# МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ

# ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ



# Розіна О.Ю., Роганков В.Б., Корнієнко Ю.К.

# ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЯВИЩА

Посібник для самостійної роботи

**Розіна О.Ю., Роганков В.Б., Корнієнко Ю.К.** Електромагнітні явища: Посібник для самостійної роботи. Одеська національна академія харчових технологій, 2015. — 56 с.

У посібнику для самостійної роботи представлений матеріал, що стосується теми "Електромагнітні явища" загального курсу фізики, який викладається студентам всіх напрямів підготовки. Зважаючи на те, що посібник призначений для самостійної роботи студентів і денної і заочної форм навчання, матеріал максимально подрібнений на окремі розділи, у кожному з яких викладений теоретичний матеріал, наведені приклади розв'язання задач та запропоновані задачі для самостійного розв'язання. У кожному розділі представлена достатня кількість тестових завдань.

Рецензент: кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри загальної та хімічної фізики ОНУ ім.І.І.Мечникова В.Я. Гоцульський

Розглянуто та рекомендовано до видання на засіданні кафедри прикладної фізики та електротехнологій.

Протокол № 7 від 9 лютого 2015 р.

Розглянуто та рекомендовано до видання на засіданні науково-методичної комісії з напряму підготовки 6.040106 «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування»

**©OHAXT**, 2014

# РАЗДЕЛ 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

# Общие рекомендации к решению задач

- Записывая краткое условие, все величины записать в SI, то есть взять за основу Кулон, Ньютон, Ампер, Вольт, Ом, Джоуль, секунда, метр.
- Сделать схематический рисунок, на котором показано расположение электрических зарядов или траектория их движения, вектора сил или напряженностей электрического поля, соединение проводников.
- При необходимости выбрать оптимальную систему отсчета. По общему правилу модули векторов, совпадающих с направлением оси, входят в уравнение со знаком «+»; если вектор направлен противоположно оси, его модуль входит в уравнение со знаком «-».
- Задачу решать в общем виде: исходя из основных законов получить конечную формулу, в которую подставлять числовые значения.

## Основные физические величины электричества

Назва - укр.	Обозначение	Размерность в SI	Название -рус
Заряд	q	Кулон, Кл	Заряд
Напруженість поля	E	Н/Кл; В/м	Напряженность поля
Лінійна густина	τ	Кл/м	Линейная плотность
заряду		KJI/M	заряда
Поверхнева густина	$\sigma$	Кл/м <sup>2</sup>	Поверхностная
заряду		IX,1/ WI	плотность заряда
Потенціал	$\varphi$	Вольт, В	Потенциал
Напруга	U	Вольт, В	Напряжение
Електроємність	C	Фарада, Ф	Электроемкость
Сила струму	I	Ампер, А	Сила тока
Густина струму	j	$A/M^2$	Плотность тока
Опір	R	Ом, Ом	Сопротивление
Питакий опів	ρ	Ом·м	Удельное
Питомий опір			сопротивление
Електрична	P, N	Ватт, Вт	Електрическая
потужність	1,14	Dall, DI	мощность
Енергія	W	Джоуль, Дж	Энергия
Густина енергії	ω	Дж/м <sup>3</sup>	Плотность энергии

## 2.1. Электростатическое взаимодействие

Основой электростатики является закон Кулона: между двумя точечными зарядами  $q_1$  и  $q_2$ , расположенными в вакууме на расстоянии r действует сила

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_{\alpha}} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad . \tag{2.1}$$

 $\varepsilon_o = 8,85\cdot 10^{-12}$  Ф/м — диэлектрическая проницаемость вакуума — универсальная физическая постоянная. Если между двумя зарядами расположен диэлектрик (воздух, масло, пластик) сила взаимодействия уменьшается в  $\varepsilon$  раз. Параметр  $\varepsilon$  называется диэлектрической проницаемостью данной среды.

На точечный заряд q, расположенный в произвольном поле, действует сила

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} \ . \tag{2.2}$$

Параметр  $\vec{E}$  — это **напряженность** электрического поля в точке расположения заряда. Напряженность характеризует силу, действующую на единичный положительный заряд.

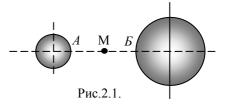
Если электрическое поле создано источниками специальной формы, то напряженность можно вычислить по известным формулам.

	* * *	
Для точечного заряда $q_o$	$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \cdot \frac{q_o}{r^2}$	(2.3)
Для бесконечно длинной равномерно заряженной нити с линейной плотностью заряда $\tau = q_o \ / \ l$	$E = \frac{1}{2\pi\varepsilon_o} \cdot \frac{\tau}{r}$	(2.4)
Для бесконечной равномерно заряженной плоскости с поверхностной плотностью заряда $\sigma = q_o / S$	$E = \frac{\sigma}{2\varepsilon_o}$	(2.5)
Вне сферического равномерно заряженного тела радиуса $R_o$	$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \cdot \frac{q_o}{r^2}$	(2.6)

В формулах (2.3, 2.4) r- это расстояние между заданной точкой поля и источником (точечным зарядом или нитью). В формуле (2.6) r- это расстояние от центра сферы до заданной точки поля, причем  $r>R_o$  (то есть формула применима только вне сферы). Для внутренних точек полой сферы E=0.

#### Задачи для самостоятельного рассмотрения

- 2.1. Два точечных заряда находятся в воздухе на расстоянии 20 см. Как нужно разместить те же самые заряды в масле, чтобы сила электростатического взаимодействия между ними осталась неизменной? Диэлектрическая проницаемость масла равна 3.
- 2.2. Найти силу, которая действует со стороны точечного заряда –7 нКл на другой точечный заряд –4 нКл. Расстояние между зарядами 15 см; диэлектрическая проницаемость среды равна 5.
- 2.3. Два шарика одинакового радиуса 3 мм и массы 10 мг подвешены на нитях одинаковой длины, причем их поверхности соприкасаются. Когда шарики зарядили, нити разошлись на некоторый угол, и сила натяжения нитей стала равной 40 мкН. Найти заряды заряженных шаров, если известно, что длина каждой нити 15 см.
- 2.4. Два шарика массой 5 мг каждый находятся на некотором расстоянии. Какой заряд нужно сообщить каждому шарику, чтобы сила электростатического отталкивания уравновешивала гравитационного притяжения? Рассматривать шарики как материальные точки. Гравитационная постоянная 6.67·10<sup>-11</sup> H·м<sup>2</sup>/кг<sup>2</sup>.
- 2.5. Два диэлектрических шара радиусами 20 см і 6 см заряжены с одинаковой поверхностной плотностью +5 мКл/м²; расстояние *АБ* между ближайшими точками их поверхностей равно 4 см (рис.2.1). Определить силу взаимодействия между шарами.



- 2.6. Найти напряженность поля на расстоянии 2 см от точечного заряда +20 мкКл, помещенного в среду с диэлектрической проницаемостью 5.
- 2.7. Найти напряженность электрического поля в точке, находящейся посередине между двумя точечными зарядами. Величины зарядов равны  $8\cdot10^{-9}$  Кл и  $-6\cdot10^{-9}$  Кл, расстояние между ними 16 см.
- 2.8. Определить напряженность электрического поля в точке, находящейся на расстоянии 25 см от поверхности заряженного шара радиуса 2 см. Поверхностная плотность зарядов на шаре 5 мкКл/м².
- 2.9. Для диэлектрических шариков, показанных на рис.2.1, определить напряженность электрического поля в точке М. Принять, что радиусы

- шаров равны 4 см и 8 см. Расстояние AB равно 6 см, AM=MB. Шарики несут одинаковые заряды по 30 нКл.
- 2.10. Электрическое поле создано двумя бесконечными параллельными пластинами, которые несут равномерно распределенный заряд с поверхностными плотностями +4 нКл / м² и +2 нКл / м². Определить напряженность поля между пластинами и за их пределами.
- 2.11. Рассмотреть предыдущую задачу при условии, что поверхностные плотности заряда равняются соответственно +4 нКл /  $^2$ и -2 нКл /  $^2$ и.
- 2.12. Найти силу, с которой на точечный заряд 5 мкКл действует плоскость, заряженная с поверхностной плотностью заряда 4 мкКл/м². Заряд находится на расстоянии 2 см от поверхности; среда вакуум. Как изменится ответ задачи, если последовательно в 2 раза увеличить такие параметры: величину точечного заряда, поверхностную плотность заряда плоскости, расстояние между плоскостью и точечным зарядом?
- 2.13. Найти силу, с которой на точечный заряд 5 мкКл действует заряженная нить, линейная плотность заряда которой 6 мкКл/м. Заряд находится на расстоянии 2 см от нити; среда вакуум.
- 2.14. Найти силу, с которой на точечный заряд 5 мкКл действует шар радиусом 2 см, заряд которой 8 нКл. Заряд находится на расстоянии 4 см от поверхности шара; среда вакуум.
- 2.15. Найти силу, которая действует на точечный заряд 0,24 мкКл, который находится на расстоянии 2 см от а) равномерно заряженной нити с линейной плотностью заряда 2·10<sup>-9</sup> Кл/см; б) заряженной плоскости с поверхностной плотностью заряда 2·10<sup>-9</sup> Кл/см²; в) поверхности заряженного шара радиусом 2 см и поверхностной плотностью заряда 2·10<sup>-9</sup> Кл/см².

В электрическом поле частичка движется в соответствии с законом Ньютона

$$m\vec{a} = \vec{F}_{Mex} + \vec{F}_{2\pi}$$
,

где  $\vec{F}_{\text{мех}}$ ,  $\vec{F}_{\text{эл}}$  — равнодействующие всех, механических и электрических сил (рис.2.2). В следующих задачах предварительно оцените соотношение

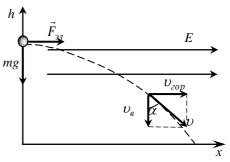


Рис.2.2

между электрической и гравитационной силами (рис.2.2).

- 2.16. Шарик массой 1 мкг и зарядом 5 нКл начинает движение в однородном электрическом поле, направленном горизонтально. Через 2 с шарик приобретает скорость 10 км/с. Найти напряженность поля.
- 2.17. Шарик массой 50 мкг и зарядом 10 нКл начинает движение в однородном электрическом поле напряженностью 100 кВ/м, направленном горизонтально. Какую скорость приобретет шарик через 5 с?

В плоском конденсаторе поле однородно, его напряженность определяет выражение

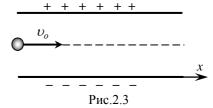
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_o \cdot \varepsilon} \,, \tag{2.7}$$

( $\sigma$  — поверхностная плотность заряда на каждой обкладке,  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость среды между обкладками). Напряженность E связана с напряжением U между обкладками соотношением

$$E = \frac{U}{d},\tag{2.8}$$

d – расстояние между обкладками.

- 2.18. В плоском горизонтально расположенном конденсаторе находится в равновесии заряженная капля массой 8 мкг. Расстояние между пластинами 3 мм, к ним приложено напряжение 30 В. Найти заряд капли.
- 2.19. В горизонтально расположенном конденсаторе свободно падает заряженная частичка. Постепенно увеличивают напряжение между обкладками, и когда оно достигает значения 40 В, частичка зависает в состоянии равновесия. Определить массу частички, если ее заряд 1,5 нКл; расстояние между обкладками 4,21 мм.
- 2.20. В горизонтально размещенный конденсатор влетает отрицательно заряженная частица со скоростью  $\upsilon_o$  (рис.2.3). Начертить траекторию движения частицы. Определить, какое время необходимо частице, чтобы



достичь соответствующей обкладки конденсатора; какое расстояние пролетит частица вдоль оси Ox. Принять такие обозначения: расстояние между обкладками d, напряжение между обкладками U, масса и заряд частицы, соответственно m и q.

2.21. Определить поверхностную плотность заряда на пластинах конденсатора, если пылинка массой 3 мкг, несущая избыточный заряд, созданный 12 электронами, находится в состоянии равновесия. Пространство между пластинами заполнено маслом с диэлектрической проницаемостью 4,5.

# 2.2. Работа электрических сил. Энергия электрического взаимодействия

**Работа** по перемещению заряда в электрическом поле равна разности значений потенциальной энергии заряда в начальной и конечной точках траектории

$$A = W_1 - W_2 \tag{2.9}$$

**Потенциальная энергия** взаимодействия двух точечных зарядов, расположенных на расстоянии r в вакууме, определяется формулой

$$W = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r} \tag{2.10}$$

Энергетической характеристикой данной точки электрического поля является ее потенциал  $\varphi$ . Потенциал определяет потенциальную энергию точечного заряда, размещенного в данной точке поля, то есть

$$W = q \cdot \varphi \,. \tag{2.11}$$

Сравнивая выражения (2.10) и (2.11), видим, что потенциал точки поля, созданного точечным зарядом  $q_o$ , на расстоянии  $\ r$  от него определяет формула

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \cdot \frac{q_o}{r} \tag{2.12}$$

Потенциал равномерно заряженного шара радиусом  $R_{uu}$  вычисляется как

$$\varphi_{uu} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_o} \cdot \frac{q_o}{R_{uu}} \quad . \tag{2.13}$$

Сравнивая выражения (10) и (11) для работы по перемещению заряда, получаем

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2), \tag{2.14}$$

где  $\Delta \varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = U$  – разность потенциалов между двумя точками поля.

Величина  $\Delta \varphi$  характеризует работу электрической силы по перемещению единичного положительного заряда.

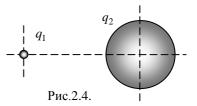
В таблице приведены выражения для  $\Delta \phi$  в полях различной конфигурации.

В поле точечного заряда $q_o$ и в области вне равномерно заряженной сферы $R_o$ ( $r\!>\!R_o$ )	$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{q_o}{4\pi\varepsilon_o} \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$	(2.14)
В поле бесконечно длинной равномерно заряженной нити с линейной плотностью заряда $\tau$	$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_o} \cdot \ln\frac{r_2}{r_1}$	(2.15)
В поле бесконечно протяженной равномерно заряженной плоскости с поверхностной плотностью заряда $\sigma$	$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{\sigma}{2\varepsilon_o} (r_2 - r_1)$	(2.16)

#### Задачи для самостоятельного решения

- 2.22. Электрическое поле создано точечным зарядом +4 нКл. Найти потенциал точки на расстоянии 10 см от заряда. Считать, что  $\varepsilon$  = 3.
- 2.23. Заряд металлического шара 30 нКл, радиус 4см. Определить потенциал поля в точках, которые находятся на расстоянии 2см и 12см от его центра.
- 2.24. Заряд металлического шара 30 нКл, радиус 4см. Определить потенциал электрического поля на расстоянии 2 см от ее поверхности.
- 2.25. Найти потенциал электрического поля в точке на расстоянии 12 см от центра заряженного шара радиусом 1 см. Потенциал шара равен 30 В.
- 2.26. Шар радиусом 2 см заряжен отрицательно до потенциала 2000 В. Найти массу всех электронов, создающих его заряд.
- 2.27. Шар заряжен до потенциала 792 В. Чему равен радиус шара, если поверхностная плотность заряда составляет  $3,33\cdot10^{-7}$  Кл/м<sup>2</sup>?
- 2.28. Два шара с зарядами +8 нКл и +20 нКл находятся на расстоянии 30см. Какую работу нужно совершить, чтобы сблизить их до расстояния 15 см? Движение происходит в среде с проницаемостью что  $\varepsilon$  = 3,7.
- 2.29. Два точечных заряда  $q_1$ =3·10<sup>-9</sup> Кл и  $q_2$ = 6·10<sup>-9</sup> Кл находятся на расстоянии 0,4 м. Какую работу необходимо совершить, чтобы,

- оставляя заряд  $q_1$  неподвижным, заряд  $q_2$  приблизить к нему на расстояние 0,25 м? Как изменится ответ, если заряд  $q_2$  неподвижен, а перемещают заряд  $q_1$ ?
- 2.30. Точечный заряд 5 мкКл находится на расстоянии 4 см от поверхности, заряженной с поверхностной плотностью заряда 7мкКл/м². Какую работу совершают силы поля, если заряд переносится на расстояние 14 см от поверхности? ...2 см от поверхности? Среда вакуум.
- 2.31. Точечный заряд 0,24 мкКл находится на расстоянии 2см от равномерно заряженной нити с линейной плотностью заряда 2·10<sup>-9</sup> Кл/см. Какую работу совершают силы поля, если расстояние возрастет до 8 см?
- 2.32. Шарик с зарядом  $q_1 = 0,4$  мкКл находится на расстоянии 6 см от поверхности шара радиусом 4 см и поверхностной плотностью заряда  $2\cdot 10^{-9}$  Кл/см<sup>2</sup> (рис.2.4) Какую работу выполнила электрическая сила, если маленький шар перенесли и закрепили на поверхности большого?



Вокруг каждого заряженного тела можно выделить эквипотенциальные поверхности: потенциалы каждой точки таких поверхностей одинаковы. Как следует из формул (2.12) и (2.14), для точечного заряда и равномерно заряженного шара эквипотенциальными поверхностями являются концентрические сферы, центром которых есть точечный заряд  $q_o$ , или центр шара. В частности, поверхность равномерно заряженной сферы также эквипотенциальна. Очевидно, что работа по перемещению заряда вдоль эквипотенциальной поверхности ( $\varphi_1 = \varphi_2$ ) равна нулю.

**В проводниках** имеются свободные носители заряда, поэтому в них происходит перераспределение зарядов таким образом, что каждая точка такого тела имеет одинаковый потенциал. То есть, два или несколько металлических шаров, соединенных тонким проводником, представляют собой одно тело сложной формы, все точки поверхности которого имеют одинаковый потенциал.

- 2.33. Два металлических шара, первый радиусом 8см и зарядом +4 нКл и второй радиусом 4см и зарядом +8 нКл, соединяют небольшим проводником. Происходит разряд. Найти: поверхностные плотности зарядов на шарах до и после разряда, потенциалы первого и второго шаров до и после разряда.
- 2.34. Шар радиусом 3 см заряжен до потенциала 100 В, а шар радиусом 6 см до потенциала 300 В. Определить потенциал шаров после того, как их соединили металлическим проводником. Емкостью соединительного проводника пренебречь.

Закон сохранения энергии в электрическом поле проявляет себя таким образом. Частица массой m и зарядом q проходит разность потенциалов U, при этом электрические силы совершают работу A по изменению кинетической энергии заряженной частицы

$$A = q \cdot U = \frac{mv_{\kappa OH}^2}{2} - \frac{mv_{\mu a u}^2}{2}$$
 (2.17)

Параметры микрочастиц	Заряд	масса
электрон	$e = -1.6 \cdot 10^{-19} \text{ K}$ л	$m_e = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ кг.}$
протон	$q_p = +1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл},$	$m_p = 1.67 \cdot 10^{-27}$ кг.
lpha -частица,	$q_{\alpha}=2q_{p}$	$m_{\alpha} = 4 m_{p}$
ядро атома гелия	$4\alpha - 4p$	$a \cdots p$

- 2.35. Электрическое поле создано двумя параллельными пластинами, находящимися на расстоянии 5 мм. Напряжение между ними 50 В. Какую скорость получит электрон, пройдя расстояние между пластинами вдоль линии напряженности?
- 2.36. Протон из состояния покоя проходит в плоском конденсаторе путь 5 мм от одной пластины к другой и приобретает скорость 450 км/с. Найти напряжение между пластинами и напряженность электрического поля внутри конденсатора.
- 2.37. Электрон в плоском конденсаторе перемещается между пластинами и приобретает скорость  $10^8$  см/с. Расстояние между пластинами составляет 5,3 мм. Определить разность потенциалов и напряженность поля между пластинами, а также поверхностную плотность заряда на пластинах.

- 2.38. Электрическое поле создано двумя параллельными пластинами, находящимися на расстоянии 2 см. Разность потенциалов между ними 120 В. Какую скорость получит электрон, если под действием сил поля он переместится вдоль силовой линии на 3 мм?
- 2.39. Шар массой 40 мг заряжен положительным зарядом  $10^{-9}$  Кл и движется со скоростью 10 см/с. Определить, на какое минимальное расстояние он приблизится к положительному точечному заряду  $8\cdot 10^{-9}$  Кл.
- 2.40. Шар радиусом 10 см заряжен с поверхностной плотностью +2·10<sup>-7</sup> Кл/м². С какой скоростью ударит по его поверхности шарик массой 10 г и зарядом +3 мкКл, если он начинает движение со скоростью 2 м/с, находясь на расстоянии 2 м от центра большого шара. Как изменится результат, если движущийся шарик имеет заряд −3 мкКл?
- 2.41. На какое расстояние могут приблизиться два электрона, если они летят навстречу друг другу с относительной скоростью  $10^8$  см/с?

Исходя из выражения (2.17), вводят новую единицу измерения для энергии, полезную для атомной и молекулярной физики.

1 электронВольт (эВ) — это энергия, которую приобретает электрон, пройдя разность потенциалов 1 В.

Из этого определения вытекает связь между электронВольтом и Джоулем:

$$13B = e \cdot 1B = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ K}_{\pi} \cdot B = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

- 2.42. Определить, какую энергию приобретают электрон, протон и  $\alpha$  частица, пройдя разность потенциалов 1 В. Ответ привести в эВ и Дж.
- 2.43. Определить, во сколько раз отличаются скорости протона и  $\alpha$  частицы, которые прошли одинаковую разность потенциалов 24,2 В.
- 2.44. Определить скорость протона, энергия которого составляет 3 эВ.
- 2.45. Какую разность потенциалов необходимо приложить между электродами, чтобы сообщить  $\alpha$  частице энергию 100 эВ. Определить скорость  $\alpha$  частицы.
- 2.46. Вследствие термоэлектронной эмиссии электрон вырывается на поверхность катода с нулевой начальной скоростью. Определить

энергию электрона, когда он достигнет анода, если разность потенциалов между электродами 30 В. Ответ привести в Дж и эВ.

#### Примеры тестовых заданий

- **Тест 1.** Два точечных заряда размещены на расстоянии  $r_1$  в вакууме. Расстояние между зарядами уменьшают вдвое. Сила взаимодействия между зарядами
  - **1.** возрастает в 2 раза **2.** уменьшается в 2 раза **3.** возрастает в 4 раза **4.** возрастает в  $\sqrt{2}$  раз **5.** уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз
- **Тест 2.** Напряженность электрического поля на расстоянии  $h_1$  от поверхности равномерно заряженного шара радиуса R равняется  $E_1$ . Известно, что  $h_1 = R$ . При удалении от поверхности на расстояние  $h_2$  в два раза большее значение напружености  $E_2$  и  $E_1$  находятся в таком соотношении
  - **1.**  $2 E_2 = E_1$  **2.**  $2 E_2 = 3 E_1$  **3.**  $4 E_2 = 9 E_1$  **4.**  $E_2 = E_1$  **5.**  $E_2 = 2 E_1$  **6.**  $9 E_2 = 4 E_1$
- **Тест 3.** Напряженность электрического поля на расстоянии  $r_1$  от равномерно заряженной плоскости равна  $E_1$ . При удалении от плоскости на расстояние  $2\,r_1$  для напряженности имеем значения  $E_2$ , причем справедливое соотношение
  - **1.**  $2E_2 = E_1$  **2.**  $E_2 = 4E_1$  **3.**  $4E_2 = E_1$  **4.**  $E_2 = E_1$  **5.**  $E_2 = 2E_1$  **6.** Нет правильного ответа
- **Тест 4.** Потенциал заряженного шара равен  $\varphi_{u}$  . При удалении от его поверхности на расстояние  $2\cdot R_{u}$  потенциал точки поля равен
  - **1.**  $2\varphi_{u}$  **2.**  $3\varphi_{u}$  **3.**  $4\varphi_{u}$  **4.**  $\varphi_{u}/4$  **5.**  $\varphi_{u}/2$  **6.**  $\varphi_{u}/3$
- **Тест 5.** Два точечных заряда размещены на расстоянии  $r_{\rm l}$  в вакууме. Расстояние между зарядами уменьшают вдвое. Потенцмальная энергия их взаимодействия
  - **1.** возрастает в 2 раза **2.** уменьшается в 2 раза **3.** возрастает в 4 раза **4.** возрастает в  $\sqrt{2}$  раз **5.** уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз

## 2.3. Электроемкость проводников. Конденсаторы

Изменяя потенциал одиночного проводника, можно накопить на его поверхности электрический заряд, а именно

$$q = C \cdot \varphi \,. \tag{2.18}$$

Коэффициент пропорциональности C называют электроемкостью проводника. Для системы из двух проводников (конденсатора) величина заряда пропорциональна разности потенциалов между двумя проводниками (обкладками конденсатора), то есть

$$q = C \cdot \Delta \varphi = C \cdot U \ . \tag{2.19}$$

Для **плоского конденсатора** электроемкость определяется его геометрическими параметрами ( площадью пластин S и расстоянием между ними d ), а также свойствами диэлектрика между пластинами (проницаемостью  $\varepsilon$  ). Справедливо

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_o \cdot S}{d} \tag{2.20}$$

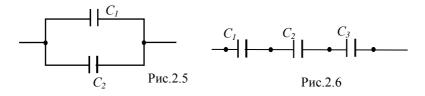
Заряд конденсатора сопровождается накоплением в нем электростатической энергии. Вычислить эту энергию можно, используя формулы

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2} \tag{2.21}$$

Поскольку энергия электрического поля сосредоточена между пластинами конденсатора, то есть в объеме  $S \cdot d$ , считают целесообразным ввести понятие **плотности энергии** электрического поля

$$\omega = \frac{W}{S \cdot d} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_o \cdot E^2}{2} \tag{2.22}$$

Конденсаторы разной электрической емкости могут быть соединены **параллельно** (рис.2.5) и **последовательно** (рис.2.6).



Емкость системы, состоящей из N конденсаторов, определяются формулами

Параллельное соединение	$C_{e_{KG}} = C_1 + C_2 + + C_N$	(2.23)
Последовательное соединение	$\frac{1}{C_{e\kappa e}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots + \frac{1}{C_N}$	(2.24)

Обратим внимание, что из выражения (2.24) следует:

- при последовательном соединении одинаковых N конденсаторов емкостью  $C_o$  эквивалентная емкость равна  $C_o/N$ ;
- при последовательном соединении разных по величине конденсаторов эквивалентная емкость системы меньше наименьшей из емкостей, включенных в цепь.

### Задачи для самостоятельного рассмотрения

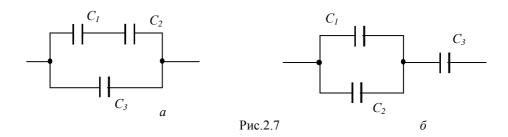
- 2.47. Разность потенциалов между пластинами плоского конденсатора равна 90 В. Площадь каждой пластины 60 см<sup>2</sup> и заряд 10<sup>-9</sup> Кл. Определить, а) на каком расстоянии находятся пластины; б) какая энергия накоплена в конденсаторе, в) какая плотность энергии электростатического поля.
- 2.48. Воздушный конденсатор емкостью 20 мкФ заряжен до потенциала 100 В. Найти а) заряд на обкладках, б) энергию этого конденсатора; в) плотность электростатической энергии, площадь обкладок 8 см<sup>2</sup>.

Чтобы разрядить заряженный конденсатор, его подключают к внешнему сопротивлению R. Через сопротивление протекает ток разряда I, поэтому на нем выделяется теплота Q. То есть, уменьшение энергии, накопленной на конденсаторе, означает выделение эквивалентного количества тепла. Обращаем внимание, что уменьшение или увеличение разрядного сопротивления R не влияет на количество выделенного тепла.

- 2.49. Во время разряда плоского воздушного конденсатора выделилось 4,19 мДж тепла. До какого напряжения заряжали конденсатор, если площадь его пластин 100 см² и расстояние между ними 5 мм.
- 2.50. Конденсатор емкостью 340 пФ зарядили до напряжения 900 В. Какое количество тепла выделится на активном сопротивлении при разряде такого конденсатора, если напряжение на нем уменьшилось до 300 В?

- 2.51. Площадь пластин плоского воздушного конденсатора 8 см², расстояние между ними 3 мм. К пластинам прикладывают напряжение 40 В. После отключения конденсатора от источника напряжения пространство между пластинами заполняют диэлектриком, проницаемость которого 5. Каким будет напряжение между пластинами после заполнения? Какая емкость конденсатора до и после заполнения?
- 2.52. Напряжение между пластинами плоского воздушного конденсатора 300 В, расстояние между пластинами 3 мм. Какой будет напряженность поля в конденсаторе, если, отключив источник напряжения, пластины раздвинуть до расстояния 4 см? Найти работу электростатических сил в таком процессе, если площадь каждой пластины 50 см².
- 2.53. Площадь пластин плоского воздушного конденсатора 30 см<sup>2</sup>, расстояние между ними 3 мм. К пластинам прикладывается напряжение 300 В. Не отключая конденсатор от источника напряжения, пространство между пластинами заполняется диэлектриком с проницаемостью 2. Какой заряд на пластинах до и после заполнения? Какая емкость конденсатора до и после заполнения?
- 2.54. Напряжение между пластинами плоского воздушного конденсатора 300 В, расстояние между пластинами 3 мм. Какой будет напряженность поля в конденсаторе, если, не отключая источника напряжения от конденсатора, пластины раздвинули до расстояния 4 см? Площадь каждой пластины 50 см². Найти также емкость конденсатора и энергию конденсатора в обоих случаях.
- 2.55. Рассмотреть предыдущую задачу при условии, что конденсатор сначала отключают от источника напряжения.
- 2.56. Два конденсатора емкостями 3 мкФ и 2 мкФ соединены последовательно и присоединены к источнику напряжения 80 В. Определить электроемкость системы и заряд каждого конденсатора.
- 2.57. Два плоских конденсатора с одинаковыми геометрическими параметрами (площадью пластин и расстоянием между ними) заполняют разными диэлектриками и присоединяют к источнику напряжения 240 В. Определить, как распределяется напряжение между конденсаторами, если один из них воздушный, а другой заполнен маслом с диэлектрической проницаемостью 4.

2.58. В каком диапазоне может изменяться емкость системы, которая складывается из двух конденсаторов переменной емкости. Емкость каждого из них может изменяться от  $10~\text{n}\Phi$  до  $450~\text{n}\Phi$ .



- 2.59. Три одинаковых конденсатора с емкостью 0,5 мкФ каждый соединили двумя способами: а) два конденсатора соединили последовательно и к ним параллельно присоединили третий; б) два конденсатора соединили параллельно и к ним последовательно присоединили третий. Найти емкость системы в обоих случаях (см. рис. 2.7).
- 2.60. Найти емкость системы конденсаторов  $C_1$ =3 мк $\Phi$ ,  $C_2$ =2 мк $\Phi$ ,  $C_3$ =5 мк $\Phi$ , изображенных на рис.2.7 а, б.
- 2.61. Конденсаторы емкостью 1 мкФ, 2 мкФ, 3 мкФ подключены к источнику напряжения 1100 В. Найти энергию, накопленную каждым конденсатором, если они соединены а) последовательно, б) параллельно.
- 2.62. В конденсаторе емкостью 3 мкФ, заполненном маслом, взвешена капелька воды массой 11 мкг, несущая заряд 5 нКл. Определить энергию, запасенную в конденсаторе, если расстояние между пластинами 5 мм, масло имеет проницаемость 4,3.
- 2.63. Имеется конденсатор емкостью 5 мкФ. Какой емкости конденсатор нужно подключить к нему последовательно, чтобы результирующая емкость стала равной 1,3 мкФ? Какой емкости конденсатор нужно теперь подключить к системе параллельно, чтобы получить исходную емкость?

#### Примеры тестовых заданий

**Тест 1.** Плоский конденсатор подключили к источнику напряжения U. Не отключая от источника, расстояние между пластинами уменьшили в 2 раза. Вследствие этого напряженность электрического поля между обкладками

**1.** возрастает в 2 раза **2.** уменьшается в 2 раза **3.** возрастает в 4 раза **4.** уменьшается в 4 раза, **5.** не изменяется

Тест 2. Можно выполннить такие действия: а) разрядить конденсатор;

б) увеличить расстояние между пластинами; в) увеличить емкость диэлектрика; г) подключить последовательно еще один конденсатор такой же емкости. Общая емкость электрической цепи уменьшится, если выполнить такие действия

**Тест 3.** Плоский воздушный конденсатор имеет емкость  $C_o$ . Его заполняют диэлектриком с проницаемостью 4,8 и одновременно увеличивают расстояние между пластинами в 2 раза. Получили конденсатор с емкостью р C. Между начальной и результирующей емкостью выполняется соотношение

**1.** 
$$C_o = 2.4 \, C$$
 **2.**  $C_o = 9.6 \, C$  **3.**  $C = 2.4 \, C_o$  **4.**  $C = 9.6 \, C_o$  **5.**  $C_o = 2 \, C$  **6.**  $C = 4.8 \, C_o$ 

**Тест 4.** Между пластинами воздушного конденсатора приложена разность потенциалов U, расстояние между пластинами равно  $d_o$ . Электрон из состояния покоя пролетает это расстояние и приобретает энергию  $E_o$ . Не отключая конденсатор от источника, увеличивают расстояние между пластинами в 2 раза. Энергия, приобретенная электроном E, удовлетворяет соотношению

**1.** 
$$E_o = 4E$$
 **2.**  $E_o = 2E$  **3.**  $E_o = 4E_o$  **4.**  $E_o = 2E_o$ 

**5**. 
$$E_o = E$$
 **6**. Не правильного ответа

### 2.4. Постоянный электрический ток

По определению, сила тока является первой производной по времени от функции заряда, протекающего через сечение проводника

$$I = \frac{dq}{dt}. (2.25)$$

Для постоянного (или медленно меняющегося тока) это соотношение можно использовать в виде

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} \tag{2.26}$$

Закон Ома для участка цепи определяет силу тока I, протекающего на данном участке: сила тока пропорциональна напряжению U на концах участка и обратно пропорциональна сопротивлению R этого участка

$$I = \frac{U}{R} \,, \tag{2.27}$$

Электрическая цепь, включающая источник тока (ЭДС) и внешнее сопротивление R, называется замкнутой (рис.8). Параметрами источника тока являются электродвижущая сила E и внутреннее сопротивление элемента r. Сила тока в таком контуре определяется законом Ома для замкнутого контура

$$I = \frac{E}{R+r} \quad . \tag{2.28}$$

Выражение (2.28) можно представить в виде  $E = I \cdot R + I \cdot r$ . Первое произведение  $I \cdot R$  характеризует падение напряжения во внешней цепи, второе произведение  $I \cdot r$  – падение напряжение внутри элемента.

#### Задачи для самостоятельного решения

- 2.64. Сила тока в проводнике изменяется по закону  $I=I_o+k\cdot t$ . Найти, какой заряд протекает через сечение проводника в промежуток времени от 2–й до 8–й секунды. Начальная сила тока равна 2 A, k=0.4 A/c.
- 2.65. Заряд на конденсаторе изменяется по закону  $q=q_o\cdot exp(-t/RC)$ . Записать закон изменения тока разряда этого конденсатора. Чему равен максимальный ток разряда, если конденсатор имеет емкость 2

- м $\Phi$ , его зарядили до напряжения 30 B, а разряжают через активное сопротивление 2 кОм?
- 2.66. Заряд, протекающий через сечение проводника, изменяется по закону  $q = 2 0.1 \cdot t + 0.05 \cdot t^3$ . Найти, силу тока в моменты времени 1 с, 2 с, 3 с? Чему равен средний ток за первые 3 с процесса?
- 2.67. Конденсатор емкостью 250 мкФ разряжают через сопротивление 450 Ом. Ток разряда конденсатора изменяется по закону  $I = I_o \cdot exp(-t/RC)$ ,  $I_o = 24$  мА. Найти, а) до какого напряжения был заряжен конденсатор; б) чему равен максимальный заряд; в) какой заряд прошел по проводнику за первые 8 с после начала разряда.
- 2.68. Элемент с ЭДС 1,2 В и внутренним сопротивлением 0,2 Ом включили в цепь со внешним сопротивлением 1 Ом. Определить силу тока в цепи, падение потенциала во внешней части цепи, падение потенциала в элементе, и КПД, с которым работает элемент.
- 2.69. Элемент с ЭДС 2 В обладает внутренним сопротивлением 0,5 Ом. Определить падение потенциала на элементе, если сила тока равна 0,35 А. Найти внешнее сопротивление этой цепи.

**Сопротивление проводников** зависит от типа проводника (металл, полупроводник, электролит). В случае металлического проводника, имеющего цилиндрическую форму, его сопротивление выражает формула

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \tag{2.29}$$

l - длина, S - площадь сечения проводника. Коэффициент пропорциональности  $\rho$  называется **удельным сопротивлением** и характеризует материал проводника. Этот параметр зависит от температуры, и зависимость  $\rho(t)$  приближенно выражается линейным законом

$$\rho = \rho_o(1 + \alpha \cdot t). \tag{2.30}$$

В этом выражении  $\rho_o$  - удельное сопротивление при  $0^{\rm o}$  С,  $\alpha$  - температурный коэффициент сопротивления.

Если в равенстве (2.30) левую и правую часть умножить на (l/S), получим зависимость сопротивление металлического проводника от температуры

$$R = R_o(1 + \alpha \cdot t). \tag{2.31}$$

Приведем формулы, определяющие сопротивление системы N проводников:

при параллельном соединении 
$$\frac{1}{R_{e\kappa s}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}$$
 (2.32)

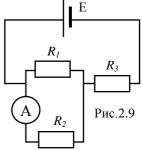
при последовательном соединении  $R_{e\kappa s} = R_1 + R_2 + ... + R_N$  (2.33)

Следствия выражения (2.32) таковы.

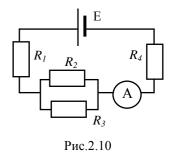
- N одинаковых параллельно соединенных проводников с сопротивлением  $R_o$  имеют результирующее сопротивление  $R_o/N$ .
- При параллельном соединении разных по величине сопротивлений, эквивалентное сопротивление меньше наименьшего из подключенных сопротивлений.

#### Задачи для самостоятельного решения

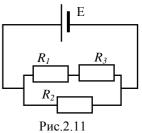
- 2.70. Сколько витков нихромового провода необходимо навить на фарфоровый цилиндр радиусом 2,5 см, чтобы получить печь с сопротивлением 40 Ом?
- 2.71. На легкий каркас намотан медный провод диаметром 0,2 мм. Определить сопротивление катушки, если масса катушки равна 1 кг.
- 2.72. Сопротивление вольфрамовой спирали электрической лампочки равно 35,8 Ом, при температуре 20 °C. Какова температура спирали, если ее подключили к напряжению 120 В и протекает ток 0,33 А.
- 2.73. Катушка из медного провода обладает сопротивлением 10 Ом, если ее температура 14 °C. Во время протекания тока катушка разогрелась, и сопротивление увеличилось до 12,2 Ом. До какой температуры разогрелась катушка?
- 2.74. Найти падение потенциала на медном проводе длиной 500 м и диаметром 2 мм, если сила тока в нем 2 А.
- 2.75. Что показывает амперметр, изображенный в цепи на рис.2.9. Напряжение на клеммах замкнутого элемента равно 21 В;  $R_1$ =6 Ом,  $R_2$ =3 Ом,  $R_3$ =5 Ом.



2.76. В цепи (рис.2.10) ЭДС батареи равна 120 В, ее внутреннее сопротивление 10 Ом. Во внешнюю цепь подключили известные сопротивления  $R_3$ =20 Ом,  $R_4$ =25 Ом, падение потенциала на сопротивлении  $R_1$  составляет 40 В. Амперметр показывает 2 А. Найти величину  $R_2$ , падение потенциала и силу тока для каждого сопротивления.



2.77. В электрическую схему, изображенную на рис.2.11, подключены такие элементы:  $R_1$ = $R_3$ =20 кОм,  $R_2$ =40 кОм. Известно, что  $U_3$ =40 В. Найти величину ЭДС, если внутреннее сопротивление составляет 10 кОм. Найти силу тока и падение потенциала на каждом сопротивлении.



- 2.78. На два последовательных сопротивления подано 32 В. Какое напряжение на каждом, если их величины относятся как 3:5?
- 2.79. Два проводника изготовлены из одинакового материала, имеют одинаковую длину, а их радиусы равны 0,5 мм и 1,0 мм. Они последовательно подключены к источнику напряжения 36 В. Чему равно падение напряжения на каждом проводнике?
- 2.80. Провод длиной 5 м разрезали на два отрезка длиной 1,5 м и 3,5 м. Их соединили параллельно и подключили к источнику. Какой ток протекает через каждый проводник, если ток через источник равен 264 мА?

Закон Джоуля — Ленца определяет тепловые явления, сопровождающие протекание электрического тока. Если по проводнику протекает электрический ток I в течение времени  $\Delta t$ , электрические силы выполняют работу A по перемещению зарядов в проводнике; эта работа эквивалентна количеству тепла Q, которое выделяется и разогревает проводник, т.е.

$$Q = A = I \cdot U \cdot \Delta t \ . \tag{2.34}$$

Пользуясь законом Ома (2.27), закон Джоуля – Ленца можно также представить в виде

$$Q = I^2 R \cdot \Delta t = \frac{U^2}{R} \cdot \Delta t \tag{2.35}$$

**Мощность электрических приборов** характеризует величина  $P = A/\Delta t$ , для мощности можно использовать одно из представленных выражений

$$P = I \cdot U = I^2 R = \frac{U^2}{R} (2.36)$$

- 2.81. Лампочку мощностью 40 Вт, рассчитанную на напряжение 120 В, необходимо подключить к источнику 220 В. Какое сопротивление необходимо включить последовательно, чтобы получить номинальную мощность?
- 2.82. На лампочке накаливания указаны такие параметры 40 Вт, 220 В. Чему равно электрическое сопротивление такой лампочки?
- 2.83. Две лампочки мощностью 40 Вт и 80 Вт рассчитаны на 110 В подключили последовательно к источнику 220 В. Будут ЛИ они номинальную мощность?
- 2.84. На рис.2.12 изображена электрическая в которой  $R_1 = R_2 = 20$  Ом,  $R_3 = 50$ Ом. Известно падение напряжения  $U_3 = 10$ В. Найти электрическую мощность, которая выделяется на каждом элементе.

Рис.2.12

2.85. Две электрические лампочки с сопротивлениями 360 и 240 Ом подключены к источнику напряжения. Какая из них поглощает большую мощность и во сколько раз, если подключение а) последовательное; б) параллельное?

Законы постоянного тока в дифференциальной форме позволяют описать процессы, протекающие в объеме проводника. Кроме того, дифференциальная форма законов применима ДЛЯ проводников изменяющимися свойствами (электролитов, полупроводников, ионизированных газов).

**Плотность тока** - это векторная величина, ее модуль характеризует силу тока, проходящую через единицу площади сечения проводника, а направление совпадает с направлением нормали к выбранному сечению

$$\vec{j} = \frac{dI}{dS} \cdot \vec{n} \tag{2.37}$$

Направление вектора плотности тока совпадает с направлением движения положительных зарядов. Модуль этого вектора определяют заряд носителей q, их концентрация  $n_o$ , средняя скорость направленного движения  $\vec{\upsilon}$ , а именно

$$\vec{j} = e \cdot n_o \cdot \vec{\upsilon} \tag{2.38}$$

Для металлического провода с сечением S справедливо выражение

$$\vec{j} = \frac{I}{S} \cdot \vec{n} \tag{2.39}$$

**Закон Ома** в дифференциальной форме связывает плотность заряда в данной точке с напряженностью поля в этой же точке, справедливо, что

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} \quad , \tag{2.40}$$

 $\sigma$  — удельная проводимость проводника, обратно пропорциональная удельному сопротивлению, то есть  $\sigma = 1/\rho$ .

Тепловые процессы в объеме проводника характеризует **объемная плотность мощности** 

$$p = \frac{dP}{dV} \tag{2.41}$$

Закон Джоуля -Ленца в дифференциальной форме записывается в виде

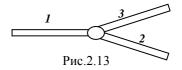
$$p = j \cdot E = j^2 \cdot \rho = \frac{E^2}{\rho} \tag{2.42}$$

Видно, что последняя формула является аналогом соотношения (2.36). Из формулы (2.42) следует также, что в неоднородном поле количество выделившегося тепла больше в той области, где больше напряженность электрического поля.

#### Задачи для самостоятельного решения

2.86. К железному проводу длиной 20 м и сечением 1 мм<sup>2</sup> приложено напряжение 16 В. Найти а) количество электронов, проходящих за

- одну секунду через сечение; б) плотность тока и напряженность поля в проводнике; в) выделившуюся удельную мощность.
- 2.87. Найти удельное сопротивление и удельную проводимость металлического проводника длиной 2 м. Известно, что плотность тока  $10^6 {\rm A/m}^2$  достигается, при разности потенциалов 2 В.
- 2.88. К нихромовому проводнику длиной 200 м прикладывается напряжение 200 В. Определить а) плотность тока и напряженность поля в проводнике; б) плотность электрической мощности, выделяемой в объеме проводника.
- 2.89. Найти падение потенциала на медном проводе длиной 200 м и диаметром 0,8 мм. Известно, что сила тока в нем 2 А. При таких условиях найти а) плотность тока и напряженность поля в проводнике, б) плотность электрической мощности, выделяемой в объеме проводника; в) среднюю скорость упорядоченного движения носителей тока, учитывая, что каждый атом меди отдает два электрона проводимости.
- 2.90. Алюминиевый проводник *1* радиусом 0,5 мм припаян к двум параллельно соединенным медным проводникам 2 и 3 радиусами 0,5 мм. Известно, что в первом проводнике протекает ток 2A.



Определить силу и плотность тока в каждом из проводников 1, 2 и 3, а также удельную электрическую мощность, выделяемую в них.

# Примеры тестовых заданий

- **Тест 1.** Проводник длиной *l* разрезали на два отрезка, и соединили их параллельно. По сравнению с начальным значением полное сопротивление **1.** возрастает в 2 раза **2.** уменьшается в 2 раза **3.** возрастает в 4 раза **4.** уменьшается в 4 раза **5.** Нет правильного ответа
- **Тест 2.** Два сопротивления  $R_1$  и  $R_2=3R_1$  соединены параллельно и подключены к напряжению U . Соотношения между напряжениями  $U_1$  и  $U_2$  на каждом сопротивлении имеет вид
  - **1.**  $U_1 = U_2$ , **2.**  $3U_1 = U_2$ , **3.**  $U_1 = 3U_2$ , **4.**  $\sqrt{3} U_1 = U_2$
  - **5.**  $U_1 = \sqrt{3} \ U_2$  **6.**  $U_1 = 9U_2$  **7**. Нет правильного ответа

**Тест 3.** Длину спирали нагревателя увеличивают вдвое. Количество тепла, которое он отдает в окружающую среду ....

- 1. возрастает в 2 раза 2. уменьшается в 2 раза 3. возрастает в 4 раза
- **4.** уменьшается в 4 раза **5**. возрастает в  $\sqrt{2}$  раз **6.** не меняется

**Тест 4.** По проводнику переменного сечения протекает электрический ток. Принять, что выполняется неравенство для сечений  $S_1 \! < \! S_2$  . Из показанных ниже выбрать, какие соотношения выполняются одновременно для токов I и плотностей токов j

**1.** 
$$I_1 > I_2$$
,  $j_1 > j_2$ ; **2.**  $I_1 = I_2$ ,  $j_1 > j_2$ ; **3.**  $I_1 > I_2$ ,  $j_1 = j_2$ ; **4.**  $I_1 = I_2$ ,  $j_1 < j_2$  **5.**  $I_1 = I_2$ ,  $j_1 = j_2$ 

**Тест 5.** По проводнику переменного сечения  $(S_1 > S_2)$  протекает электрический ток. Выбрать, какие соотношения выполняются одновременно для напряженности E и удельного сопротивления  $\rho$ 

**1.** 
$$E_1 > E_2$$
,  $\rho_1 > \rho_2$  **2.**  $E_1 = E_2$ ,  $\rho_1 = \rho_2$  **3.**  $E_1 > E_2$ ,  $\rho_1 = \rho_2$  **4.**  $E_1 = E_2$ ,  $\rho_1 < \rho_2$  **5.**  $E_1 < E_2$ ,  $\rho_1 = \rho_2$ 

**Тест 6.** Два медных провода отличаются длиной и диаметром. Длина первого проводника в 2 раза больше, чем второго. Диаметр первого провода в 3 раза больше, чем диаметр второго. Между их сопротивлениями выполняется соотношение

**1.** 
$$R_1 = 2 R_2$$
 **2.**  $R_1 = 3 R_2$  **3.**  $R_1 = 1,5 R_2$  **4.**  $R_2 = 2 R_1$  **5.**  $R_2 = 1,5 R_1$  **6.**  $R_2 = 4,5 R_1$ 

**Тест 7.** Металлический проводник подключили к регулируемому источнику напряжения. При увеличении напряжения сопротивление проводника

- 1. увеличивается 2. уменьшается 3. не изменяется
  - 4. нельзя дать однозначный ответ

**Тест 4.** К источнику тока подключили внешнее (нагрузочное) сопротивление. К тем же клеммам источника подключили вольтметр. Напряжение, которое показывает вольтметр,

**1.** больше, чем ЭДС **2.** равно ЭДС **3.** меньше, чем ЭДС **4.** нельзя дать однозначный ответ

#### 2.5. Разветвленные цепи

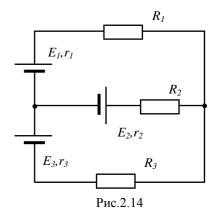
Понятие разветвленные цепи охватывает сложные электрические цепи, для анализа которых недостаточно закона Ома. В таких цепях есть

**узлы** - соединения нескольких проводников;

**участок цепи** – соединение элементов, расположенных между двумя узлами;

**замкнутый контур** — замкнутая последовательность участков цепи.

На каждом участке цепи выполняется закон Ома. Но в целом для контуров и узлов необходимо записывать выражения, называемые правила Кирхгофа. Они составляют систему уравнений для определения силы тока на каждом участке.



- І правило: алгебраическая сумма всех токов в узле равна нулю.
- II правило: в замкнутом контуре алгебраическая сумма падений напряжений на всех сопротивлениях равна алгебраической сумме всех ЕДС.

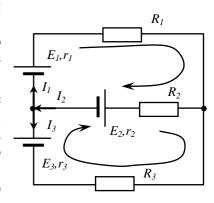
Рассмотрим, как использовать эти правила. На схеме (рис.2.14) показаны ЭДС ( $E_1, E_2, E_3$ ) и внутренние сопротивления ( $r_1, r_2, r_3$ ) элементов, а также внешние сопротивления ( $R_1, R_2, R_3$ ). Определим значения токов в каждом проводнике.

# Общий порядок действий при реализации метода Кирхгофа.

- 1. Для одного узла показать **произвольно выбранные** направления токов стрелками и обозначить их  $I_1, I_2, I_3$  (рис.15).
- 2. Записать I правило Кирхгофа, причем токи, токи входящие в узел записываем со знаком «+», токи, выходящие из узла со знаком «-» . Для выбранного (левого) узла получаем уравнение

$$-I_1 + I_2 - I_3 = 0 . (2.45)$$

3. На схеме показать произвольное направление обхода контура (рис.2.15). В соответствии со вторым правилом



в левой части уравнения

Рис.2.15

записываем сумму произведений  $\pm I_i\cdot R_i$ ; знак «+» используем в случае, если направление тока совпадает с направлением обхода контура; знак «-» используем, если направления тока и обхода контура противоположны. В соответствии с обозначениями рис.15 для контура I получаем  $+I_2\cdot R_2$ , для контура II запишем  $-I_2\cdot R_2$ . В правой части уравнения запишем сумму величин  $\pm E_i$ , причем знак «+», если ЭДС включена по направлению обхода контура; знак «-», если ЭДС включена противоположно направлению обхода контура. Для первого и второго контуров получаем

$$I_1 \cdot r_1 + I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot r_2 + I_2 \cdot R_2 = E_1 - E_2 \tag{2.46}$$

$$-I_3 \cdot r_3 - I_3 \cdot R_3 - I_2 \cdot r_2 - I_2 \cdot R_2 = E_3 + E_2 \tag{2.47}$$

4. Полученные уравнения составляют систему трех линейных уравнений с тремя неизвестными. В простых случаях ее можно решать **методом подстановок**, но в общем случае можно по **правилу Крамера.** Для этого систему переписываем в стандартном виде и выделяем коэффициенты перед неизвестными  $I_1, I_2, I_3$ .

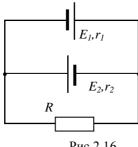
$$\begin{cases} -I_1 & +I_2 & -I_3 & = 0 \\ (R_1 + r_1) \cdot I_1 & +(R_2 + r_2) \cdot I_2 & +0 & = E_1 - E_2 \\ 0 & -(R_2 + r_2) \cdot I_2 & -(R_3 + r_3) \cdot I_3 & = E_2 + E_3 \end{cases}$$

Составляем матрицу коэффициентов, вычисляем главный определитель системы  $\Delta$ , и второстепенные  $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ , соответствующие неизвестным. Вычисляем силы токов сил токов как отношения

$$I_1 = \frac{\Delta_1}{\Lambda}$$
  $I_2 = \frac{\Delta_2}{\Lambda}$   $I_3 = \frac{\Delta_3}{\Lambda}$ 

#### Задачи для самостоятельного решения

- 2.91. Две батареи с ЭДС  $E_1$ = 4 В и  $E_2$ = 3 В и внутренними сопротивлениями  $r_1$ = 0.5 Ом и  $r_2$ = 1 Ом нагружены на внешнее сопротивление 8 Ом (рис. 2.16). Найти силы токов, протекающие на каждом участке цепи.
- 2.92. К параллельно соединенным элементам с ЭДС  $E_1$  = 3 В и  $E_2$  = 2 В и внутренними сопротивлениями  $r_1$ = 0,2 Ом и  $r_2$ =0,3 Ом присоединено внешнее сопротивление 6 Ом (рис.2.17). Найти силы токов на каждом участке цепи.





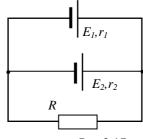


Рис.2.17

2.93. На схеме (рис.2.18) элементы имеют такие параметры: источников  $E_1 = 11 \text{ B}$ ,  $E_2 = 12 \text{ B}$ , внутренние сопротивления  $r_1 = 2$ OM,  $r_2 = 1$  OM, внешние сопротивления  $R_1 = 30$  Ом,  $R_2 = 45$ Ом,  $R_V = 80$  Ом. Найти силы токов во всех проводниках схемы.

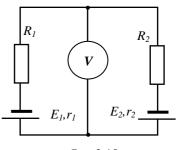
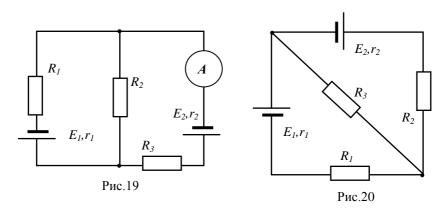


Рис.2.18

- 2.94. ЭДС источников равны  $E_1 = 4$  В,  $E_2$ = 3 В, внутренние сопротивления  $r_1$  = 3 Ом,  $r_2$ = 5 Ом, внешние сопротивления  $R_1$ = 200 Ом,  $R_2$ = 350 Ом,  $R_3$ = 100 Ом,  $R_A$ = 10 Ом. Найти все силы токов на разных участках цепи (рис.2.19).
- 2.95. ЭДС источников токов  $E_1$ =5 B,  $E_2$ = 3 B, внутренние сопротивления  $r_1$ =  $r_2$ = 0, внешние сопротивления  $R_1$ = 55 Ом,  $R_2$ = 24 Ом,  $R_3$ = 12 Ом. Найти силы токов  $I_1, I_2, I_3$  на разных участках цепи (рис.2.20).



2.96. Ha схеме рис.2.25 подключены элементы с такими параметрами: ЭДС источников а  $E_1$ =50 B,  $E_2$ = 30 B,  $E_3$ = 80 В; внутренние сопротивления  $r_1 = r_2 = 1$  кОм,  $r_3 = 2$  кОм; внешние сопротивления  $R_1$ = 550 Ом,  $R_2$ = 450 м,  $R_3$ =1,2 кОм,  $R_4$ =4,5кОм,  $R_5$ = 1450 Ом. Найти силы токов  $I_1, I_2, I_3$ .

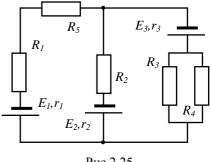


Рис.2.25

# Приклади тестових запитань

Тест1. В схеме, показанной на рис. 2.25 допустимо вычислить эквивалентное сопротивление без использования правил Кирхгофа для сопротивлений

**2**.  $R_1$ ,  $R_5$  и  $r_1$  **3**.  $R_1$ ,  $R_5$  и  $R_2$ 1.  $R_3$  и  $R_4$ Указать, в каком ответе содержится ошибка.

Тест 2. В схеме, представленной на рис.2.17, для одного из узлов показаны стрелками токи  $\ I_1$  ,  $\ I_2$  ,  $\ I_3$  . При решении задачи получены такие значения токов

- $I_1 = 5A$ ,  $I_2 = 7A$ ,  $I_3 = 2A$ 1.
- 2.  $I_1 = 3A$ ,  $I_2 = -4A$ ,  $I_3 = 7A$
- $I_1 = -7A$ ,  $I_2 = -9 A$ ,  $I_3 = -2 A$
- **4.**  $I_1 = 5A$ ,  $I_2 = -7 A$ ,  $I_3 = 2 A$

Указать, в каком ответе содержится ошибка.

Тест 2. В схеме, представленной на рис.2.17, для одного из узлов показаны стрелками токи  $\ I_1$  ,  $\ I_2$  ,  $\ I_3$  . Если все произвольно выбранные направления токов изменить на противоположные

- в системе уравнений Кирхгофа ничего не изменится
- 2. только в первом уравнении ничего не изменится
- в первом уравнении все знаки изменятся на противоположные
- 4. в ответе ничего не изменится
- обязательно нужно изменить направление обхода контуров Выберите одно или несколько правильных утверждений.

## Лабораторная работа № 3.1.

## Определение емкости конденсатора по кривой тока разряда

**Цель работы:** изучение основных понятий электростатики и методов измерения емкости конденсатора; экспериментальное определение емкости конденсатора и батареи конденсаторов.

#### Теоретические сведения

Одним из основных понятий электростатики является электроемкость изолированного (одиночного) проводника. Если металлическое тело (шар, диск, стержень) тонким проводником подсоединить к клемме источника напряжения, потенциал тела становиться равным потенциалу  $\varphi$  клеммы источника, и на поверхности тела накапливается электрический заряд q . Величина заряда, накопившегося на проводнике, пропорциональна его потенциалу

$$q = C \cdot \varphi \,. \tag{2.48}$$

пропорциональности С называют Коэффициент электроемкостью Электроемкость можно существенно проводника. увеличить, использовать два близко расположенных металлических тела, разделенных вакуумом или диэлектриком. Такая система называется конденсатором. Геометрически конденсаторы ΜΟΓΥΤ быть плоскими (две близко расположенные пластины), цилиндрические (два вложенных соосных металлических цилиндра), сферическими (две вложенные металлические сферы с общим центром). На обеих обкладках (пластинах) конденсатора одинаковые по модулю заряды. Для конденсатора под емкостью понимают отношение модуля заряда одной из его пластин к разности потенциалов между ними

$$C = \frac{q}{\Delta \varphi} \tag{2.49}$$

В технике нашли широкое применение плоские конденсаторы. В зависимости от конструкторского исполнения, они могут быть электролитическими, бумажными, полупроводниковыми. Емкость плоского конденсатора определяется формулой

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_o \cdot S}{d} \tag{2.50}$$

 $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость диэлектрика между пластинами

#### S - плошаль пластин

d - расстояние между пластинами.

В электротехнических устройствах конденсаторы разной электрической емкости можно соединять последовательно и параллельно. Для расчета емкостей в зависимости от типа соединения используют формулы

Параллельное соединение двух конденсаторов	$C_{_{\mathcal{H}6}} = C_1 + C_2$	(2.51)
Последовательное соединение двух конденсаторов	$C_{\scriptscriptstyle \mathcal{JKG}} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$	(2.52)

Очевидно, чтобы экспериментально определить емкость конденсатора, ни одна из приведенных выше формул не удобна. В эксперименте необходимо организовать процесс, течение которого существенно определяется емкостью конденсатора. Таким процессом является процесс разряда конденсатора, который относится к, так называемым, переходным процессам.

## Описание установки и методики измерений.

Для реализации переходного процесса принципиальная схема которой показана на рис.2.26. Конденсатор C соединен с ключом K. При переключении тумблера в положение I конденсатор включается в цепь заряда. От источника постоянного напряжения U через делитель напряжения  $R_{3ap}$ 

Рис. 2.26

установка,

используется

подается напряжение на конденсатор, в

результате чего он заряжается до напряжения источника. Полярность пластин конденсатора после заряда показана на рисунке. Для измерения напряжения заряда подключен вольтметр. При переключении тумблера в положение 2 конденсатор включается в цепь разряда. Он сам становится источником напряжения. В цепи через амперметр и активное сопротивление *R* протекает ток, называемый током разряда; его направление показано на рис. 2.26 пунктирной дугой со стрелкой. Очевидно, что вследствие разряда напряжение на конденсаторе убывает, соответственно убывает и сила тока, регистрируемая амперметром.

Определим закон убывания тока разряда конденсатора. Запишем второй закон Кирхгофа для цепи, содержащей конденсатор C и активное сопротивление R. В тот момент, когда конденсатор заряжен до напряжения U, через активное сопротивление протекает ток I, регистрируемый амперметром. Падение напряжения на активном сопротивлении равно  $I \cdot R$ , поэтому получаем уравнение для цепи разряда в виде

$$U + I \cdot R = 0 \tag{2.53}$$

Оба слагаемых изменяются одновременно, потому выразим их через одинаковую переменную q. Для конденсатора U=q/C, а сила тока есть по опрелению первак производная от заряда I=dq/dt. При подстановке обоих слагаемых получим дифференциальное уравнение вида

$$\frac{1}{C}\frac{dq}{dt} + R\frac{dI}{dt} = 0\tag{2.54}$$

Это классическое уравнение с разделяющимися переменными

$$\frac{dI}{I} = -\frac{1}{RC}dt, \qquad (2.55)$$

Которое допускает интегрирование левой и правой части независимо. Пределы интегрирования в правой части устанавливаем от 0 до текущего момента времени t, при этом сила тока

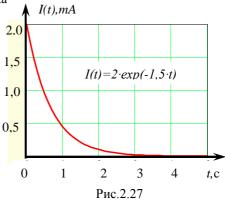
 $I_o$  до текущего значения I .

$$\int_{I_0}^{I} \frac{dI}{I} = -\frac{1}{RC} \int_{0}^{t} dt , \qquad (2.56)$$

В соответствии с правилами интегрирования получаем

$$lnI - lnI_0 = -\frac{1}{RC}t \qquad (2.57)$$

Из последнего выражения находим закон изменения тока разряда конденсатора от времени



$$I(t) = I_0 \exp(-\frac{t}{RC}).$$
 (2.58)

Таким образом, спад тока в цепи разряда происходит по экспоненциальному закону, ход графика показан на рис.2.27.

Характерным свойством данной функции является следующее. Время убывания ее в 2 раза есть величина постоянная и не щависит от рачального значения тока. Это видно из графика, приведенного на рис. 2.27, но можно показать и аналитически. Итак, определим время полуразряда конденсатора t', в течение которого сила тока убывает в 2 раза. Функция (2.57) преобразуется в уравнение

$$\frac{1}{2}I_0 = I_0 \exp(-\frac{t'}{RC}). \tag{2.59}$$

Сократим левую и правую часть на  $I_o$ , прологарифмируем равенство, и получим

$$R \cdot C \cdot ln2 = t' \tag{2.60}$$

Таким образом, время полуразряда не зависит от начального значения тока, а определяется только емкостью конденсатора и сопротивлением цепи разряда. Это соотношение дает простой способ определения емкость конденсатора

$$C = \frac{t'}{R \cdot ln2} \quad . \tag{2.61}$$

#### Порядок выполнения работы

- 1. Подключить конденсатор  $C_1$  к измерительному стенду, соблюдая полярность.
- 2. Установить сопротивление разряда на стенде, указанное преподавателем, и занести его в таблицу для записи измерений.
- 3. Установить тумблер (ключ K на схеме) в положение «Заряд». Установить напряжение заряда, указанное преподавателем.
- 4. Перевести тумблер в положение «Разряд», проследить за убыванием тока разряда и оценить временной масштаб процесса.
- 5. Для данного конденсатора провести измерения времени полуразряда. Для этого зарядить конденсатор, переключить тумблер в положение «Разряд» и при удобном значении силы тока, например 160 мА, включить секундомер. При прохождении стрелки амперметра значения 80 мА секундомер выключить. Измерения повторить 3 раза.
- 6. Подсоединить к измерительному стенду второй конденсатор, и для него определить время полуразряда 3 раза.
- 7. Собрать на стенде батарею из двух последовательно соединенных конденсаторов и измерить для нее 3 раза время полуразряда.
- 8. Собрать на стенде батарею из двух параллельно соединенных конденсаторов и измерить для нее 3 раза время полуразряда.

#### Порядок расчетов

- 1. Вычислить среднее значение из трех измерений времени полуразряда для каждого конденсатора и типа подключения
- 2. По формуле (2.61) провести вычисления емкостей всех конденсаторов, их последовательного и параллельного подключений.
- 3. Для всех конденсаторов и типов подключения найти относительную  $\varepsilon_c$  и абсолютную  $\Delta C$  погрешности измерения

$$\begin{split} \Delta C &= C_{i\,cp} \cdot \varepsilon_{C\,i} = C_{i\,cp} \, \frac{\Delta t_i}{t_{i\,cp}} \\ \Delta \, t &= \sqrt{\frac{\left(t_1 - t_{cp}\right)^2 + \left(t_2 - t_{cp}\right)^2 + \left(t_3 - t_{cp}\right)^2}{3 \cdot 2}} \end{split}$$

- 4. Результат записать в стандартном виде
- 5. Рассчитать значения емкостей последовательно и параллельно соединенных конденсаторов по формулам (2.51) и (2.52).
- 6. Найти отклонение между экспериментальным и теоретическим значениями:

7. 
$$\delta_1 = \frac{\left| \begin{array}{c} C_{nap \, pacy} - C_{nap \, pacy} \\ \end{array} \right|}{C_{nap \, pacy}} \; , \qquad \delta_2 = \frac{\left| \begin{array}{c} C_{noc \, pacy} - C_{noc \, pacy} \\ \end{array} \right|}{C_{noc \, npacy}}$$

# Вопросы для самоподготовки и расширения кругозора

- 1. Сформулировать закон сохранения заряда.
- 2. В чем состоит закон Кулона? Можно ли его использовать для расчета силы притяжения между пластинами конденсатора?
- 3. Какие параметры характеризуют электрическое поле? Чем характерно электрическое поле, созданное конденсатором?
- 4. В чем суть явления поляризации диэлектрика в электрическом поле? Можно ли поляризовать диэлектрик между пластинами заряженного конденсатора?..вне пластин заряженного конденсатора?
- 5. Как ведет себя проводник в электрическом поле? В чем суть явления электростатической индукции?
- 6. Что входит в понятие однородное электростатическое поле?
- 7. Что называется электроемкостью уединенного проводника?
- 8. Что собой представляет конденсатор? От чего зависит его емкость?

- 9. Где в технике используются конденсаторы? Что такое бумажный конденсатор?.. электролитический конденсатор? Какие конденсаторы используют в миниатюрных устройствах?
- 10. Какие существуют типы соединения конденсаторов, как вычисляется емкость батареи конденсаторов?
- 11. Как экспериментально определить емкость конденсатора? Зависит ли емкость от величины сопротивления в цепи разряда?
- 12. Как накопить и сохранить электростатическую энергию?

# Лабораторная работа №3.2 Определение температуры нити лампы накаливания

**Цель работы:** изучение законов постоянного тока и существующих методов измерения сопротивления; экспериментальное определение температуры раскаленной нити.

#### Теоретические сведения

Практически все современные устройства работают на постоянном или переменном токе. Активное развитие микроэлектроники существенно расширило область использование постоянных токов. Поэтому изучение законов постоянного тока является весьма актуальным.

Закон Ома для участка цепи формулируется таким образом. Сила тока, протекающего на данном участке, цепи пропорциональна приложенной разности потенциалов и обратно пропорциональна сопротивлению этого участка

$$I = \frac{U}{R} \,, \tag{2.62}$$

I - сила тока,

R - сопротивление данного участка,

 $U\,$  - приложенное напряжение (разность потенциалов).

Сопротивление проводников зависит от температуры. При протекании тока через металлический проводник все точки проводника разогреты до одинаковой температуры, поэтому для металлических проводников справедлива формула

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \tag{2.63}$$

l - длина проводника, S - площадь сечения,  $\rho$  - удельное сопротивление материала проводника, зависящее от температуры. Следовательно,

сопротивление проводника зависит от температуры и в линейном приближении формула имеет вид

$$R = R_o(1 + \alpha \cdot t). \tag{2.64}$$

В этом выражении  $R_o$  - сопротивление проводника при 0°C,  $\alpha$  - температурный коэффициент сопротивления для данного металла.

Закон Джоуля — Ленца позволяет количественно описать тепловые явления, протекающие в проводнике при протекании тока. Количество тепла Q, выделяемое в проводнике вследствие протекания тока пропорционально силе тока I, падению напряжения U и времени  $\Delta t$ , то есть определяется формулой

$$Q = A = I \cdot U \cdot \Delta t \ . \tag{2.65}$$

Заметим, что определение температуры раскаленных тел является важной и сложной технической задачей. В диапазоне температур, соответствующих температурам расплавленных металлов, использовать термометры и термопары невозможно. Описанный в работе метод определения температуры нити в горящей лампе накаливания может быть использован как «термометр» для диапазонов температур, когда термометры и термопары неприменимы.

### Описание установки и метода исследования

Как следует из формулы (2.64), с увеличением температуры сопротивление нити накала увеличивается. Поэтому, определяя сопротивление нити  $R_1$  при известной комнатной температуре  $t_1$ , а затем для горящей лампочки сопротивлении раскаленной нити  $R_2$ , найдем ее температуру  $t_2$ . Для этого решим систему уравнений

$$\begin{cases}
R_1 = R_o(1 + \alpha \cdot t_1) \\
R_2 = R_o(1 + \alpha \cdot t_2)
\end{cases}$$
(2.66)

Из второго уравнения выразим температуру  $t_2$ . Получим

$$t_2 = (\frac{R_2}{R_o} - 1) \cdot \frac{1}{\alpha} \,. \tag{2.67}$$

Из первого уравнения системы (2.66) выразим  $R_o$  и получим

$$R_o = \frac{R_1}{(1 + \alpha \cdot t_1)}. (2.68)$$

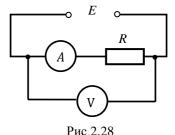
Подставим полученное выражение в формулу (2.67) и получим

$$t_2 = \frac{1}{\alpha} \left[ \frac{R_2}{R_1} - (1 + \alpha \cdot t_1) \right]. \tag{2.69}$$

Как видно, методика определения температуры раскаленной нити состоит в двух измерениях сопротивления нити накала  $R_1$  при комнатной температуре  $t_1$ , и сопротивления  $R_2$  горящей лампочки, нить которой имеет температуру  $t_2$ .

Существуют приборы, **омметры**, предназначенные для измерения сопротивлений. В отсутствие специальных приборов можно использовать различные методы, наиболее простым и распространенным является **метод амперметра-вольтметра.** 

Схема, реализующая метод показана на рис. 2.28. К источнику напряжения E подключена лампа, нить накала которой показана как активное сопротивление R. Последовательно с лампой подключен амперметр, и параллельно подключен вольтметр.



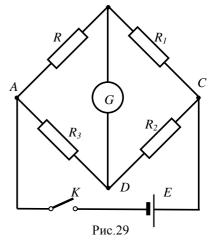
Из формулы (2.27), выражающей закон Ома, получим, что

$$R = \frac{U}{I} \ . \tag{2.70}$$

Очевидно, при протекании тока через сопротивление R оно разогревается. Поэтому метод амперметра-вольтметра пригоден для определения сопротивления  $R_2$  раскаленной нити, но его нельзя использовать для

определения сопротивления  $R_1$  при комнатной температуре. Для того, чтобы определить сопротивление холодной нити, необходимо, чтобы ток, протекающий через измеряемое сопротивление, был очень малым и не разогревал его. Это требование выполняется в мостовой схеме.

Мостовая схема постоянного тока показана на рис.2.29. Она включает четыре участка цепи, так называемые, плечи моста, в которые включено



измеряемое сопротивление R и сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ , которые служат для баланса моста. В одну из диагоналей включен источник постоянного напряжения E и ключ K. Во вторую диагональ включен гальванометр G, образуя «мостик» BD между двумя ветвями схемы.

Обратим внимание. В данной работе гальванометр не измерительный, а индикаторный прибор: он показывает, протекает ток между точками B и D или нет. Состояние схемы, когда показания гальванометра равны нулю, то есть ток в ветви BD не протекает, называется **балансом моста**. При этом потенциалы точек B и D равны. Это означает, что выполняются два равенства

$$\begin{cases}
I_1 \cdot R = I_2 R_3 \\
I_1 \cdot R_1 = I_2 R_2
\end{cases}$$
(2.71)

В этих уравнениях  $I_1$  - ток, протекающий в ветви ABC,  $I_2$  - ток в ветви ADC .

Разделив два уравнения почленно, получим соотношение

$$R = R_1 \cdot \frac{R_3}{R_2} \,. \tag{2.72}$$

Оно означает, что состояние баланса моста позволяет определить сопротивление R, если сопротивления  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  известны.

В лабораторной работе для баланса используют два известных сопротивления  $R_2$  и  $R_3$ , а сопротивление  $R_I$  представляет собой прибор — магазин сопротивлений, который позволяет изменять регулируемое сопротивление на шесть порядков и записывать его значение с точностью шесть значащих цифр.

# Порядок выполнения работы

- 1. Измерить сопротивление холодной нити  $R_x$ . Для этого
  - а) собрать мостовую схему (рис.2.29), и в цепь сопротивления R подключить лампу накаливания; в цепь сопротивления  $R_1$  включить магазин сопротивлений;
  - б) при заданных значениях  $\mathbf{R}_2$  и  $\mathbf{R}_3$ , используя магазин сопротивлений, подобрать  $\mathbf{R}_1$ , при котором мост сбалансирован, и ток через гальванометр равен нулю;
  - в) повторить измерения еще для двух пар  $R_2$  и  $R_3$ . Результаты внести в таблицу.

- **2.** Измерить сопротивление раскаленной нити  $R_t$ . Для этого
  - а) собрать цепь для реализации метода амперметравольтметра, сопротивлением  $\boldsymbol{R}$  является лампа накаливания (рис.2.28);
  - б) установить напряжение U, и измерить силу тока I;
  - в) результаты внести в таблицу.
- 3. Определить температуру холодной нити  $t_1$  используя комнатный термометр. Результаты занести в таблицу.

### Порядок расчетов.

1. Используя экспериментальные результаты, вычислить три значения сопротивления холодной нити по формуле.

$$R = R_1 \cdot \frac{R_3}{R_2} \,. \tag{2.73}.$$

Сопротивление  $R_x$ , используемое дальше в расчетах, равно среднему из трех вычисленных значений R.

2. Вычислить сопротивление раскаленной нити по формуле

$$R_t = \frac{U}{I} \,. \tag{2.74}$$

3. Вычислить температуру раскаленной нити по формуле (2.69), скорректировав индексы в соответствии с введенными обозначениями

$$t = \frac{1}{\alpha} \left[ \frac{R_t}{R_x} - (1 + \alpha \cdot t_x) \right]. \tag{2.75}$$

4. По расчетной формуле (71) сконструируем формулу для вычисления погрешности косвенных измерений температуры

$$\varepsilon_{t} = \sqrt{\left(\frac{\Delta R_{x}}{R_{x}}\right)^{2} + \left(\frac{\Delta I}{I}\right)^{2} + \left(\frac{\Delta U}{U}\right)^{2} + \left(\frac{\Delta t_{x}}{t_{x}}\right)^{2}}$$
(2.76)

В данном выражении  $\Delta I$ ,  $\Delta U$  и  $\Delta t_x$  — погрешности соответствующих измерительных приборов, записанные в метрологической карте. Погрешность сопротивления  $\Delta R_x$  вычисляется как среднеквадратичная погрешность прямых измерений

$$\Delta R_{x} = \sqrt{\frac{(R_{x1} - \langle R_{x} \rangle)^{2} + (R_{x2} - \langle R_{x} \rangle)^{2} + (R_{x3} - \langle R_{x} \rangle)^{2}}{3 \cdot 2}}$$

5. Рассчитать абсолютную погрешность измерения температуры

$$\Delta t = \varepsilon_t \cdot t$$

6. Записать ответ в стандартном виде

### Вопросы для самоподготовки и расширения кругозора

- 1. Сформулировать закон Ома для участка цепи и замкнутой цепи.
- 2. В какой из приведенных экспериментальных схем в общем случае нельзя воспользоваться законом Ома, а требуется применение правил Кирхгофа?
- 3. Почему лампочки накаливания чаще всего перегорают в момент включения?
- 4. Почему театральную люстру, состоящую из большого количества лампочек накаливания, нельзя включить рубильником, а необходимо использовать регулятор напряжения?
- 5. Как изменяется сопротивление металлического проводника при увеличении температуры?
- 6. Как изменяется сопротивление полупроводникового образца при увеличении температуры?
- 7. Почему после продолжительной работы лампа накаливания очень горячая, а люминесцентная лампа («экономка») чуть теплая?

**Напомним! Класс точности прибора** для электрических измерений численно равен относительной погрешности измерения предельного значения, то есть

для амперметра	для вольтметра
$K\% = \frac{\Delta I}{I_{npeo}} \cdot 100\%$	$K\% = \frac{\Delta U}{U_{npeo}} \cdot 100\%$

Из этих формул выводим выражения, по которым считаем

# погрешность измерительного прибора

для амперметра	для вольтметра
$\Delta I = \frac{K\% \cdot I_{npeo}}{100\%}$	$\Delta U = \frac{K\% \cdot U_{npeo}}{100\%}$

В метрологической карте полученное значение записываем в колонку «Похибка приладу»

# РАЗДЕЛ 3. МАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ

Основные величины, размерности, рекомендованные обозначения

Назва - укр.	Позна- чення	Розмірність в СІ	Название - рус
Сила струму	I	Ампер, А	Сила тока
Напруженість поля	Н	А/м	Напряженность поля
Індукція поля	В	Тесла, Тл	Индукция поля
Магнітна	μ		Магнитная
проникність	μ.		проницаемость
Потік вектору	Φ	Тл·м²	Поток вектора
індукції	Ψ		индукции
Власний магнітний	n	$p_m$ A· $^2$	Собственный
момент контуру	Pm		магнитный момент
Обертаючий момент	M	Н∙м	Вращающий момент
Робота сили	A	Дж	Работа силы
ЕРС індукції	$E_{i\!n\!o}$	В	ЭДС индукции
Магнітна енергія	$W_{{\scriptscriptstyle M\!A\!I\!H}}$	Дж	Магнитная энергия
Індуктивність	L	Генрі, Гн	Индуктивность

# Общие рекомендации к решению задач

- Все величины записать в SI, то есть взять за основу Ампер (А), Вольт (В), Тесла (Тл), Генри (Гн), Вебер (Вб) с, м, Н, Дж.
- Сделать схематический рисунок, на котором показано расположение токов, вектора индукции и напряженности поля, скорости движения частиц, сил, действующих на них.
- При необходимости выбрать оптимальную систему отсчета. По общему правилу модули векторов, совпадающих с направлением оси, входят в уравнение со знаком «+»; если вектор направлен противоположно оси, его модуль входит в уравнение со знаком «-».
- В большинстве случаев задачу целесообразно решать в общем виде, то есть, исходя из основных законов и соотношений, получить конечную формулу. В нее подставлять числовые значения заданных величин.
- Расчеты и результаты целесообразно представлять в. так называемом, нормальном виде (например, число 5467 представим в виде  $5.47 \cdot 10^3$ , соответственно  $0.0002345 = 2.345 \cdot 10^{-4}$ ).

# 3.1. Характерные параметры магнитного поля

Магнитное поле возникает вокруг проводников, по которому протекает электрический ток I . Поле характеризуют две векторные величины напряженность  $\vec{H}$  и индукция  $\vec{B}$  , между которыми выполняется соотношение

$$\vec{B} = \mu \cdot \mu_o \cdot \vec{H} \ . \tag{3.1}$$

Величина  $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \ \Gamma \text{H/M}$  — универсальная физическая постоянная,  $\mu$  - магнитная проницаемость среды.

**Закон Био-Савара-Лапласа** определяет индукцию магнитного поля dB, созданную в даной точке элементом проводника длиной dl

$$dB = \frac{\mu \cdot \mu_o}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I \cdot dl \cdot \sin \alpha}{r^2} \quad , \tag{3.2}$$

I — сила тока,  $\alpha$  — угол между направлениями векторов  $d\vec{l}$  и  $\vec{r}$  . Направление векторов  $\vec{H}$  и  $\vec{B}$  определяется правилом правого винта.

Поле отомкап бесконечно длинного проводника неоднородно. Его силовые линии являются концентрическими окружностями (рис.3.1), центры окружностей О совпадают с проводником. Магнитные силовые всегла замкнуты, поэтому линии магнитное поле называют вихревым. В изотропной среде (магнитная прони-

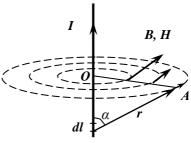


Рис.3.1.

цаемость не зависит от направления) вектора  $\vec{H}$  и  $\vec{B}$  сонаправлены и всегда совпадают по направлению с касательной к силовой линии в данной точке. Как видно из рисунка вектора  $d\vec{l}$ ,  $\vec{r}$  и  $d\vec{B}$ , входящие в формулу (3.1) лежат в разных плоскостях, причем вектор  $d\vec{B}$  всегда перпендикулярен плоскости, которой принадлежат вектора  $d\vec{l}$  и  $\vec{r}$ .

**Однородное** магнитное поле можно создать экспериментально. Для этого используют длинную катушку (длина намного превышает радиус), называемую **соленоидом**. Силовые линии внутри соленоида параллельны друг другу, располагаются с одинаковой плотностью, это и означает, что **поле внутри соленоида однородно**. Замыкаясь вне соленоида, линии

распределяются по неограниченному пространству и создают слабое неоднородное поле.

Используя закон Био-Савара-Лапласа, определяют индукцию и напряженность магнитных полей, созданных проводниками произвольной формы. Для некоторых источников магнитного поля формулы напряженности представлены в таблице.

На расстоянии $a$ от прямого бесконечно длинного проводника с током $I$	$H = \frac{I}{2\pi \cdot a}$	(3.3)
В центе проводника с током $I$ , свернутого в виде окружности радиуса $R$	$H = \frac{I}{2 \cdot R}$	(3.4)
На высоте $h$ от плоскости проводника с током $I$ , свернутого в виде окружности радиуса $R$ , вдоль его оси	$H = \frac{R^2 \cdot I}{2 \cdot (R^2 + h^2)^{3/2}}$	(3.5)
В катушке (соленоиде) длиной $l$ , с количеством витков $N$ , по которой протекает ток $I$	$H = I \cdot n = I \cdot \frac{N}{l}$	(3.6)

Используя формулу (1), рассчитывают индукцию  $\vec{B}$ , созданного такими проводниками.

Замкнутый проводник с током (контур), размещенный в магнитном поле, пронизан потоком вектора магнитной индукции  $\Phi$ . Если площадь контура S, то поток определяют как скалярное произведение

$$\Phi = (\vec{B} \cdot \vec{S}) = B \cdot S \cdot \cos \alpha , \qquad (3.7)$$

lpha — угол между направлением  $\vec{B}$  и нормали к поверхности.

Контур, по которому протекает ток I , создает собственное магнитное поле. Для контура вводят характеристику — собственный магнитный момент контура

$$\vec{p}_m = I \cdot S \cdot \vec{n} = I \cdot \vec{S} . \tag{3.8}$$

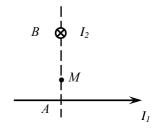
# Задачи для самостоятельного решения

- 3.1. Найти **напряженность** и **индукцию** магнитного поля в точке, которая удалена на 2 см от бесконечно длинного прямого проводника с током 5 A.
- 3.2. На рис.3.2 изображены два бесконечно длинных прямых проводника, перпендикулярных плоскости рисунка.

$$- \bigotimes_{A}^{I_1} - - - \bigotimes_{B}^{I_2} -$$
Puc.3.2

Силы токов в проводниках  $I_1$ =10 A,  $I_2$ =7 A. Расстояния: AB=25 см, MA=10 см. Найти направление и величину вектора магнитной индукции поля в точке M, которая находится между токами.

- 3.4. Для условий предыдущей задачи рассмотреть случай антипараллельных токов. Для решения построить соответствующий схематический рисунок.
- 3.5. Два прямолинейных бесконечных длинных проводника размещены перпендикулярно друг другу и находятся в одной плоскости (рис.3.4). Найти направление и величину вектора магнитной индукции в точке M, если MA=4 см, MB=7 см, токи  $I_1$ =4A,  $I_2$ =6 A
- $\begin{array}{c|c}
  M & I_1 \\
  B & I_2
  \end{array}$ Puc.3.4
- 3.6. Два прямолинейных бесконечных длинных проводника размещены перпендикулярно друг другу, как показано на рис.3.5. Силы токов равны  $I_1$ =2 A,  $I_2$ = 5 A; известны также расстояния AM=7 см, BA=11 см. Найти направление и величину вектора магнитной индукции поля в точке M.



3.7. Найти **напряженность** и **индукцию** магнитного поля в центре кругового витка радиусом 1 см, по которому течет ток 1A.

Рис.3.5

3.8. Два проводника, которые создают окружности радиусами 4 см каждый, размещены во взаимно перпендикулярных плоскостях таким образом, что их центры совпадают. Сила токов в каждом из витков составляет 5 А. Найти напряженность и индукцию магнитного поля

- в центре витков. Найти собственный магнитный момент каждого контура и магнитный момент всей конфигурации в целом.
- 3.9. По тонкому проводнику в виде кольца радиуса 25 см течет ток силой 20 А. Найти магнитную индукцию в точке на оси кольца на расстоянии 15 см от плоскости кольца.
- 3.10. Два круговых тока радиусами 6 см (контур I) и 5 см (контур II) соответственно размещены в параллельных плоскостях на расстоянии 10 см один от другого (оси обоих контуров совпадают). По контуру I протекает ток 3 А, по контуру II течет ток 6 А. Найти направление и величину вектора магнитной индукции в точке на оси контуров на равном расстоянии от токов. Рассмотреть случаи, когда токи текут в одном направлении и в противоположных направлениях.
- 3.11. Бесконечно длинный прямой проводник согнут под прямым углом. Вдоль проводника течет электрический ток силой 100 А. Вычислить напряженность магнитного поля и магнитную индукцию в точке, лежащей на биссектрисе угла и удалена от вершины угла на 10 см.
- 3.12. Вдоль проводника, согнутого в виде квадрата со стороной 10 см, протекает ток силой 50 А. Найдите значения напряженности и магнитной индукции в точке пересечения диагоналей.
- 3.13. Вдоль проводника, согнутого в виде прямоугольника, течет электрический ток силой 60 А. Стороны прямоугольника 30 см и 40 см. Найдите значения напряженности магнитного поля и магнитной индукции в точке пересечения диагоналей.
- 3.14. Бесконечно длинный проводник создает круговую петлю, касательную к проводнику. В проводнике течет ток силой 5 A, а напряженность в центре петли равна 41 A/м. Найти радиус петли.
- 3.15. Длинный прямой соленоид из проволоки диаметром 0.2 мм намотан так, что витки плотно прилегают друг к другу. Какая магнитная индукция поля внутри соленоида при силе тока 3 А?
- 3.16. Катушка длиной 30 см имеет 1000 витков. Найти **напряженность** поля внутри катушки, если сила тока равна 2 А.
- 3.17. Обмотка катушки изготовлена из провода диаметром 0,8 мм. Сила тока 1А. Найти **напряженность** магнитного поля внутри катушки, если витки плотно намотаны.

- 3.18. Контур с током имеет форму окружности диаметром 10 см. Его **магнитный момент** составляет  $1,5\cdot 10^{-2} \text{A}\cdot \text{m}^2$ . Найти силу тока в контуре.
- 3.19. Контур с током имеет форму квадрата, сторона которого равна 4 см. Найти силу тока в контуре, если его **собственный магнитный** момент равен  $0.8~{\rm A\cdot m^2}$ .
- 3.20. Контур с током имеет форму окружности диаметром 10 см. Напряженность магнитного поля в его центре составляет 1,5 А/м. Найти **собственный магнитный** момент контура.
- 3.21. Известно, что **собственный магнитный момент** витка с током равен  $1,5\cdot 10^{-2}$  A·м<sup>2</sup>, а **напряженность** магнитного поля в центре витка составляет 1,5 А/м. Найти силу тока в контуре и его радиус.
- 3.22. В однородном магнитном поле размещена квадратная рамка таким образом, что ее плоскость составляет угол 30° с направлением линий магнитного поля. Найти магнитный поток, который пронизывает рамку, если сторона рамки равна 4 см, напряженность магнитного поля составляет 12 А/м.
- 3.23. Рамка с площадью 16 см<sup>2</sup> вращается в однородном магнитном поле с частотой 2 об/с. Ось вращения совпадает с осью симметрии рамки и перпендикулярна силовым линиям магнитного поля. Напряженность магнитного поля составляет 8·10<sup>4</sup> А/м. Найти максимальное значение магнитного потока, который пронизывает рамку.

# Примеры тестовых заданий

- **Тест 1.** На рис.3.3 пунктирная линия, проходящая через токи, условно разделена на три области  $M_1A$ , AБ,  $БМ_3$ . Точка магнитного поля, в которой напряженность и индукция равны нулю, может принадлежать областям
  - **1.**  $M_1A$ , AB, **2.** AB,  $BM_3$  **3.**  $M_1A$ ,  $BM_3$  **4.** только  $M_1A$ 
    - **5.** только АБ **6.** только БМ<sub>3</sub> **7.** Такой точки не существует
- **Тест 2.** Проводник с током I, имеет форму квадрата со стороной a и находится в магнитном поле с индукцией B. Если **сторону квадрата** уменьшить вдвое, поток  $\Phi$ , пронизывающий контур
- **1.** возрастет в 2 раза, **2.** уменьшится в 2 раза, **3.** возрастет в 4 раза,
- **4.** уменьшится в 4 раза, **5.** возрастет в  $\sqrt{2}$  раз, **6.** уменьшится в  $\sqrt{2}$  раз

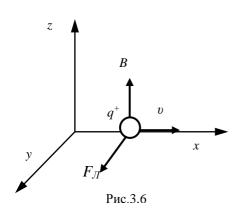
# 3.2. Действие магнитного поля

Магнитное поле действует на проводник, по которому протекает электрический ток, а также на движущиеся заряженные частицы.

**Сила Ампера** действует на отрезок проводника длиной l , по которому протекает электрический ток I и который размещен в магнитном поле с индукцией  $\vec{B}$ 

$$F_A = I \cdot B \cdot l \cdot \sin \beta \,, \tag{3.8}$$

eta – угол между направлениями проводника и вектора индукции  $ec{B}$  .



Сила Лоренца действует на заряженную частицу с зарядом q , движущуюся со скоростью  $\upsilon$  магнитном поле

$$\vec{F}_{\mathcal{I}} = q \cdot \left[ \vec{v} \times \vec{B} \right], \quad (3.9)$$

или в скалярном виде

$$F_{n} = q \cdot \upsilon \cdot B \cdot \sin \beta , \qquad (3.10)$$

eta- угол между направлениями вектора индукции  $ec{B}$  и скорости заряженной частицы  $ec{\upsilon}$  . Направление силы Лоренцы

определяется правилом левой руки и для положительного заряда показано на рис. 3.6; для отрицательного заряда сила направлена противоположно.

На контур площадью S с током I в магнитном поле действует момент сил, который переориентирует контур. Величина этого вращающего момента определяется выражением

$$M = I \cdot S \cdot B \cdot \sin \alpha \tag{3.11}$$

lpha — угол между направлениями вектора индукции  $ec{B}$  и вектором нормали  $ec{n}$  к плоскости контура.

Пользуясь формулой (3.8), для собственного магнитного момента контура  $\vec{p}_m$  выражение (3.11) для вращательного момента можно записать в виде

$$M = p_m \cdot B \cdot \sin \alpha \,, \tag{3.12}$$

lpha — угол между направлениями вектора индукции  $\vec{B}$  и вектором собственного магнитного момента контура  $\vec{p}_m$  .

### Задачи для самостоятельного решения

- 3.24. На проводник длиной 35 см со стороны магнитного поля действует сила 25 мН. По проводнику протекает ток 3 А. Угол между направлениями магнитной индукции и направлением тока равен 45°. Найти величину вектора магнитной индукции.
- 3.25. По двум бесконечно длинным прямолинейным проводникам протекают токи силой 3 A и 8 A. Расстояние между проводниками 25 см. Найти силу взаимодействия между проводниками, отнесенную к единице длины проводников.
- 3.26. По прямому проводнику длиной 20 см протекает ток силой 20 A находится в однородном магнитном поле с индукцией 0,01 Тл. Определить, какой угол составляет проводник с направлением магнитных линий, если на него действует постоянная сила  $10^{-2}$  H.
- 3.27. Прямой проводник массой 0,4 г находится между полюсами электромагнита. Какой ток необходимо пропустить по проводнику, чтобы он оставался в подвешенном состоянии? Ширина полюсов электромагнита 10 см, индукция поля в зазоре составляет 0,2 Тл.
- 3.28. Горизонтально размещенный металлический провод длиной 0,2 м и массой 0,05 кг свободно падает в гравитационном поле. Какую силу тока необходимо пропустить по проводнику, чтобы в магнитном поле с индукцией 0,2 Тл проводник двигался с постоянной скоростью? Показать на схеме, как необходимо направить вектор индукции магнитного поля, чтобы реализовать условия задачи.
- 3.29. Контур с током 4 А имеет форму окружности диаметром 10 см. Он размещен в магнитном поле с напряженностью 1,5 А/м так, что магнитные линии лежат в плоскости контура. Определить вращающий момент, который действует на контур.
- 3.30. Контур с током 0,5 А имеет форму квадрата, сторона которого равна 4 см. Он размещен в магнитном поле с индукцией 0,04 Тл, и направление вектора индукции составляет угол 30° с вектором нормали контура. Определить вращающий момент, действующий на контур.
- 3.31. Контур с током 4,5 A имеет форму окружности диаметром 10 см. Напряженность магнитного поля в его центре составляет 1,5 А/м. Плоскость контура составляет угол 30<sup>0</sup> с вектором напряженности. Определить вращающий момент, действующий на контур.

- 3.32. Электрон двигается со скоростью  $10^6$  м/с в магнитном поле с напряженностью  $3 \cdot 10^2$  А/м. Какая **сила** действует на электрон, если вектор скорости электрона перпендикулярен силовым линиям магнитного поля? Определить радиус орбиты, по которой двигается электрон.
- 3.33. Электрон двигается в однородном магнитном поле по окружности радиусом 1 см. Напряженность магнитного поля равна 1,5·10<sup>2</sup> А/м. Определить кинетическую энергию электрона (в Дж и эВ).
- 3.34. Электрон влетает в магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Скорость электрона 1<sup>06</sup> м/с. Индукция поля 5 мТл. Найти радиус окружности, по которой будет двигаться электрон.
- 3.35. Протон влетает в магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Скорость протона 3·10<sup>6</sup> м/с. Индукция поля 3 мТл. Найти период обращения протона по окружности, по которой будет двигаться протон. Заряд протона 1.6·10<sup>-19</sup> Кл, масса 1.67·10<sup>-27</sup> кг.
- 3.36. Электрон влетает в однородное магнитное поле с индукцией 10<sup>-3</sup>Тл перпендикулярно силовым линиям. Скорость электрона равна 4·10<sup>7</sup>м/с. Чему равны тангенциальная и нормальная составляющие его ускорения? Определить силу Лоренца, которая действует на электрон, радиус его стационарной траектории и работу силы Лоренца на протяжении трех полных оборотов электрона по этой орбите.
- 3.37. Электрон влетает в однородное магнитное поле с индукцией 2 мТл перпендикулярно силовым линиям. Скорость электрона равна  $3\cdot10^7$  м/с. Найти силу Лоренца, какая действует на электрон, и радиус его стационарной траектории. Какую работу выполняет сила Лоренца на протяжении трех полных оборотов электрона по этой орбите.
- 3.38. Протон и электрон **с одинаковой скоростью** влетают в магнитное поле. Найти отношение радиусов их траекторий. Заряд и массу элементарных частиц найти в таблице
- 3.39. Протон и электрон, ускоренные **одинаковой разностью потенциалов** влетают в магнитное поле. Найти отношение радиусов их траекторий.
- 3.40. Найти кинетическую энергию протона, который двигается по окружности радиусом 60 см в магнитном поле с индукцией 0,2 Тл.
- 3.41. Найти кинетическую энергию  $\alpha$  частички, которая двигается по окружности радиусом 1,2 м в магнитном поле с индукцией 1 Тл.

# 3.3. Закон электромагнитной индукции. Работа магнитных сил

Изменение магнитного потока, пронизывающего контур, является причиной возникновения в контуре ЕДС и протекания индукционного тока. Величину ЕДРС определяет закон электромагнитной индукции

$$E_{un\theta} = -\frac{d\Phi}{dt}, \qquad (3.13)$$

а величину индукционного тока — обычный закон Ома  $I_{uuo} = E_{uuo} / R$ .

Если магнитный поток изменяется вследствие изменения тока, протекающего по контуру, ЕДС называют **ЕДС самоиндукции**, и ее величину определяет закон

$$E_{c uno} = -L \frac{dI}{dt} \,. \tag{3.14}$$

Коэффициент пропорциональности в формуле (14) называют **индуктивностью**; для соленоида длиной l , и сечением S , с плотностью витков n индуктивность L равна

$$L = \mu_o \cdot \mu \cdot n^2 \cdot l \cdot S = \mu_o \cdot \mu \cdot \frac{N^2}{l} \cdot S$$
 (3.15)

При поступательном и вращательном движении проводников (или контуров) с током I магнитные силы выполняют элементарную работу

$$dA = I \cdot d\Phi. \tag{3.16}$$

 $d\Phi$  – изменение магнитного потока, пронизывающего контур. Для частных случаев общее выражение (3.16) запишем подробнее.

Для того, чтобы в магнитном поле с индукцией B проводник длиною l с током I переместить в плоскости, перпендикулярной вектору  $\vec{B}$  , необходимо выполнить работу

$$dA = I \cdot B \cdot l \cdot dx = I \cdot B \cdot dS , \qquad (3.17)$$

dx — параллельный перенос проводника (без изменения его ориентации), dS — площадь, пересекаемая проводником во время движения.

Для того, чтобы изменить ориентацию контура площадью S с током I в магнитному поле, необходимо выполнить работу

$$A = I \cdot \Delta \Phi = I \cdot B \cdot S \cdot \cos \alpha_2 - I \cdot B \cdot S \cdot \cos \alpha_1, \tag{3.18}$$

де  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  - углы между направлениями вектора индукции  $\vec{B}$  и вектором нормали  $\vec{n}$  к плоскости контура в начальном и конечном положениях. При протекании тока в проводнике произвольной формы в пространстве

При протекании тока в проводнике произвольной формы в пространстве вокруг него создается неограниченное магнитное поле, по которому

распределена магнитная энергия. Для идеального бесконечно длинного соленоида магнитное поле сосредоточено исключительно внутри соленоида и накопленная им магнитная энергия определяется выражением

$$W_{\text{MG2H}} = \frac{L \cdot I^2}{2} \quad . \tag{3.19}$$

Поле внутри соленоида является однородным, и это в частности означает, что плотность магнитной энергии

$$\omega_{\text{MAZH}} = \frac{W_{\text{MAZH}}}{S \cdot l} \tag{3.20}$$

есть величина постоянная по всему объему соленоида.

### Задачи для самостоятельного решения

- 3.42. На картонный каркас длиной 60 см и диаметром 2 см намотан в один слой проводник диаметром 0.4 мм таким образом, что витки плотно прилегают друг к другу. Вычислить индуктивность такого соленоида.
- 3.43. Катушка длиной 20 см и диаметром 3 см имеет 400 витков. Найти индуктивность катушки.
- 3.44. Индуктивность катушки 1 мГн, диаметр ее 4 см, диаметр проводника, который наматывается, равен 0.6 мм. Витки плотно прилегают друг к другу. Найти количество витков катушки.
- 3.45. Обмотка соленоида состоит из N (неизвестное число) витков медного проводника, поперечное сечение которого 1 мм<sup>2</sup>. Длина соленоида 25 см, его сопротивление 0.2 Ом. Найти индуктивность соленоида.
- 3.46. В однородном магнитном поле с индукцией 0,8 Тл равномерно вращается рамка с угловой скоростью 15 рад/с. Плоскость рамки равна 150 см². Ось вращения перпендикулярна линиям индукции магнитного поля. Найти ЭДС которая генерируется рамкой.
- 3.47. Горизонтальный провод длиной 1 м вращается вокруг вертикальной оси, которая проходит через один из его концов. Индукция магнитного поля составляет 5·10<sup>-5</sup> Тл, направление силовых линий совпадает с направлением оси вращения провода. С какой частотой необходимо вращать провод, чтобы на его концах возникла разность потенциалов 1 мВ? Как изменится результат, если ось вращения будет проходить через середину этого провода?

- 3.48. Из провода сопротивлением 1 Ом создали окружность с радиусом 2 см и разместили в однородном магнитном с индукцией 0,2 Тл. Плоскость контура перпендикулярна направлению магнитного поля. Какой заряд протечет через контур, если его повернуть на 90°?
- 3.49. Соленоид имеет 1000 витков. Площадь поперечного сечения соленоида 10 см<sup>2</sup>. Вдоль обмотки течет ток, который создает магнитное поле с индукцией 1.5 Тл. Найти среднее значение ЭДС, возникающей в соленоиде, если ток уменьшится до нуля за 500 мкс.
- 3.50. Вдоль катушки индуктивностью 5 мкГн течет ток силой 3 А. При размыкании цепи ток уменьшается практически до нуля за время 8 мс. Определить среднее значение возникающей ЭДС самоиндукции.
- 3.51. Силу тока в катушке равномерно увеличивают с помощью реостата на 0,5 A за 1 с. Найти среднее значение ЭДС самоиндукции, если индуктивность катушки 2 мГн.
- 3.52. Катушка длиной 20 см и диаметром 3 см имеет 400 витков. Чему равна энергия магнитного поля, если по катушке протекает электрический ток 2 А?
- 3.53. В катушке индуктивностью 5 мГн ток изменяется по закону  $I(t) = a \cdot t + b \cdot t^3$ , где a = 7 A/c, b = 3 A/c<sup>3</sup>. Для момента времени 6 с найти ЭДС самоиндукции, возникающей в катушке, и энергию магнитного поля.
- 3.54. Электрический ток в катушке индуктивностью 3,2 мкГн изменяется по закону:  $I(t) = a b \cdot t^2$ , где a = 0.7мА, b = 0.03 мА/с². Найти ЭДС самоиндукции в момент времени 3 с. Определить, в какой момент времени энергия магнитного поля в катушке равняется нулю.
- 3.55. Электрический ток в катушке индуктивностью 30 мкГн изменяется по закону:  $I(t) = a b \cdot t$ , где a = 0.8 мА, b = 0.02 мА/с. Определить энергию магнитного поля в катушке в начальный момент времени, а также значения ЭДС самоиндукции.
- 3.56. Соленоид состоит из 800 витков. При силе тока 1 А магнитный поток, который пронизывает каждый из витков соленоида, равен 0.1 мВб. Найти энергию магнитного поля соленоида. Сердечник из немагнитного материала.
- 3.57. Соленоид с сердечником из немагнитного материала состоит из 1200 витков проводника, которые плотно прилегают друг к другу. При силе

- тока 4 А магнитный поток, который пронизывает каждый из витков, равен 6 мкВб. Определить индуктивность соленоида и энергию магнитного поля соленоида.
- 3.58. Два прямолинейных длинных параллельных проводника находятся на расстоянии 10 см друг от друга. Какую работу на единицу длину проводников необходимо выполнить, чтобы увеличить расстояние между ними до 20 см? По проводникам протекают токи 20 А и 30 А.
- 3.59. Проводник, выполненный в форме окружности, разместили в однородном магнитном поле таким образом, что его плоскость перпендикулярна силовым линиям поля. Напряженность магнитного поля равна 4,1·10<sup>3</sup> А/м. Радиус контура составляет 2 см, и в нем протекает ток силой 2А. Какую работу необходимо выполнить, чтобы повернуть контур на 90° вокруг его оси симметрии?
- 3.60. однородном магнитном поле 0.5 (рис.3.7) с индукцией Тл равномерно перемещают проводник 10 см. По проводнику 2 A. протекает ток Скорость 20 равна проводника направлена перпендикулярно линиям индукции. Определить, какую работу 10 выполнила внешняя

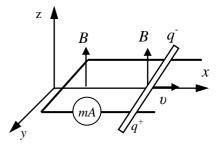


Рис.3.7

секунд, какая мощность развивалась в процессе.

# Примеры тестовых заданий

**Тест 1.** Электрон влетает в магнитное поле перпендикулярно линиям индукции и движется по окружности под действием силы Лоренца. После полных 5 оборотов электрона магнитное поле совершило работу

1. 
$$(q \cdot \upsilon \cdot B) \cdot 5 \cdot 2\pi$$

**2.** 
$$5(q \cdot v \cdot B)/2\pi$$

**3**. 0

4. 
$$q \cdot \upsilon \cdot B \cdot \cos(2\pi/5)$$

5. нет правильного ответа

**Тест 2.** По бесконечно длинному прямому проводнику протекает постоянный электрический ток 10 А. Если **силу тока** увеличить вдвое, возникающая ЭДС самоиндукции

- **1.** возрастет в 2 раза, **2.** уменьшится в 2 раза, **3.** возрастет в 4 раза,
- **4.** уменьшится в 4 раза, **5.** Равна нулю в обоих случаях **6.** не изменится

### 3.4. Переходные процессы

Переходные процессы наблюдаются в цепях постоянного тока, если они содержат соленоид или конденсатор. Суть переходного процесса в том, что установление в цепи постоянного тока происходит не мгновенно, а с некоторым запаздыванием относительно момента подключения ЭДС. Точно также при размыкании цепи спад тока до нуля происходит не мгновенно скачком, а наблюдается постепенное убывание тока.

1. Цепь постоянного тока содержит источник тока ЕДС  $E_o$ , активное сопротивление R, катушку индуктивности L та выключатель. При замыкании цепи происходит медленное нарастание электрического тока I вследствие возникновения ЕДС самоиндукции. Закон нарастания силы тока со временем имеет вид

$$I = I_o \cdot \left[ 1 - exp(-\frac{R}{L} \cdot t) \right] . \tag{3.21}$$

При размыкании цепи уменьшение тока происходит в соответствии с экспоненциальным законом

$$I = I_o \cdot exp(-\frac{R}{L} \cdot t). \tag{3.22}$$

В выражениях (20) і (21)  $I_o$  - максимальный ток в цепи, который определяется законом Ома  $I_o = E_o / R$ .

2. Цепь постоянного тока содержит источник тока ЕДС  $E_o$ , активное сопротивление R, конденсатор емкостью C та выключатель. При замыкании цепи происходит мгновенное установление начального тока  $I_o = E_o/R$ , и затем вследствие заряда конденсатора сила тока убывает (Рис.2.27). Закон изменения тока заряда имеет вид

$$I = I_o \cdot \exp(-\frac{t}{R \cdot C}). \tag{3.23}$$

При заряде конденсатора напряжение на нем изменяется по закону

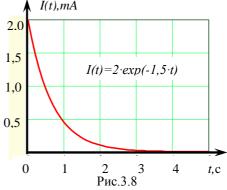
$$U = U_o \cdot \left[ (1 - exp(-\frac{t}{R \cdot C})) \right]$$
 (3.24)

**При разряде конденсатора** в выражении (3.23) появляется знак «-», так как токи заряда и разряда протекают в противоположных направлениях. Напряжение на конденсаторе при его разряде убывает по экспоненциальному закону

$$U = U_o \cdot exp(-\frac{t}{R \cdot C}). \tag{3.25}$$

### Задачи для самостоятельного решения

- 3.61. Конденсатор емкостью 20 мкФ через сопротивление 25 кОм заряжается от источника с ЭДС 0,2 В. Какой заряд будет сосредоточен на обкладках конденсатора в момент времени 2 с? Какой будет сила тока в цепи в этот момент времени?
- 3.62. Конденсатор емкостью 30 мкФ разряжается через сопротивление 5 кОм от начального значения заряда 4,5 мкКл. Для момента времени 5 с найти заряд на обкладках конденсатора и силу тока в цепи.
- 3.63. Определить время релаксации для RC-контура, содержащего Конденсатор емкостью 10 мФ и активное сопротивление 55 кОм.
- 3.64. Время релаксации для некоторого RC-контура равно 30 мс. За сколько времени сила тока разряда конденсатора уменьшится в 2 раза по сравнению с начальным значением?
- 3.65. Время полуразряда конденсатора равно 12 с. За сколько времени ток разряда уменьшится в 16 раз?
- 3.66. Катушка индуктивности 4 мГн и сопротивление 3 кОм подключены к ЭДС равной 2 В. Найти ток и энергию магнитного поля через 5 мкс после замыкания ключа.
- 3.67. Катушка индуктивности 5 мГн соединена с сопротивлением 6 ком. При подключении ЭДС=3 В ток нарастает. Найти энергию магнитного поля в момент, когда сила тока равна 0,8 от стационарного значения.
- 3.68. Ток в катушке индуктивностью 8 мГн с сопротивлением 2 кОм убывает от начального значения 5 А. Найти ток при t=6 мкс.
- 3.69. Ha рис.3.8 показан график релаксационного процесса некоторого *RL*-контура. Известно, что активное сопротивление равно 2 Определить индуктивность кОм. контура; записать закон изменения напряжения на активном сопротивлении для этого процесса.



# Лабораторная работа №4.1 Исследование зависимости магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности магнитного поля

**Цель работы**: изучить явление самоиндукции и методы экспериментального определения индуктивности катушки, изучить свойства ферромагнетиков.

**Теоретические сведения.** Магнитное поле описывают две векторные величины напряженность  $\vec{H}$  (A/м) и индукция  $\vec{B}$  (Тл). Они связаны между собой соотношением

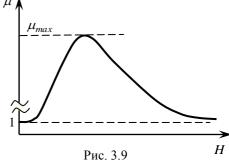
$$\vec{B} = \mu \cdot \mu_o \cdot \vec{H} \,, \tag{3.26}$$

в котором  $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \ \Gamma \text{h/m}$  – универсальная физическая постоянная,  $\mu$  - магнитная проницаемость среды.

Все вещества по своим магнитным свойствам делятся на три группы: диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики. Изучение диамагнетиков и парамагнетиков имеет в большей степени научный интерес, а ферромагнетики имеют большое значение для современных технологий. К ферромагнетикам относятся железо, никель, кобальт, гадолиний и некоторые другие вещества. Все они отличаются такими характерными особенностями.

- Магнитная проницаемость этих веществ порядка нескольких тысяч.
- Значение магнитной проницаемости ферромагнетиков не является постоянной, а существенно зависит от напряженности магнитного поля. Поэтому оно не приводится в таблицах и определяется экспериментально для каждой технической ситуации.
- Для ферромагнетиков существует понятие остаточной намагниченности, то есть они создают вокруг себя магнитное поле, если их извлечь из внешнего магнитного поля, в котором происходило намагничивание.  $\mu$

Схематично график зависимости  $\mu(H)$  приведен на рис. 3.9. В отсутствие магнитного поля магнитная проницаемость полностью размагниченного ферромагнетика близка к единице, как у обычного парамагнетика. При увеличении напряженности H внешнего магнитного поля магнитная проница-



емость растет и достигает своего максимального значения  $\mu_{max}$ , при дальнейшем увеличении H магнитная проницаемость спадает и асимптотически приближается к единице. То есть и полностью размагниченный, и намагниченный до насыщения ферромагнетик ведет себя как парамагнетик.

В данной работе исследуется зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от напряженности внешнего магнитного поля методом амперметра — вольтметра. В основе этого метода лежит явление самоиндукции. Если в проводнике изменяется сила тока, то изменяется магнитный поток, пронизывающий контур, и в контуре возникает ЭДС самоиндукции

$$E_{uno} = -L\frac{dI}{dt}, \qquad (3.27)$$

где введена физическая величина — **индуктивность** L. Она определяется его геометрическими параметрами и магнитной проницаемостью сердечника

$$L = \mu \,\mu_0 \, \frac{N^2}{I} \, S \,. \tag{3.28}$$

Как видно, индуктивность определяется числом витков провода N, сечением катушки S и ее длиной l. Очевидно, если по каким либо причинами изменяется индуктивность, это связано с изменением магнитной проницаемости, так как указанные выше параметры N, S и l изменяться не могут.

Если катушка индуктивности включена в цепь постоянного тока, и ток протекает стационарно, то индуктивность катушки и ее магнитные свойства не проявляются. Но при замыкании и размыкании цепи происходит изменение силы тока, в катушке генерируется ЭДС самоиндукции, поэтому нарастание или спад тока не происходят мгновенно. Такой процесс экспоненциального нарастания (или уменьшения) тока называют переходным процессом.

Если катушка индуктивности включена в цепь переменного тока, и его изменение происходит в соответствии с законом

$$I = I_0 \sin(\omega t), \qquad (3.29)$$

то вводят понятие полного сопротивления цепи Z. В нем содержатся две составляющие:  $R_a$  - активное сопротивления проводника, из которого намотана катушка, и  $R_{uno} = \omega \cdot L$  - индуктивное сопротивление. Как видно, вторая составляющая зависит от частоты тока и индуктивности катушки.

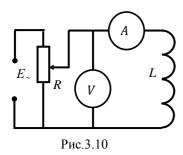
В теории электромагнитных колебаний для полного сопротивления цепи переменного тока, содержащей активную и индуктивную составляющие, получено выражение

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2} \tag{3.30}$$

Введение понятия «полное сопротивление цепи» и выражения (3.30) для его вычисления позволяет использовать закон Ома для переменного тока

$$I = \frac{U}{Z} \tag{3.31}$$

Описание установки и методика измерений. Исследование магнитных полей в большинстве случаев проводят с использованием цепи переменного тока. На рис. 3.10 показана схема установки для экспериментального



определения индуктивности и исследования зависимости магнитной проницаемости от напряженности внешнего магнитного поля. К катушке с индуктивностью L подключен источник переменного напряжения через делитель напряжения R. В цепь включены также вольтметр и амперметр для измерения, соответственно, подаваемого напряжения и тока, протекающего через катушку.

Очевидно, что измерив силу тока и напряжение, затем можно рассчитать полное сопротивление катушки используя формулу (3.31). За тем, воспользовавшись выражением (3.30), определим индуктивность катушки при различных значениях тока и напряжения. При расчетах помним, что в установке используется сетевое напряжение частотой  $\nu = 50$  Гц, которое определяет циклическую частоту колебаний  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot \nu$ .

Напряженность магнитного поля в катушке определяется силой тока и плотностью витков провода

$$H = \frac{N}{l}I {.} {(3.32)}$$

Так как по катушке протекает переменный ток  $I = I_0 \sin(\omega t)$ , напряженность магнитного поля также изменяется по гармоническому закону

$$H = \frac{N}{I} I_0 \sin(\omega t) = H_0 \sin(\omega t). \tag{3.33}$$

Как видно из формул 3.32-3.33, изменение силы тока однозначно определяет изменение напряженности поля в катушке. Учитывая также замечания к формуле 3.28, делаем вывод: изучая влияние силы тока на индуктивность катушки в цепи переменного тока, получаем фундаментальную зависимость влияния напряженности магнитного поля на магнитную проницаемость ферромагнетиков.

### Порядок измерений

- 1. Собрать цепь в соответствии с рис. 3.10
- Для заданных значений напряжения измерить силу тока, протекающего в катушке.
- 3. Данные занести в таблицу.

### Порядок вычислений

1. Определить полное сопротивление цепи для всех измеренных токов и напряжений

$$Z = \frac{U}{I} \,. \tag{3.34}$$

2. Определить индуктивность катушки, преобразовав формулу (3.30) к виду

$$L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{\omega} \,. \tag{3.35}$$

- 3. Из формулы (3.28) вывести выражение для  $\mu$  и, выбрав максимальное значение индуктивности, вычислить максимальную магнитную проницаемость ферромагнитного сердечника для данной катушки.
- 4. Построить график зависимости L(I), и объяснить, почему он в точности повторяет зависимость  $\mu(H)$ .
- 5. Вычислить относительную погрешность измерения  $\mu_{max}$

$$\varepsilon_{\mu} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{U}}{U}\right)^{2} + \left(\frac{\sigma_{I}}{I}\right)^{2}} \tag{3.36}$$

6. Вычислить абсолютную погрешность измерений

$$\sigma_{\mu} = \mu_{max} \cdot \varepsilon_{\mu} \,, \tag{3.37}$$

# Лабораторная работа №4.3

# Изучение петли гистерезиса методом электронного осциллографа и определение тепловых потерь при перемагничивании ферромагнетика

**Цель работы**: изучить свойства ферромагнетиков, процессы перемагничивания и явление гистерезиса, разобрать принцип работы осциллографа и его применение для исследования ферромагнетиков.

**Теоретические сведения.** Как уже отмечалось, магнитное поле описывают две векторные величины напряженность  $\vec{H}$  (A/м) и индукция  $\vec{B}$  (Тл), связанные соотношением

$$\vec{B} = \mu \cdot \mu_o \cdot \vec{H} \,, \tag{3.38}$$

в котором  $\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \ \Gamma$ н/м — универсальная физическая постоянная,  $\mu$  - магнитная проницаемость среды.

Для диамагнетиков и парамагнетиков магнитная проницаемость есть постоянная величина, она приведена в справочниках, поэтому для этих веществ формула (3.1) выражает линейную зависимость. Для ферромагнетиков формула (3.1) выражает нелинейную зависимость, так как величина  $\mu$  существенно нелинейна и может изменяться, например, от 1 до 2000 при изменении напряженности магнитного поля от 0 до 10 A/м.

У ферромагнетиков наблюдается **остаточная намагниченность**, то есть они создают вокруг себя магнитное поле, если их извлечь из внешнего поля, в котором происходило намагничивание. При циклическом

перемагничивании зависимость индукции магнитного поля OT напряженности B(H)является неоднозначной, имеет характерную форму петли, и называется петлей гистерезиса (рис.3.10). Состояние полностью размагниченного ферромагнетика отсутствие В внешнего магнитного поля характеризуется на рис.3.10 точкой «0». Если увеличивать напряженность внешнего магнитного поля, индукция будет расти по нелинейному закону,

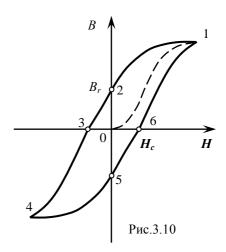


график этого процесса показан пунктирной линией 0-1. Дальнейшее увеличение напряженности H оказывается нецелесообразным, так как Bдостигла насыщения (график B(H)) выходит на горизонтальный участок). Начнем размагничивать ферромагнетик, уменьшая напряженность H. Как видно из рисунка, кривая размагничивания 1-2 не совпадает с исходной кривой намагничивания 0-1. Более того, при напряженности внешнего поля, равной нулю, ферромагнетик имеет ненулевую индукцию  $B_r$ , называемую остаточной индукцией. На рисунке 3.10 этому состоянию соответствует точка 2. Все постоянные магниты, которыми пользуются в технике или быту это ферромагнитный материал в состоянии 2. Для того, чтобы ферромагнетик полностью размагнитить, можно создать магнитное поле противоположного направления (то есть по проводнику, намотанному на катушку, пропустить ток противоположного направления). Как видно, существует состояние 3, в котором индукция магнитного поля равна нулю. Напряженность магнитного поля, при которой достигается размагничивание, называется **коэрцитивной силой**  $H_c$ . Увеличивая напряженность, достигаем состояния 4 – насыщения ферромагнетика и далее процесс проходит точки 5 и 6, физически тождественные точкам 2 и 3. Далее, увеличивая напряженность, достигаем состояния 1. То есть, график 3.10 замкнулся и образовал петлю.

Если по катушке протекает переменный ток

$$I = I_0 \sin(\omega t), \tag{3.39},$$

то напряженность изменяется также по гармоническому закону

$$H = \frac{N}{l} I_0 \sin(\omega t) = H_0 \sin(\omega t). \tag{3.40}$$

При этом с частотой  $\omega$  происходит перемагничивание ферромагнетика. Если используется сетевое напряжение с частотой  $\nu=50$  Гц, то ферромагнетик 100 раз за секунду оказывается в состоянии полного намагничивания. При этом процесс, описываемый зависимостью B(H), 50 раз в секунду пробегает по участкам кривой 1-2-3-4-5-6-1.

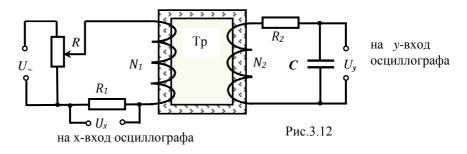
Петля гистерезиса имеет важное техническое значение. Ее площадь определяется интегралом,

$$Q = \int B \cdot dH \quad , \tag{3.41}$$

характеризующим потери энергии при перемагничивании ферромагнитного сердечника на протяжении одного цикла перемагничивания. Другими словами, площадь петли характеризует количество тепла, выделяемое в сердечнике за один период перемагничивающего переменного тока.

электронно-лучевая трубка, показанная на рис. 3.11. Электронная пушка 1 испускает электроны, летящие вдоль стеклянной трубки 2 Сформированный электронный пучок попадает на систему пластин 3, ориентиро-ванных вертикально и горизонтально. Для прос-тоты на рис. 3.11 пока-заны только горизонтально расположенные пластины. На них подано постоянное напряжение: на верхнюю «+», на нижнюю «-». Отрицательно заряженные электроны притягиваются к верхней пластине, изменяют направление движения. Теперь они не попадают в центральную точку экрана, а смещаются по вертикали. Поэтому эта пара пластин называется вертикально отклоняющая, на нее подают напряжение  $U_{\nu}$ . Перпендикулярно расположенная пара пластин является горизонтально отклоняющей, на нее подают напряжение  $U_{\rm r}$ . Экран 4 является стеклянным, но его внутренняя поверхность покрыта слоем люминофора. Это вещество светится при попадании электронов в заданную точку экрана. Очевидно, если преобразовать напряженность магнитного поля в напряжение  $U_{\rm r}$ , а индукцию магнитного поля в напряжение  $U_{\scriptscriptstyle \gamma}$  , движение электронного луча покажет нам петлю гистерезиса на экране.

**Описание установки и методики измерений.** Схема, показанная на рис. 3.12, позволяет преобразовать магнитные величины индукцию и напряженность преобразовать в напряжение, подаваемое на входы осциллографа.



Основным элементом установки является трансформатор Тр, в первичной обмотке которого число витков провода  $N_1$ , во вторичной  $N_2$ . На первичную обмотку подается синусоидальное напряжение  $U_{\sim}$ , амплитуда которого регулируется переменным сопротивлением R. Через сопротивление  $R_1$  протекает ток

$$I = I_o \sin(\omega t), \tag{3.42}$$

Напряжение  $U_x$ , подаваемое на вход осциллографа определяется законом Ома

$$U_{r} = I \cdot R_{1} = I_{o} \cdot R_{1} \cdot \sin(\omega t) = U_{o} \cdot \sin(\omega t), \qquad (3.43)$$

Напряженность магнитного поля в сердечнике меняется по такому же закону

$$H = \frac{N}{\ell} I_0 \sin(\omega t) = H_0 \sin(\omega t). \tag{3.44}$$

Комбинируя формулы (3.43) и (3.44), получим соотношене

$$H = \frac{N}{\ell} \cdot \frac{U_x}{R_1} \tag{3.45}$$

Теперь рассмотрим, как формируется напряжение  $U_y$ , определяемое индукцией поля в сердечнике. Как видно из схемы установки,  $U_y$  — это напряжение, до которого заряжается конденсатор, и оно может быть определено из соотношений электростатики  $U_y = q/C$ .

Учтем, что током заряда конденсатора является индукционный ток, возникающий во вторичной обмотке. В соответствии с законом Фарадея в катушке, содержащей  $N_2$  витков провода, величина ЭДС индукции определяется как

$$E_{uno} = -N_2 \frac{d\Phi}{dt} = -N_2 S \frac{dB}{dt}. \tag{3.46}$$

Индукционный ток определяется законом Ома

$$I_2 = \frac{E_{uno}}{R_2} = -\frac{N_2 S}{R_2} \frac{dB}{dt}$$
 (3.47)

Этот ток изменяется с течением времени, поэтому полный заряд, накопившийся на конденсаторе, можно определить интегрированием

$$q = \int I_2 dt = \int \frac{N_2 \cdot S}{R_2} \cdot \frac{dB}{dt} \cdot dt = \frac{N_2 \cdot S}{R_2} \cdot \int dB = \frac{N_2 \cdot S \cdot B}{R_2} . \tag{3.48}$$

Теперь для напряжения заряда конденсатора получаем выражение

$$U_{y} = \frac{q}{C} = \frac{N_2 S}{C R_2} B. {3.49}$$

Как видно, напряжение на конденсаторе однозначно определяет индукцию

$$B = \frac{C \cdot R_2 \cdot U_y}{N_2 \cdot S} \,. \tag{3.50}$$

Итак, подавая на входы осциллографа напряжения  $U_x$  и  $U_y$ , получим на экране петлю гистерезиса (зависимость индукции поля в ферромагнетике от напря-женности внешнего магнитного поля при циклическом перемагничивании).

### Порядок выполнения работы

- 1. Собрать схему установки рис. 3.12.
- 2. Изменяя напряжение на входе, получить на экране осциллографа максимальную петлю гистерезиса.
- 3. Определить  $x_6$ ,  $y_6$  координати вершин петли в миллиметрах.
- 4. Записать координаты  $x_c$  пересечения петли с осью H для последующего расчета коэрцитивной силы.
- 5. Записать координаты  $y_r$  пересечения петли с осью B для последующего расчета остаточной индукции.
- 6. Построить в протоколе максимальную петлю гистерезиса, определить ее площадь (в c M).

# Порядок расчетов

1. По известным коэффициентам усиления осциллографа по оси Оу ( $\gamma_y$ ) и по оси Оу ( $\gamma_x$ ) рассчитать напряжения

$$U_{x_{\theta}} = \frac{x_{\theta}}{\gamma_{x}} \qquad \qquad U_{y_{\theta}} = \frac{y_{\theta}}{\gamma_{y}}.$$

- 2. Используя формулы (3.45) и (3.50), определить напряженность  $H_{\epsilon}$  и индукцию  $B_{\epsilon}$ , соответствующие вершинам петли.
- 3. Рассчитать среднюю магнитную проницаемость ферромагнетика в данных условиях.
- 4. По известным коэффициентам усиления осциллографа по оси Оу ( $\gamma_y$ ) и по оси Оу ( $\gamma_x$ ) рассчитать напряжения

$$U_{xc} = \frac{x_c}{\gamma_x} \qquad \qquad U_{yr} = \frac{y_r}{\gamma_y} \,.$$

5. Используя формулы (3.45) и (3.50), определить коэрцитивную силу и остаточную индукцию данного ферромагнетика

6. Определить тепловые потери в единице объема за один цикл перемагничивания

$$q = \oint H dB = \frac{H_c}{x_c} \frac{B_r}{y_r} S_{nem}, \qquad \left(\frac{\mathcal{A} \times c}{M^3 \cdot nepuo\partial}\right)$$
 (3.51)

7. Определить мощность тепловых потерь в единице объема

$$P = \frac{q}{T} = qv, \qquad \left(\frac{Bm}{M^3}\right) \tag{3.52}$$

8. Определить удельную мощность тепловых потерь

$$P_{num} = \frac{P}{\rho}, \qquad \left(\frac{Bm}{\kappa z}\right) \tag{3.53}$$

 $\rho = 7800 \ \text{кг/m}^3$  - плотность материала ферромагнитного сердечника

# Контрольные вопросы для подготовки к лабораторным работам

- 1. Какие параметры описывают магнитное поле? В чем смысл введения двух связанных параметров напряженность и индукция магнитного поля?
- 2. В чем суть явлений электромагнитной индукции, самоиндукции?
- 3. Что характеризуют такие параметры: индукция магнитного поля и индуктивность проводника (соленоида)? Каковы единицы измерения этих величин?
- 4. Имеется две катушки: одна с ферромагнитным, другая с полимерным сердечником. Если изменять силу тока, у какой катушки будет изменяться индуктивность? Почему?
- 5. Как экспериментально определить магнитную проницаемость ферромагнетика?
- 6. От чего зависит магнитная проницаемость ферромагнетиков?
- 7. Что такое постоянный магнит с точки зрения физики магнитных явлений в веществе?
- 8. Как размагнитить постоянный магнит? Что называется точкой Кюри?
- 9. Чем отличаются диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики.
- 10. Как устроена электронно-лучевая трубка осциллографа?

# Тестовые задания для подготовки к модулю по теме «Электромагнитные явления»

# Закон Кулона. Электрическое поле. Напряженность

**Тест 1.** Два точечных заряда размещены на расстоянии  $r_1$  в среде с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_1$ . Те же заряды переносят в новую среду с диэлектрической проницаемостью ез и устанавливают на расстоянии  $r_2$  так, что сила взаимодействия между ними не изменяется. Между параметрами  $r_1$  и  $r_2$  выполняются соотношения

**1.** 
$$r_1=r_2$$
 **2.**  $\sqrt{\varepsilon_1}\cdot r_1=\sqrt{\varepsilon_2}\cdot r_2$  **3.**  $\sqrt{\varepsilon_2}\cdot r_1=\sqrt{\varepsilon_1}\cdot r_2$  **4.**  $\varepsilon_1\cdot r_1=\varepsilon_2\cdot r_2$  **5.**  $\varepsilon_2\cdot r_1=\varepsilon_1\cdot r_2$  **6.** Нет правильного соотношения

**Тест 2.** Два точечных заряда размещены на расстоянии  $r_1$  в вакууме. Расстояние между зарядами уменьшают вдвое. Сила взаимодействия между зарядами

**1.** возрастает в 2 раза, **2**. уменьшается в 2 раза,

**3.** возрастает в 4 раза, **4.** уменьшается в 4 рази,

**5.** возрастает в  $\sqrt{2}$  раз; **6.** уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз

7. Нет правильного ответа

**Тест 3.** Напряженность электрического поля на расстоянии  $h_1$  от поверхности равномерно заряженного шара радиуса R равняется Известно, что  $h_1 = R$ . При удалении от поверхности на расстояние  $h_2$  в два раза большее значение напружености  $E_2$  и  $E_1$  находятся в таком соотношении

**1.** 
$$2E_2 = E_1$$

**2**. 
$$2E_2=3E_1$$

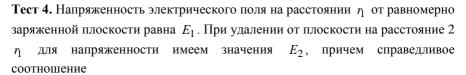
3. 
$$4E_2 = 9E_1$$

**4.** 
$$E_2 = E_1$$

5. 
$$E_2 = 2 E_1$$

**6.** 
$$9E_2 = 4E_1$$

7. Нет правильного ответа



**1.**  $2E_2 = E_1$  **2.**  $E_2 = 4E_1$  **3.**  $4E_2 = E_1$  **4.**  $E_2 = E_1$  **5.**  $E_2 = 2E_1$  **6.**  $\sqrt{2}$   $E_2 = E_1$ 

7. Нет правильного ответа

**Тест 5.** Плоский конденсатор подключили к источнику напряжения U. Не отключая от источника, расстояние между пластинами уменьшили расстояние в 2 раза. Вследствие этого напряженность электрического поля между обкладками

**1.** возрастает в 2 раза, **2**. уменьшается в 2 раза,

**3.** возрастает в 4 раза, **4.** уменьшается в 4 раза,

**5**. не изменяется **6.** уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз

7. Нет правильного ответа

**Тест 6.** Шар радиуса R заряжен и имеет потенциал  $\varphi$ . На расстоянии R от поверхности шара потенциал электрического поля

1.  $2\varphi$ 

 $\varphi$  2.  $\varphi$  3.  $\varphi$  /2 4.  $\sqrt{2}$   $\varphi$  5.  $\varphi$  /4 6.  $\varphi$  /  $\sqrt{2}$  7. Нет правильного ответа

**Тест 7.** Заряженная частичка, масса которой m и заряд q, двигается в электрическом поле с напряженностью Е. Ускорение, с которым движется частичка, равно

**1.** 0 **2.**  $\frac{mq}{E}$  **3.**  $\frac{E}{ma}$  **4.**  $\frac{Eq}{m}$ 

5. Нет правильного выражения

Тест 8. Равномерно заряженная сфера радиуса R создает электрическое поле, причем на расстоянии 2R от центра напряженность поля равняется  $E_1$ . На расстоянии R/2 от центра напряженность электрического поля равна

**1.**  $E_1$  **2.**  $4E_1$ 

3.  $E_1/2$ 

**4.**  $E_1/4$ 

**5**.  $2E_1$  **6.**  $\sqrt{2}$   $E_1$  **7.** 0 **8.** Нет правильного ответа

### Разность потенциалов. Работа

Тест 1. Разность потенциалов между обкладками конденсатора составляет 20 В. Электрон проходит расстояние между обкладками и приобретает кинетическую энергию

- **1.** 20 Дж,
- **2**. 20 9B,
- **3.** 20·10<sup>19</sup> Дж. **4.** 20·10<sup>-19</sup> эВ
- 5. Невозможно сказать, поскольку неизвестно расстояние между обкладками

**Тест 2.** Электрон (e) и протон (p) проходят расстояние между обкладками заряженного конденсатора и приобретают кинетическую энергию, причем

- **1.**  $E_e > E_p$ , **2.**  $E_e < E_p$  **3.**  $E_e = E_p$ ,
- 4. Невозможно сказать, поскольку неизвестно напряжение на конденсаторе

**Тест 3.** Протон (p) и  $\alpha$ -частица проходят расстояние между обкладками заряженного конденсатора и приобретают кинетическую энергию, причем

- **1.**  $E_{\alpha} = 4 E_{p}$ , **2.**  $E_{\alpha} = 2 E_{p}$  **3.**  $E_{\alpha} = E_{p}$ ,

- **4.**  $4E_{\alpha} = E_{D}$ , **5.**  $2E_{\alpha} = E_{D}$  **6.**  $E_{\alpha} = \pi^{2} \cdot E_{D}$ ,
- 7. Нельзя сказать, так как неизвестно напряжение на конденсаторе

Тест 4. Два одноименно заряженных шарика летят навстречу друг другу.

- 1. Их скорость увеличивается, так как электрическая сила совершает положительную работу
- 2. Их скорость уменьшается, так как электрическая сила совершает положительную работу
- 3. Скорость одного из них увеличивается, так как работу против сил отталкивания совершает внешняя сила
- Они сближаются до тех пор, пока потенциальня энергия их взаимодействия не достигнет своего минимального значения
- 5. Они сближаются до тех пор, пока потенциальня энергия их взаимодействия не достигнет своего максимального значения

Из приведенных утверждений выбрать одно или несколько правильных.

**Тест 5.** Два разноименно заряженных шарика из пластичного материала с зарядами  $q_1$  и  $q_2$  летят навстречу друг другу.

- 1. Их скорость увеличивается, так как электрическая сила совершает положительную работу
- 2. Их скорость уменьшается, так как электрическая сила совершает положительную работу
- 3. Скорость одного из них уменьшается, так как приложенная внешняя сила выполняет работу против сил отталкивания
- 4. Они сближаются до тех пор, пока не столкнутся и слипнутся. Заряд образовавшегося тела равен  $|q_1|+|q_2|$ .
- 5. Если к одному из шариков приложена внешняя сила, его можно становить, а затем заставить двигаться в противоположном направлении. При этом работа электрической силы отрицательна.

Из приведенных утверждений выбрать одно или несколько правильных.

# Электроемкость. Конденсаторы

**Тест 1.** Два конденсатора емкостями  $C_1$  и  $C_2=3C_1$  соединены последовательно. Соотношение между зарядами  $q_1$  и  $q_2$ , накопленными на обкладках после их заряда имеет вид:

**1.** 
$$q_1 = q_2$$
, **2.**  $3 q_1 = q_2$ , **3.**  $q_1 = 3 q_2$ , **4.**  $\sqrt{3} q_1 = q_2$ 

**5.** 
$$q_1 = \sqrt{3} \ q_2$$
 **6.**  $q_1 = 9 \ q_2$  **7**. Нет правильного ответа

**Тест 2.** Два конденсатора емкостями  $C_1$  и  $C_2 = 2C_1$  соединены последовательно. Соотношения между энергиями  $W_1$  и  $W_2$ , которые они накапливают после их заряда, имеет вид:

**1.** 
$$W_1 = W_2$$
, **2.**  $2W_1 = W_2$ , **3.**  $W_1 = 2W_2$ , **4.**  $\sqrt{2}$   $W_1 = W_2$   
**5.**  $W_1 = \sqrt{2}$   $W_2$  **6.**  $W_1 = 4W_2$  **7.**  $4W_1 = W_2$ 

**Тест 3.** Конденсатор емкостью C заряжен до разности потенциалов U. Чтобы разрядить конденсатор, его подключили к сопротивлению R.

Энергия, которая выделяется во время его разряда, равняется определяется соотношением

1. 
$$\frac{C \cdot U^2}{2}$$
 2.  $\frac{C \cdot U^2}{2} + I^2 \cdot R \cdot \Delta t$  3.  $\frac{U^2}{R} \cdot \Delta t$ 
4.  $\frac{C \cdot U^2}{2} + \frac{U^2}{R} \cdot \Delta t$  5.  $I^2 \cdot R \cdot \Delta t$ 

6. нельзя сказать, так как неизвестно, какая ее часть превращается в тепло

Тест 4. Существует набор из трех конденсаторов с емкостями 10 мкФ, 100 мкФ. 1000 мкФ. При их параллельном соединении результирующая емкость

- **1.**  $C_{e\kappa\theta}$  < 10 мкФ; **2.**  $C_{e\kappa\theta}$  > 10 мкФ **3.**  $C_{e\kappa\theta}$  = 1110 мкФ

- **4.**  $C_{\rho\nu\rho} > 1 \text{ м}\Phi$  **5.**  $C_{\rho\nu\rho} < 10^{-3} \Phi$  **6.** Правильного ответа нет
- 7. Правильными являются ответы \_\_\_\_\_(указать несколько номеров)

Тест 5. Между пластинами плоского воздушного конденсатора ввели диэлектрик с диэлектрической проницаемостью 2 и одновременно уменьшили вдвое расстояние между пластинами. Емкость конденсатора

- 1. не изменится
- **2.** возрастает в 2 раза **3.** возрастет в 4 раза
- **4.** уменьшится в 2 раза **5.** уменьшится в  $\sqrt{2}$  раз,

  - **6.** уменьшится в 4 раза **7.** Правильного ответа нет

# Постоянный электрический ток

**Тест 1.** Сопротивление R подключен к источнику с разностью потенциалов U. К клеммам источника подключают дополнительно еще сопротивление величиной (2R). Общий ток потребителя

- **1.** возрастает в 2 раза, **2**. возрастает в 3 раза **3.** возрастает в 1,5 раза
- **4.** уменьшается в 2 раза, **5.** уменьшается в 1,5 раза
- **6.** уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз, **7.** Нет правильного ответа

**Тест 2.** Проводник длиной l разрезали на два отрезка, и соединили их параллельно. В сравнении с начальным значением полное сопротивление

- **1.** возрастает в 2 раза, **2.** уменьшается в 2 раза, **3.** возрастает в 4 раза,
  - **4.** уменьшается в 4 раза, **5**. возрастат в  $\sqrt{2}$  раз;
  - **6.** уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз **7.** Нет правильного ответа

**Тест 3.** Два сопротивления  $R_1$  и  $R_2 = 3R_1$  соединены последовательно и подключены к источнику с напряжением U. На каждом из сопротивлений  $U_1$  и  $U_2$ . Между этими величинами падение напряжения равно выполняется такое соотношение

1. 
$$U_1 = U_2$$
,

1. 
$$U_1 = U_2$$
, 2.  $3U_1 = U_2$ ,

$$3.U_1 = 3U_2$$
,

**4.** 
$$\sqrt{3} \ U_1 = U_2$$
 **5.**  $U_1 = \sqrt{3} \ U_2$  **6.**  $U_1 = 9U_2$ 

**5.** 
$$U_1 = \sqrt{3} U_2$$

**6.** 
$$U_1 = 9 U_2$$

7. Нет правильного ответа

Тест 4. Длину спирали нагревателя увеличивают вдвое. Количество тепла, которое он отдает в окружающую среду ....

- **1.** возрастает в 2 раза,
- 2. уменьшается в 2 раза, 3. возрастает в 4 раза,

- **4.** уменьшается в 4 раза, 5. возрастает в  $\sqrt{2}$  раз;
- **6.** vменьшается в  $\sqrt{2}$  раз **7.** нет правильного ответа

Тест 5. Нагреватель выполнен в виде спирали, намотанной из проводника длиной l и сечением  $S_1$ . Будучи подключенным к стандартной сети, он потребляет электрическую мощность  $N_1$ . Если второй нагреватель, выполненный из проводника такой же длины, но с сечением  $2S_1$ , он будет потреблять электрическую мощность  $N_2$ . Найдите верное соотношение

1. 
$$N_1 = N_2$$

1. 
$$N_1 = N_2$$
, 2.  $2 N_1 = N_2$ , 3.  $N_1 = 2 N_2$ ,

3. 
$$N_1 = 2 N_2$$

**4.** 
$$\sqrt{2}$$
  $N_1 = N_2$  **5.**  $N_1 = \sqrt{2}$   $N_2$  **6.**  $N_1 = 4 N_2$ 

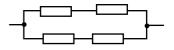
5. 
$$N_1 = \sqrt{2} N_2$$

6. 
$$N_1 = 4 N_2$$

7. 
$$4 N_1 = N_2$$

**7.**  $4 N_1 = N_2$  **8.** Нет правильного ответа

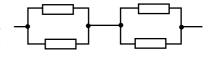
**Тест 6.** Четыре одинаковых сопротивления  $R_1$ соединены, как показано на рисунке. Какое определяет эквивалентное выражение сопротивление такого соединения.  $R_{9KB} =$ 



- **1.**  $R_1$  **2.**  $R_1/2$  **3.**  $R_1/\sqrt{2}$ , **4.**  $\sqrt{2} \cdot R_1$  **5.**  $4 \cdot R_1$

- **6**. 2 ·  $R_1$  **7.**  $R_1/4$  **8.** Нет правильного ответа

Тест 7. Четыре одинаковых сопротивления соединены так, как показано на Эквивалентное сопротивление такого соединения равно  $R_{3\kappa\theta} =$ 



- **1.**  $R_1$  **2. 2.**  $R_1$  **3.**  $4 \cdot R_1$ , **4.**  $\sqrt{2} \cdot R_1$ 
  - **5.**  $R_1/\sqrt{2}$  **6.**  $R_1/2$  **7.**  $R_1/4$

Тест 8. Сопротивление трех параллельно соединенных проводников определяется выражением  $R_{_{\mathcal{H}\mathcal{B}}}=$ 

$$1. = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

1. 
$$=\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$
 2.  $=\frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 + R_3 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3}$ 

$$3. \qquad = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

**4.** 
$$= R_1 + R_2 + R_3$$

5. Все формулы неправильные

Тест 9. По проводнику переменного сечения протекает электрический ток. Принять, что выполняется неравенство для сечений  $S_1 \! > \! S_2$  . Из показанных ниже выбрать, какие соотношения выполняются одновременно для токов Iи плотностей токов ј

1. 
$$I_1 > I_2$$
,  $j_1 > j_2$ ;

**2**. 
$$I_1 = I_2$$
,  $j_1 > j_2$ ;

**3**. 
$$I_1 > I_2$$
,  $j_1 = j_2$ ;

**3.** 
$$I_1 > I_2$$
,  $j_1 = j_2$ ; **4.**  $I_1 = I_2$ ,  $j_1 < j_2$ ; **5.**  $I_1 = I_2$ ,  $j_1 = j_2$ ;

**5**. 
$$I_1 = I_2$$
,  $j_1 = j_2$ 

6. Правильной комбинации нет.

Тест 10. Сопротивление металлического провода известной длины и диаметра определяет выражение

1. 
$$\frac{l}{s} \cdot \rho$$

2. 
$$\rho \cdot \frac{S}{I}$$

1. 
$$\frac{l}{S} \cdot \rho$$
 2.  $\rho \cdot \frac{S}{l}$  3.  $\rho \cdot \frac{4l}{\pi \cdot d^2}$  4.  $\frac{l^2}{S} \cdot \rho$ 

4. 
$$\frac{l^2}{S} \cdot \rho$$

5. 
$$2\pi \cdot d \cdot \frac{l}{S} \rho$$

**5.**  $2\pi \cdot d \cdot \frac{l}{S} \rho$  **6**. Правильного выражения нет

7. Правильными являются ответы...

### Магнитные явления

### Основные понятия магнитного поля

**Тест 1.** Поток вектора магнитной индукции  $\Phi$  определяется выражением

$$\mathbf{1.} = B \cdot S \cdot \sin \alpha \qquad \mathbf{2.} = B \cdot I \cdot \cos \alpha \qquad \mathbf{3.} = I \cdot S \cdot \cos \alpha$$

$$2 = B \cdot I \cdot \cos \alpha$$

$$3 = I \cdot S \cdot \cos \alpha$$

$$\mathbf{4.} = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$

**4.** =  $B \cdot S \cdot \cos \alpha$  **5**. Нет правильного ответа

**Тест 2.** Проводник с током I, имеет форму окружности радиусом R и находится в магнитном поле с индукцией  $B_1$ . Если **индукцию** поля увеличить вдвое, поток  $\Phi$ , который пронизывает контур

- **1.** возрастает в 2 раза, **2.** уменьшится в 2 раза, **3.** возрастает в 4 раза,

- **4.** уменьшится в 4 раза, **5.** возрастает в  $\sqrt{2}$  раз,
  - **6.** уменьшится в  $\sqrt{2}$  раз 7. Нет правильного ответа

**Тест 3.** Проводник с током I, имеет форму окружности радиусом R и находится в магнитном поле с индукцией  $B_1$ . Если радиус окружности увеличить вдвое, поток  $\Phi$ , который пронизывает контур

- **1.** возрастет в 2 раза, **2.** уменьшится в 2 раза, **3.** возрастет в 4 раза,
- **4.** уменьшится в 4 раза, **5.** возрастет в  $\sqrt{2}$  раз, **6.** уменьшится в  $\sqrt{2}$  раз

**Тест 4.** Проводник с током I, имеет форму окружности радиусом R. Если радиус окружности увеличить вдвое, собственный магнитный момент контура

- 1. возрастет в 2 раза, 2. уменьшится в 2 раза, 3. возрастет в 4 раза,

- **4.** уменьшится в 4 раза, **5.** возрастет в  $\sqrt{2}$  раз, **6.** уменьшится в  $\sqrt{2}$  раз

**Тест 6.** Прямой проводник с током I создает в точке, находящейся от проводника на расстоянии 10 см, магнитное поле с индукцией B. Если сместиться вдоль проводника на расстояние 20 см, индукция поля

**1.** возрастет в 2 раза, **2.** уменьшится в 2 раза, **3.** возрастет в 4 раза,

- 4. уменьшится в 4 раза, 5. Не изменится по величине
- 6. Не изменится и по величине, и по направлению

**Тест 7.** По бесконечно длинному прямому проводнику протекает электрический ток. Если **силу тока** увеличить вдвое, напряженность магнитного поля в заданной точке

- **1.** возрастет в 2 раза, **2.** уменьшится в 2 раза,
- **3.** возрастет в 4 раза **4.** уменьшится в 4 раза **5.** не изменится

Тест 8. Характерными свойствами ферромагнетика являются...

- **1.**  $\mu$  порядка тысяч и всегда является неизменной величиной
- **2.**  $\mu$  порядка 1 и возрастает при протекании тока в ферромагнетике
- **3.**  $\mu$  зависит от напряженности внешнего магнитного поля и может достигать значений порядка нескольких тысяч.
- **4.** существует остаточная намагниченность, потому что  $\mu$  является постоянной величиной
- 5. ни одно из утверждений не является правильным.

**Тест 9.** Если по катушке протекает постоянный ток, в ней возникает магнитное поле с такими свойствами. Оно...

- 1. однородное,  $B = \mu \cdot \mu_o L \cdot I$ ; 2. однородное,  $B = \mu \cdot \mu_o n \cdot I$
- **3**. неоднородное,  $B = \mu \cdot \mu_o \ L \cdot I^2$ ; **4.** неоднородное,  $B = \mu \cdot \mu_o \cdot \Phi \cdot S$ 
  - 5. Все предложенные утверждения содержат ошибку

### Магнитное взаимодействие

**Тест 1.** Электрон влетает в магнитное поле перпендикулярно линиям индукции и движется по окружности под действием силы Лоренца. После полных 5 оборотов электрона магнитное поле совершило работу

**1.** 
$$(q \cdot \upsilon \cdot B) \cdot 5 \cdot 2\pi$$
 **2.**  $5(\frac{m\upsilon^2}{2})$  **3.**  $0$  **4.**  $q \cdot \upsilon \cdot B \cdot (2\pi/5)$ 

**Тест 2.** Электрон, ускоренный электрическим полем с напряжением U, влетает в магнитное поле и движется по круговой траектории радиусом  $R_1$ . Если напряжение увеличить вдвое, радиус его орбиты  $R_2$  будет удовлетворять соотношению

1. 
$$R_2 = 2 R_1$$

**2.** 
$$R_2 = 4 R_1$$

**1.** 
$$R_2 = 2 R_1$$
, **2.**  $R_2 = 4 R_1$ , **3.**  $R_2 = R_1/2$ ,

**4.** 
$$R_2 = R_1/4$$
.

$$S. R_2 = \sqrt{2} \cdot R_1$$

**4.** 
$$R_2 = R_1 / 4$$
, **5.**  $R_2 = \sqrt{2} \cdot R_1$  **6.**  $R_1 = \sqrt{2} \cdot R_2$ 

**Тест 3.** К катушке длиной L с активным сопротивлением Rприкладывается разность потенциалов U. По катушке электрический ток І. В катушке сосредоточена магнитная энергия

**1.** 
$$E = L \cdot \frac{dR}{dt}$$

**1.** 
$$E = L \cdot \frac{dR}{dt}$$
 **2.**  $E = \frac{L \cdot I^2}{2}$  **3.**  $E = 2L/I^2$ 

**3.** 
$$E = 2L/I^2$$

**4.** 
$$E = L \cdot U^2 / 2$$
 **5.**  $I^2 \cdot R$ 

5. 
$$I^2 \cdot R$$

6. нет правильного выражения

Тест 4. Сила тока, который протекает в катушке, возрастает вдвое. Энергия магнитного поля, сосредоточенного в катушке

- 1. возрастает в 2 раза, 2. уменьшится в 2 раза, 3. возрастает в 4 раза,

  - **4.** уменьшится в 4 раза, **5.** возрастает в  $\sqrt{2}$  раз,

    - **6.** vменьшится в  $\sqrt{2}$  раз **7**. Нет правильного ответа

**Тест 5.** Вдоль оси катушки длиной l проходит проводник, по которому проходит ток  $I_1$ . В катушке протекает ток  $I_2$ . Если одновременно увеличить в 2 раза токи  $I_1$  и  $I_2$ , то сила Ампера

- **1.** возрастает в 2 раза, **2.** уменьшится в 2 раза, **3.** возрастает в 4 раза,

- 4. уменьшится в 4 раза, 5. не изменится и останется равной нулю

**Тест 6.** В катушке проходит ток  $I_1$  . За время  $\Delta t$  ток убывает до нуля и генерируется ЭДС самоиндукции. Если одновременно увеличить в 2 раза токи  $I_1$  и время  $\Delta t$ , то величина ЭДС самоиндукции

- **1.** возрастает в 2 раза, **2.** уменьшится в 2 раза, **3.** возрастает в 4 раза,
- 4. уменьшится в 4 раза, 5. не изменится

# Справочные материалы

# Греческие буквы, которые часто используются

α	альфа	Н	эта	π	Пи	Ω	Омега
В	бета	Θ	тэта	ρ	Po	Ψ	Пси
Γ	гамма	Λ	лямбда	σ	сигма	X	Хи
δ,Δ	Дельта	M	МЮ	τ	Tay	Ξ	Кси
Е	Эпсилон	N	ню	φ	Фи	Z	Дзета

# Дециметрические приставки

	ание и ситель	Обозначения и примеры использования			
кило-	$10^{3}$	1 килоджоуль = 1 кДж	3467 Дж = 3,48 кДж		
Мега-	10 <sup>6</sup>	1 Мегаватт =1 МВт	$2,46 \cdot 10^6  \text{BT} = 2,46  \text{MBT}$		
Гига-	10 <sup>9</sup>	1 Гигагерц = 1 ГГц	7840 МГц = 7,840 ГГц		
мили-	10 <sup>-3</sup>	1 милиампер = 1мА	0.038  A = 38  MA		
микро-	10-6	1 микросекунда =1мкс	$4.08 \cdot 10^{-6}$ c = $4.08$ MKC		
нано-	10 <sup>-9</sup>	1 нанофарад = 1нФ	$0,047 \ { m MK}\Phi = 47 \ { m H}\Phi$		
пико-	10 <sup>-12</sup>	1 пикофарад = 1пФ	$0,000006$ мк $\Phi = 6$ п $\Phi$		

## Список рекомендованной литературы

- 1. Курс фізики. За ред. І.Є. Лопатинського. Навчальний підручник. Львів, Бескид Біт, 2002. 376 с.
- Кучерук І.М., Горбачук І.І., Луцик П.П. Загальний курс фізики. Т.1-3.— Київ: Техніка.— 1999.
- 3. Клим М.М., Якібчук П.М. Молекулярна фізика.-Львів, 2003.-543 стр.
- 4. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Лебедев А.К. Справочник по физике для инженеров и студентовВУЗов.- М.: Мир и образование.- 1050 стр.
- 5. Садовий А.І., Лече Ю.Г. Основи фізики з задачами і прикладами їх розв'язання.— Київ: Кондор.- 2003.
- 6. Савельев И.В. Курс общей физики. M.: Наука, 1977 1979, т.1-3.
- 7. Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 1990, 2004, 2009
- 8. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. М.: Высшая школа, 1973, 1981, 1983, 2002

# Содержание

Раздел 2.Електрические явления	3
2.1. Электростатическое взаимодействие	4
2.2. Работа электростатических сил. Энергия	8
электростатического взаимодействия	0
2.3. Электроемкость проводников. Конденсаторы	14
2.4. Постоянный электрический ток	19
2.5. Разветвленные цепи	27
Лабораторная работа № 3.1	31
Лабораторная работа № 3.2	36
Раздел 3. Магнитные явления.	40
3.1. Характеристики магнитного поля	41
3.2. Действие магнитного поля	29
3.3. Закон электромагнитной индукции. Работа магнитных сил .	32
3.4. Переходные процессы	35
Лабораторная работа № 4.1	55
Лабораторная работа № 4.3	59
Примеры тестовых заданий	65
Справочные материалы	75
Список рекомендованной литературы	76

# Розіна О.Ю., Роганков В.Б., Корнієнко Ю.К. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ЯВИЩА

Посібник для самостійної роботи

Підписано до друку 26.05.2015 р. Формат 60×84 1/16. Умовн. друк. арк. **х,х**. Наклад **х** прим. Надруковано видавницький центром ОНАХТ «Технолог». 65039, Одеса, вул. Канатна, 112