,5	-	-	1,46	1,57	1,72	1,94	2,0	4,4		50
1411	0,35	-	-	1,46	1,57	1,71	1,92	1,6	3,6		50
1412	0,5	-	-	1,46	1,57	1,71	1,92	1,8	3,9		50
1412	0,35	-	-	1,46	1,57	1,71	1,92	1,4	3,2		50
1511	0,5	-	1,3	1,46	1,57	1,71	1,9	1,55	3,5		60
1511	0,35	-	1,3	1,46	1,57	1,7	1,9	1,35	3,0		60
1512	0,5	-	1,29	1,45	1,56	1,69	1,89	1,4	3,1		60
1512	0,35	-	1,29	1,45	1,56	1,69	1,89	1,2	2,8		60
1513	0,5	-	1,29	1,44	1,56	1,69	1,89	1,25	2,9		60
1513	0,35	-	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89	1,05	2,5		60
1514	0,5	-	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89	1,15	2,7		60
1514	0,35	-	1,29	1,44	1,55	1,69	1,89	0,9	2,2		60
1521	0,35	1,21	1,3	1,44	-	-	-	19,0	-		57
Холоднокатаные стали											
1211	0,5	-	-	1,55	1,64	1,76	2,0	2,5	5,8		25

Таблица П.6

Коэффициент K_0 для расчета сопротивления контакта

Материал контактов	Тип контакта	Условия	Значения K_0 , мкОм · Н ^m
Медь – медь		Сильноточные	400
Латунь – сталь		Сильноточные	$3 \cdot 10^3$
Медь – медь	Плоскостной	Слаботочные	$(90 - 280) \cdot 10^3$
Медь – медь	Точечный	Слаботочные	$(140 - 170) \cdot 10^3$
Медь – медь	Щеточный	Слаботочные	$100 \cdot 10^3$

Таблица П.7

Напряжения размягчения и плавления

Материал	Напряжение размягчения, В	Напряжение плавления, В
Серебро	0,09	0,37
Медь	0,12	0,43
Никель	0,22	0,65
Платина	0,25	0,65
Вольфрам	0,4	1,1

Таблица П.8

Коэффициент k для расчета тока сваривания

Тип контакта	Материал	k , А/кГ ^{0,5}
Щеточный	Медь – латунь	3000 – 4000
Пальцевый несоустанавливающийся	Медь – медь	4100
	Латунь – латунь	5050
Пальцевый самоустанавливающийся	Медь – латунь	5750
Розеточный (на 1 элемент розетки)	Медь – латунь	5500
	Медь – медь	6000

Таблица П.9

Эмпирические формулы для расчета коэффициента теплоотдачи

Конструкция	Формула
Окрашенная прямоугольная шина, находящаяся в спокойном воздухе, большая сторона сечения которой расположена вертикально	$k_{\text{то}} = 9,2 \cdot [1 + 0,9 \cdot 10^{-2} \cdot (\theta - \theta_0)],$ Вт/(м ² · °С)
Горизонтальные цилиндрические окрашенные проводники, находящиеся в спокойном воздухе	$k_{\text{то}} = k_1 \cdot 10 \cdot [1 + k_2 \cdot 10^{-2} \cdot (\theta - \theta_0)],$ Вт/(м ² · °С)

Таблица П.10

Коэффициенты для расчета коэффициента теплоотдачи проводника

Диаметр проводника, мм	0,3	10	40	80	200
$k_1, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$	4,5	2,24	1,11	1,08	1,02
$k_2, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$	1,7	1,14	0,88	0,75	0,68

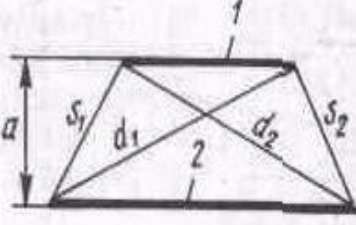
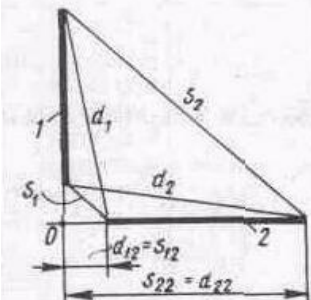
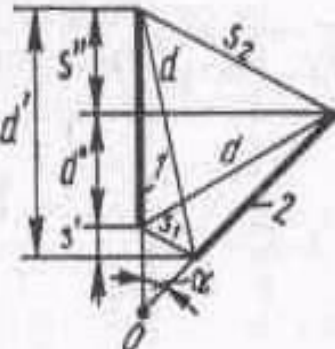
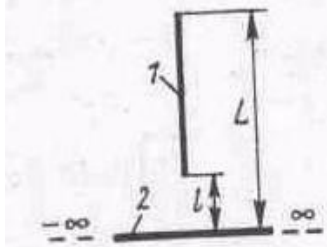
Таблица П.11

Коэффициенты для расчета коэффициента теплоотдачи стержня

Диаметр стержня, мм	k_1	k_2	Диаметр стержня, мм		k_2
10	1,24	1,14	80	1,08	0,75
40	1,11	0,88	200	1,02	0,68

Таблица П.12

Коэффициент контуров электродинамических усилий

Эскиз расположения проводника	Коэффициент контура электродинамических усилий
	<p>Проводники параллельные конечной длины (расположение любое)</p> $k_{1/2} = \frac{d_1 + d_2 - s_1 + s_2}{a}$
	<p>Проводники конечной длины, расположенные под прямым углом друг к другу</p> $k_{1/2} = \ln \frac{d_1 + d_{12} \quad d_2 + d_{22}}{s_1 + s_{12} \quad s_2 + s_{22}}$
	<p>Проводники конечной длины, расположенные в одной плоскости под углом α (верхние знаки для $\alpha < 90^\circ$, нижние – для $\alpha > 90^\circ$)</p> $k_{1/2} = \frac{1 + \cos \alpha}{\sin \alpha} \times \ln \frac{d \pm d' \quad d \mp d''}{s_1 + s' \quad s_2 + s''}$
	<p>Проводники расположены в одной плоскости под прямым углом. Проводник 2 бесконечной длины</p> $k_{1/2} = 2 \ln \frac{L}{l}$

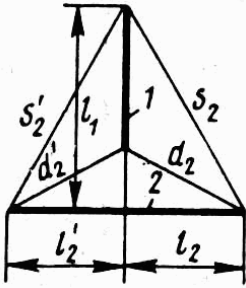
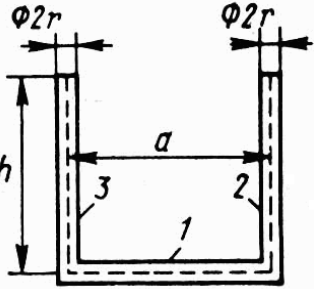
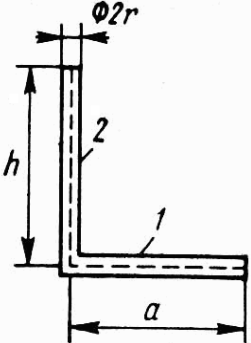
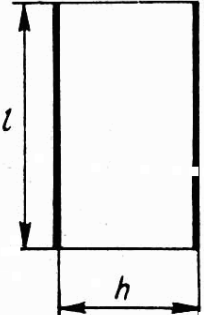
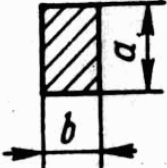
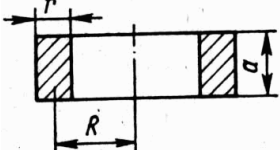
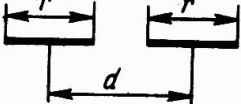
Эскиз расположения проводника	Коэффициент контура электродинамических усилий
	<p>Проводники конечной длины, расположенные в одной плоскости под прямым углом</p> $k_{1/2} = \ln \left(\frac{l_1}{l_2} \right)^2 \times \frac{d_1 + l_2}{s_2 + l_2} \frac{d_2' + l_2'}{s_2' + l_2'}$
	<p>Проводники круглые, расположенные в одной плоскости под прямым углом</p> $k_1 = k_{1/2} + k_{1/3}, \quad k_1 = 2 \left(\ln \frac{2b}{1 + \sqrt{1 + c^2}} + 0,25 \right),$ <p>где $b = \frac{a}{r}$; $c = \frac{a}{h}$</p>
	<p>Проводники круглые, расположенные в одной плоскости под прямым углом</p> $k_{1/2} = 2 \left(\ln \frac{2b}{1 + \sqrt{1 + c^2}} + 0,25 \right),$ <p>где $b = \frac{a}{r}$; $c = \frac{a}{h}$</p>
	<p>Параллельные проводники одинаковой длины</p> $k_{1/2} = \frac{2l}{h} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{h}{l} \right)^2} - \frac{h}{l} \right]$

Таблица П.13

Значения индуктивностей и взаимных индуктивностей контуров при постоянном токе и низкой частоте

Эскизы контуров	Индуктивность или взаимная индуктивность
	<p>Провод прямолинейный кругового сечения длиной l. Второй провод бесконечно удален</p> $L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \times \left(\ln \frac{2l}{r} - \frac{3}{4} \right)$
	<p>Провод прямолинейный прямоугольного сечения длиной l. Второй провод бесконечно удален</p> $L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \times \left(\ln \frac{2l}{a+b} + \frac{1}{2} \right)$
	<p>Двухпроводная линия длиной l</p> $L = \frac{\mu_0 l}{\pi} \times \left(\ln \frac{d}{r} + \frac{1}{4} \right)$
	<p>Круговое кольцо круглого сечения</p> <p>1) при любых R и r</p> $L = \mu_0 R \left[\ln \frac{8R}{r} - \frac{7}{4} + \frac{r^2}{8R^2} \left(\ln \frac{8R}{r} + \frac{1}{3} \right) \right]$ <p>2) при $R \gg r$</p> $L = \mu_0 R \left(\ln \frac{8R}{r} - \frac{7}{4} \right)$
	<p>Круговое кольцо прямоугольного сечения</p> $L = \mu_0 R \left(\ln \frac{8R}{a+r} - 0,5 \right)$
	<p>Два круговых кольца, расположенных в параллельных плоскостях</p> $M = \mu_0 R_1 \times \left(\ln \frac{8R_1}{\sqrt{h^2 + R_2 - R_1^2}} - 2 \right)$
	<p>Плоская (дисковая) катушка</p> $L = \frac{\mu_0}{2} N^2 d \left[\left(1 + \frac{\rho^2}{24} + \frac{11}{2880} \rho^4 + \dots \right) \ln \frac{4}{\rho} - \frac{1}{2} + \frac{43}{288} \rho^2 + \frac{1}{150} \rho^4 + \dots \right],$ <p>где $\rho = r/d$</p>

*Формулы для расчета магнитных проводимостей
и удельных магнитных проводимостей воздушных промежутков*

Конструкция	Магнитная проводимость воздушного зазора
Обращенные друг к другу цилиндрические полюса диаметром d	С учетом выпучивания потока с торца $\Lambda_{\delta} = \mu_0 \left(\frac{\pi d^2}{4\delta} + 0,48d + \frac{0,36d^2}{2,4d + \delta} \right)$
Обращенные друг к другу прямоугольные полюса с поперечными размерами a и b	С учетом выпучивания потока с торца $\Lambda_{\delta} = \frac{\mu_0}{\delta} \left(a + \frac{0,307\delta}{\pi} \right) \left(b + \frac{0,307\delta}{\pi} \right)$
Концентрические полюса толщиной a , шириной b и радиусом r	Без учета потока выпучивания $\Lambda_{\delta} = \mu_0 a \beta / \ln(1 + \delta / r),$ <p>где $\beta = 2 \arcsin(b / 2r) - \alpha$; α – угол сдвига между осью полюсов и осью якоря.</p>
Клапанный электромагнит с цилиндрическим полюсом, имеющим полюсный наконечник (шляпку)	С учетом поля выпучивания с торца и боковой поверхности шляпки диаметром $d_{\text{нн}}$ $\Lambda_{\delta} = \mu_0 \left(\frac{\pi d_{\text{нн}}^2}{4\delta} \chi_1 + 0,96d_{\text{нн}} + \frac{\pi d_{\text{нн}}}{0,69\delta / h_{\text{нн}} + 0,63} \right),$ <p>где $\chi_1 = 2\rho_1(\rho_1 - \sqrt{\rho_1^2 - 1})$; $\rho_1 = 2R_0 / d_{\text{нн}}$; R_0 – расстояние от оси вращения якоря до оси полюса.</p>
Броневой электромагнит с внутренним диаметром кожуха D	С учетом поля выпучивания с торцов и боковой поверхности цилиндрических полюсов диаметром d $\Lambda_{\delta} = \mu_0 \left(\frac{\pi d^2}{4\delta} + 0,58d + \frac{xd}{0,22\delta + 0,4x} \right),$ <p>где $x = (D - d) / \pi - \delta / 2$</p>
Конструкция	Удельная проводимость
Параллельные цилиндры одинакового диаметра	$\Lambda_{\sigma} = \mu_0 \frac{\pi}{\ln(n + \sqrt{n^2 - 1})},$ <p>где $n = h / (2r)$, h – расстояние между осями цилиндров; r – радиус цилиндра.</p>

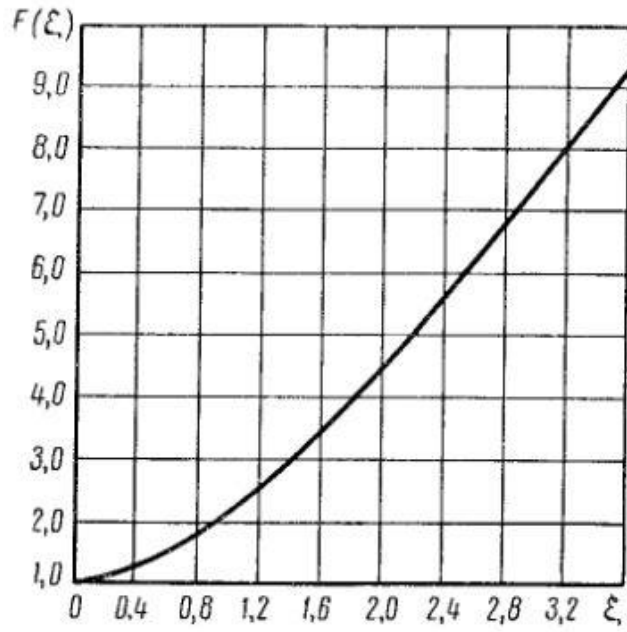


Рис. П.1. График функции $F(\xi)$

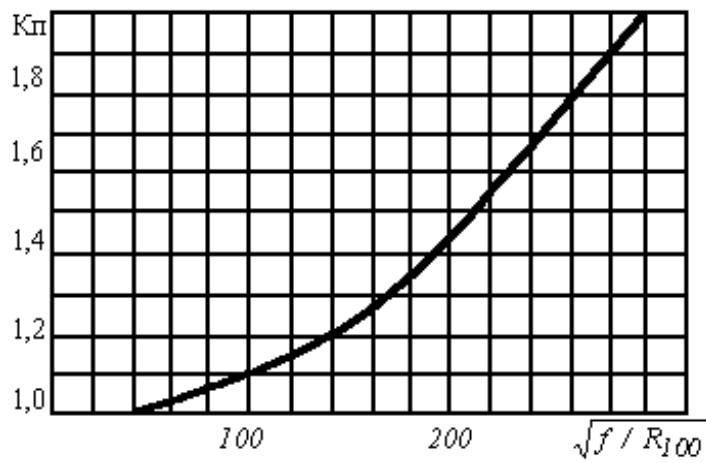


Рис. П.2. Зависимость коэффициента поверхностного эффекта для сплошных круглых немагнитных проводников от параметра $\sqrt{f / R_{100}}$

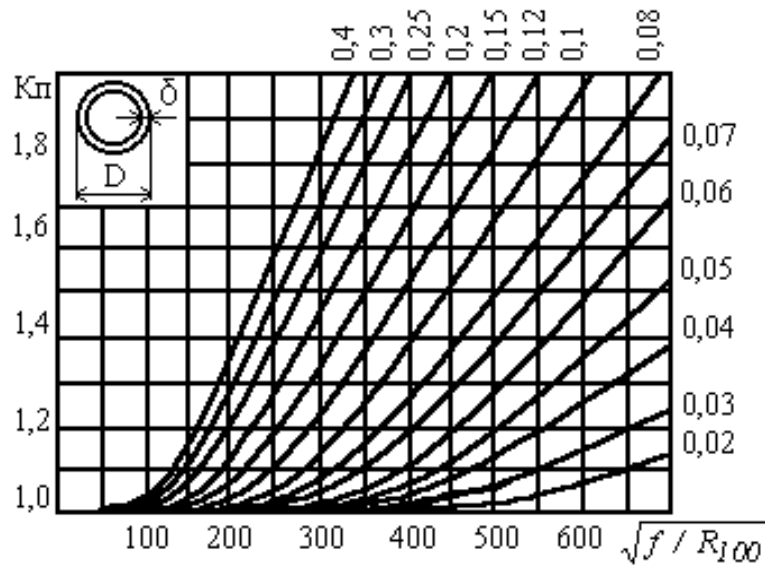


Рис. П.3. Зависимость коэффициента поверхностного эффекта для полых трубчатых проводников из немагнитного материала с различными соотношениями δ/D и $\sqrt{f/R_{100}}$

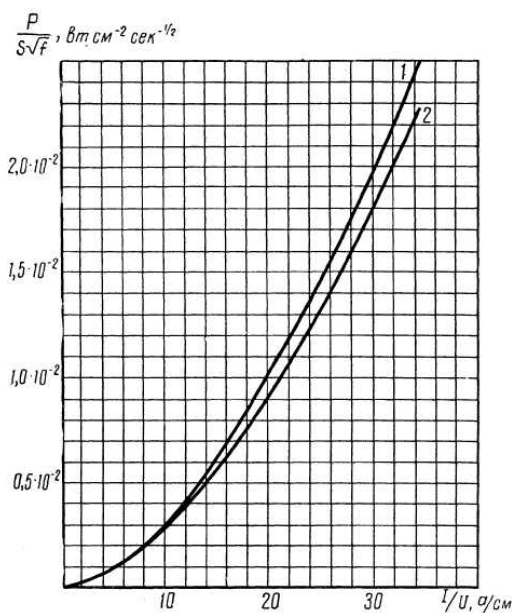


Рис. П.4. Кривая зависимости $\frac{P}{S\sqrt{f}} = \varphi\left(\frac{I}{U}\right)$

Примечание. Этой кривой можно пользоваться для расчета потерь в стальных проводниках, когда величина тока такова, что значение $H \geq H_{\mu_{r \max}}$ соответствующего $\mu_{r \max}$ и размеры поперечного сечения ферромагнитной части в любом направлении не меньше удвоенной глубины проникновения потока.

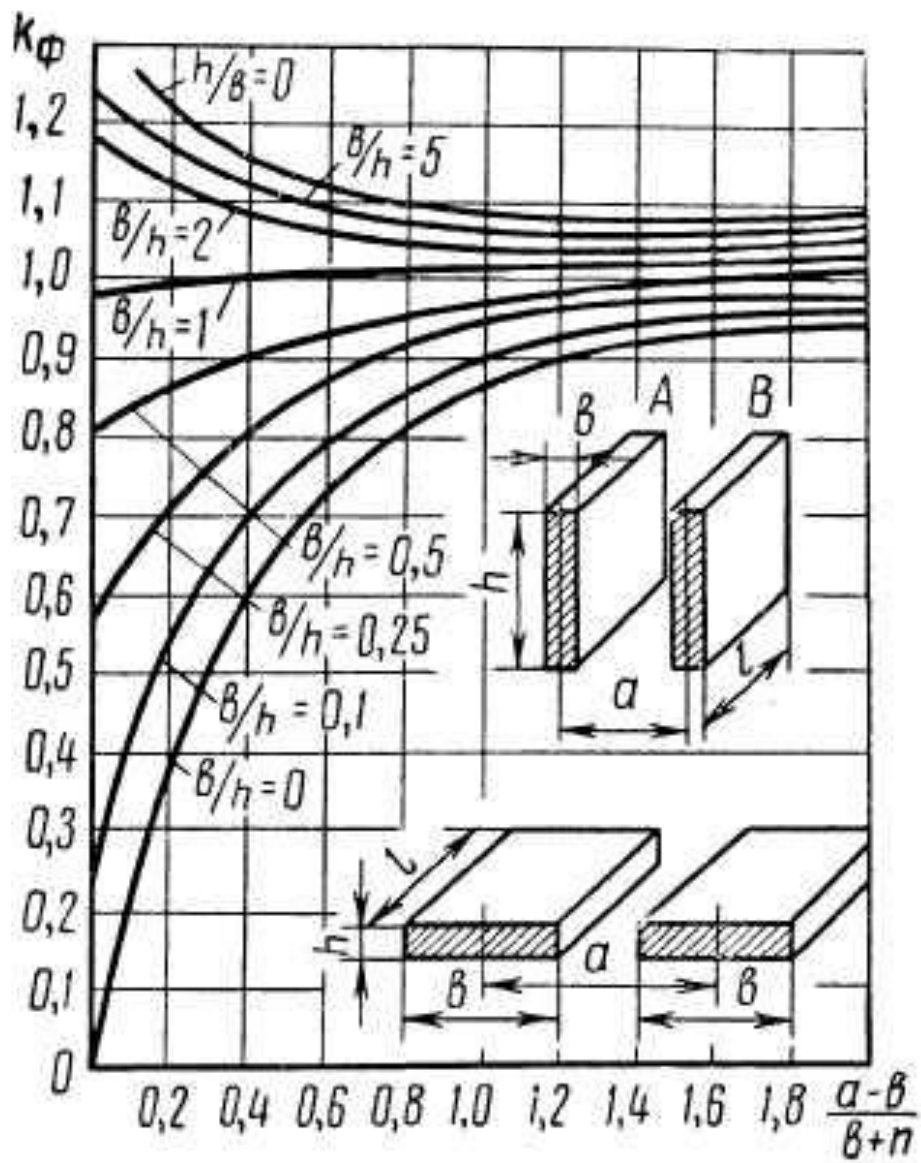


Рис. П.5. Кривая зависимости $k_\phi = \varphi$

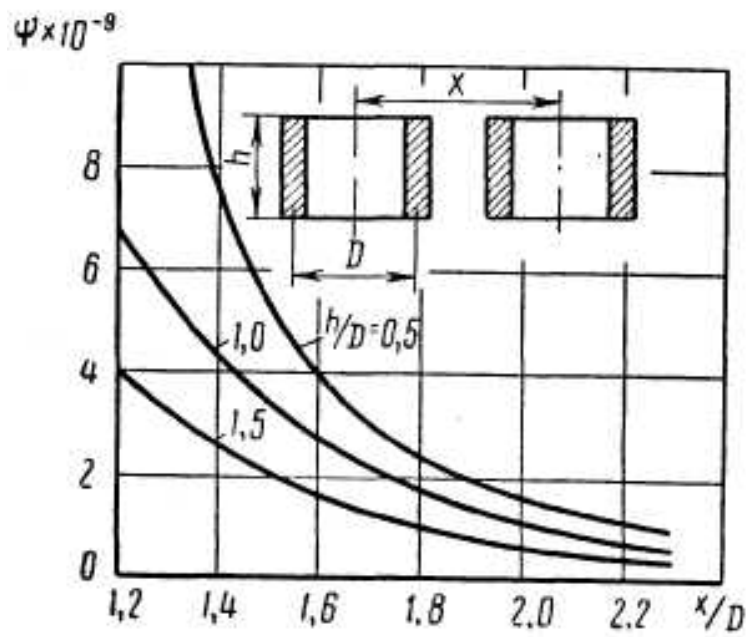
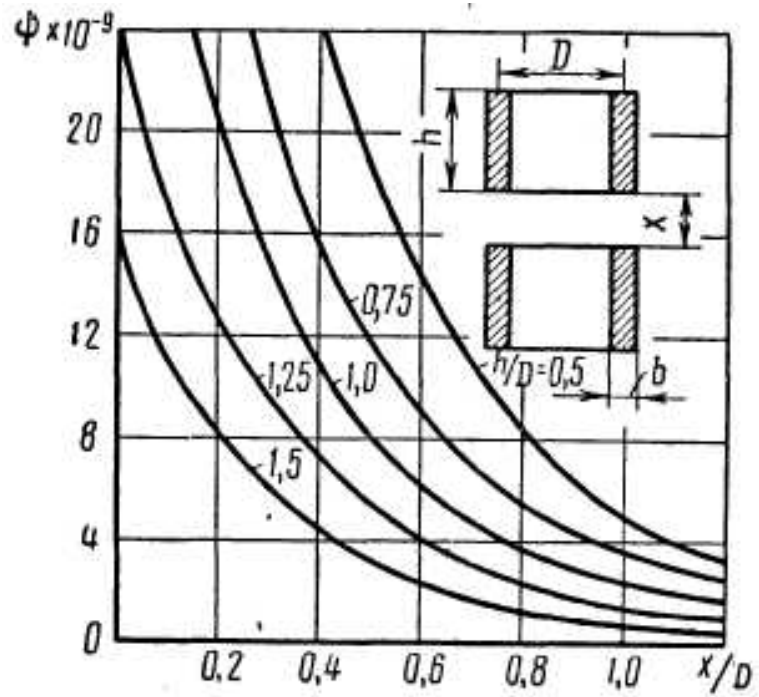


Рис. П.6. Кривые Двайта для определения производной $\psi = \frac{dM}{dx}$: h – высота катушек, D – средний диаметр

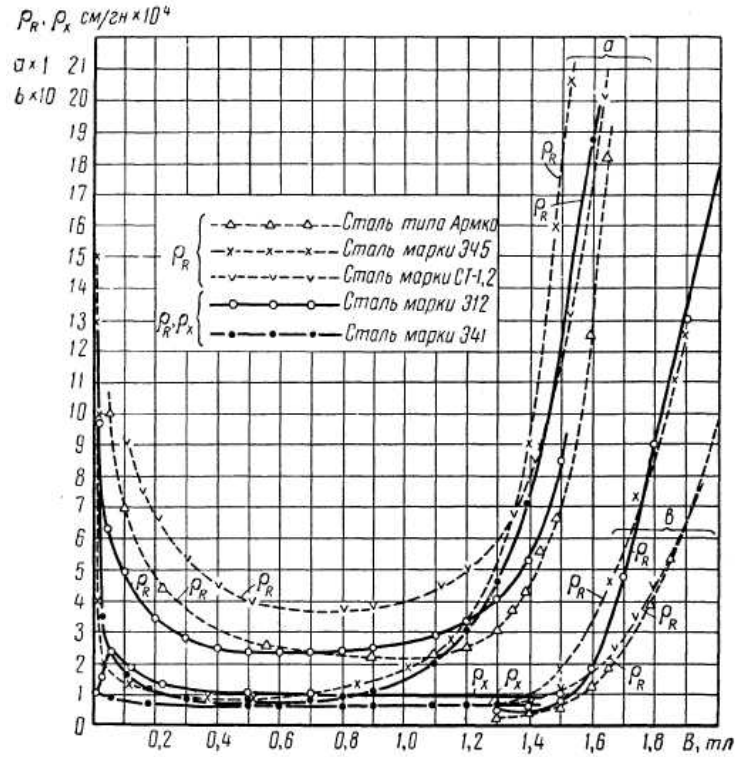


Рис. П.7. Кривые удельных активных и реактивных магнитных сопротивлений стали различных марок в функции магнитной индукции (для сталей Э12 и Э41 толщина листа 0,5 мм, частота 50 Гц)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы теории электрических аппаратов / под ред. И.С. Таева. – М.: Высшая школа, 1987. – 352 с.
2. Чунихин А.А. Электрические аппараты. Общий курс: учебник для вузов / Чунихин А.А. – 4-е изд., стер. – М.: Альянс, 2008. – 720 с.
3. Электрические и электронные аппараты: учебник для вузов / под ред. Ю.К. Розанова. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 752 с.
4. Кляйн Р.Я. Электрические и электронные аппараты: учебное пособие. Ч. I: Физические явления в электрических аппаратах / Кляйн Р.Я. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2000. – 97 с.
10. Буткевич Г.В. Задачник по электрическим аппаратам: учебное пособие / Буткевич Г.В., Дегтярь В.Г., Сливинская А.Г. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1987. – 232 с.

Учебное издание

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ

Учебное пособие

Составители

СИПАЙЛОВА Надежда Юрьевна

КЛЯЙН Роберт Яковлевич

БОГДАНОВ Евгений Петрович

Издано в авторской редакции

Научный редактор *доктор технических наук,*
профессор В.Г. Букреев

Компьютерная верстка *Н.Ю. Сипайлова*

Дизайн обложки

**Отпечатано в Издательстве ТПУ в полном соответствии
с качеством предоставленного оригинал-макета**

Подписано к печати 31.01.2012. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать XEROX. Усл. печ. XX. Уч.-изд. XX.

Заказ № . Тираж 100 экз.