

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ  
СООБЩЕНИЯ»**

**Забайкальский институт железнодорожного транспорта –  
филиал федерального государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего профессионального образования  
«Иркутский государственный университет путей сообщения»**

**Кафедра «Безопасность жизнедеятельности  
и инженерная защита окружающей среды»**

**Л. В. Виноградова  
В. М. Никитин**

**ФИЗИКА**

**ЧАСТЬ 3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ**

**Методические указания по выполнению  
контрольной работы № 2**

**Чита  
2014**

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ  
СООБЩЕНИЯ»

Забайкальский институт железнодорожного транспорта –  
филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования  
«Иркутский государственный университет путей сообщения»

Кафедра «Безопасность жизнедеятельности  
и инженерная защита окружающей среды»

Л. В. Виноградова  
В. М. Никитин

ФИЗИКА

ЧАСТЬ 3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Методические указания по выполнению контрольной работы № 2  
для студентов 2 курса заочной формы обучения  
специальности 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов»

Чита  
2014

УДК 53.01/53.0  
ББК В.3  
В 49

*Рецензент:*

зав. кафедрой «Электроснабжение железных дорог»  
Забайкальского института железнодорожного транспорта,  
канд. техн. наук, доцент  
*С. А. Филиппов*

**Виноградова Л. В., Никитин В. М.**

**В 49** Физика. Часть 3. Электричество и магнетизм: методические указания по выполнению контрольной работы № 2 для студентов 2 курса заочной формы обучения специальности 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов». – 2-изд., стер. – Чита: ЗаБИЖТ, 2014. – 40 с.

Методические указания содержат рабочую программу (вопросы для подготовки к зачету по физике), основные формулы по изучаемым разделам, а также восемь задач контрольной работы № 2 и примеры выполнения данных задач.

© Забайкальский институт железнодорожного транспорта (ЗаБИЖТ), 2014

План переиздания 2014 г.

Виноградова Людмила Владимировна, Никитин Владимир Михайлович  
ФИЗИКА

Часть 3. Электричество и магнетизм: методические указания по выполнению контрольной работы № 2 для студентов 2 курса заочной формы обучения специальности 23.05.05 «Системы обеспечения движения поездов»

\* \* \*

Редактор Е. А. Лоткова

Подписано в печать 13.11.2014 г. П. Бумага тип. № 2.  
Формат 60x84/16. Печ. л. 2,38. Тираж 250. Цена 77 руб.

\* \* \*

672040, г. Чита, ул. Магистральная, д. 11, ЗаБИЖТ

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ.....	6
2. РАБОЧАЯ ПРОГРАММА.....	6
2.1. Электростатика.....	6
2.2. Постоянный электрический ток.....	7
2.3. Электромагнетизм.....	7
2.4. Электромагнитные колебания и волны.....	8
3. ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ.....	9
3.1. Электростатика.....	9
3.2. Постоянный электрический ток.....	12
3.3. Электромагнетизм.....	15
3.4. Электромагнитные колебания и волны.....	18
4. ЗАДАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ № 2.....	19
4.1. Задача № 1. Основные законы электростатики.....	19
4.2. Задача № 2. Напряженность электростатического поля.....	22
4.3. Задача № 3. Разность потенциалов электростатического поля.....	25
4.4. Задача № 4. Законы постоянного тока.....	28
4.5. Задача № 5. Магнитное поле.....	30
4.6. Задача № 6. Действие магнитного поля на контур с током.....	33
4.7. Задача № 7. Движение заряженной частицы в магнитном поле.....	35
4.8. Задача № 8. Явление электромагнитной индукции.....	37
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	40

## ВВЕДЕНИЕ

Физика – наука о природе: о строении, свойствах и взаимодействии составляющих ее материальных тел и полей. Главная цель этой науки – выявить и объяснить законы природы, которые определяют все физические явления. Физика основывается на экспериментально установленных фактах. Занимая центральное место среди других наук в объяснении законов природы, она имеет первостепенное значение в формировании современной физической картины мира.

Основными задачами курса физики в вузах являются:

- создание основ теоретической подготовки в области физики, позволяющей будущим инженерам ориентироваться в потоке научной и технической информации и обеспечивающей возможность использования новых физических принципов в тех областях техники, в которых они специализируются;

- формирование научного мышления, в частности, правильного понимания границ применимости различных физических понятий, законов, теорий оценивать степень достоверности результатов, полученных с помощью экспериментальных или математических методов исследования;

- усвоение основных физических явлений и законов классической и современной физики, методов физического исследования;

- выработка приемов и навыков решения конкретных задач из разных областей физики, помогающих в дальнейшем решать инженерные задачи;

- ознакомление с современной научной аппаратурой и электронно-вычислительной техникой, формирование у студентов начальных навыков экспериментальных исследований различных физических явлений с применением ЭВМ и оценки погрешности измерений.

Основной формой обучения студента-заочника является самостоятельная работа над учебным материалом. Для облегчения этой работы кафедра «Безопасность жизнедеятельности и инженерная защита окружающей среды» вуза организует чтение лекций, практические занятия, лабораторные работы и консультации. Поэтому процесс изучения физики состоит из следующих этапов:

1. Проработка установочных и обзорных лекций.
2. Самостоятельная работа над учебниками и учебными пособиями.
3. Выполнение контрольных работ в письменном виде.
4. Защита контрольных работ с помощью тестирования в интерактивном виде (во время экзаменационной сессии на ПЭВМ).
5. Прохождение лабораторного практикума.
6. Подготовка к сдаче зачетов и экзаменов.

При самостоятельной работе над учебным материалом необходимо:

- составлять конспект, в котором записываются законы и формулы, выражающие эти законы, определения основных физических понятий и сущность физических явлений и методов исследования;

- изучать курс физики систематически, иначе материал будет усвоен поверхностно;

- пользоваться каким-то одним учебником или учебным пособием, чтобы не утрачивалась логическая связь между отдельными вопросами.

Контрольные работы позволяют закрепить теоретический материал курса. Решение задач является проверкой степени усвоения студентом теоретического курса, а рецензии на работу позволяют дорабатывать и правильно осваивать различные разделы курса физики. Перед выполнением контрольной работы необходимо ознакомиться с приемами решения задач, уравнениями и формулами, а также со справочными материалами, приведенными в конце методических указаний. Прежде чем приступить к решению той или иной задачи, необходимо хорошо понять ее содержание и поставленные вопросы.

В данном методическом указании предлагается контрольная работа, состоящая из восьми типовых задач. *Вариант задания определяется в соответствии с последней цифрой Вашего шифра.* Работа оформляется в письменном виде. Контрольная работа считается зачтенной после ее защиты методом тестирования на ПЭВМ.

На зачете в первую очередь выясняется усвоение основных теоретических положений рабочей программы, представленной в данных методических рекомендациях (вопросы, перечисленные в программе, являются вопросами к зачету), и умение творчески применить полученные знания к решению практических задач. Физическая сущность явлений, законов, процессов должны излагаться четко и достаточно подробно. Только при выполнении этих условий знания по курсу физики могут быть признаны удовлетворительными.

## 1. ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Контрольная работа выполняется в отдельной тетради в клеточку.
  2. На титульном листе необходимо указать номер контрольной работы, наименование дисциплины, фамилию и инициалы студента, шифр.
  3. Работу следует выполнять аккуратно, оставляя поля для замечаний рецензента.
  4. Текст задачи необходимо переписывать полностью.
  5. Заданные физические величины выписывать отдельно, при этом все числовые величины должны быть переведены в одну систему единиц, то есть необходимо составить краткую запись условия задачи («дано»).
  6. Для пояснения решения задачи там, где это необходимо, аккуратно выполнить чертеж.
  7. Решение задачи и используемые формулы должны сопровождаться пояснениями. В комментариях необходимо указывать те основные законы и формулы, на которых базируется решение данной задачи.
  8. В решении задачи делается вывод необходимых расчетных формул.
  9. Задачу рекомендуется решить сначала в общем виде, то есть только в буквенных обозначениях, поясняя при этом эти обозначения.
  10. Вычисления следует проводить с помощью подстановки в формулы заданных числовых величин.
  11. Проверить единицы полученных величин по расчетной формуле и тем самым подтвердить ее правильность.
  12. Константы и другие справочные данные брать из таблиц и записывать названия этих данных.
- Контрольные работы, оформленные без соблюдения указанных правил, а также работы, выполненные не по своему варианту и не защищенные посредством тестов на ПЭВМ, не зачитываются.*

## 2. РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

### 2.1. Электростатика

1. Электрический заряд и его свойства. Закон Кулона. Закон сохранения электрического заряда.
2. Электрическое поле. Основные характеристики электростатического поля – напряженность и потенциал.
3. Напряженность как градиент потенциала. Расчет электростатических полей методом суперпозиций.



4. Поток вектора напряженности. Теорема Остроградского – Гаусса для электрического поля в вакууме. Применение теоремы Остроградского – Гаусса к расчету поля.

5. Электрическое поле в веществе. Свободные и связанные заряды в диэлектриках. Типы диэлектриков. Электронная и ориентационная поляризация. Поляризованность.

6. Диэлектрическая восприимчивость вещества. Электрическое смещение. Диэлектрическая проницаемость среды.

7. Вычисление напряженности поля в диэлектрике. Сегнетоэлектрики.

8. Проводники в электрическом поле. Поле внутри проводника и у его поверхности. Распределение зарядов в проводнике.

9. Емкость уединенного проводника. Взаимная емкость двух проводников. Конденсаторы.

10. Энергия заряженных проводника, конденсатора и системы проводников. Энергия электростатического поля. Объемная плотность энергии.

## **2.2. Постоянный электрический ток**

1. Электрический ток и его виды.

2. Постоянный электрический ток, его характеристики и условия существования.

3. Классическая электронная теория электропроводности металлов и ее опытное обоснование.

4. Вывод закона Ома в дифференциальной форме из электронных представлений. Закон Видемана – Франца. Закон Ома в интегральной форме.

5. Разность потенциалов, электродвижущая сила, напряжение.

6. Затруднения классической теории электропроводности металлов. Границы применения закона Ома.

7. Ток в газах. Плазма. Работа выхода электронов из металла. Термоэлектронная эмиссия.

8. Правила Кирхгофа.

## **2.3. Электромагнетизм**

1. Магнитное поле и его основные характеристики.

2. Магнитная индукция. Закон Ампера.

3. Магнитное поле тока. Закон Био-Савара-Лапласа и его применение к расчету магнитного поля.

4. Магнитное поле прямолинейного проводника с током. Магнитное поле кругового тока.

5. Магнитный момент. Магнитный момент витка с током.

6. Вихревой характер магнитного поля.

7. Закон полного тока (циркуляция вектора магнитной индукции) для магнитного поля в вакууме и его применение к расчету магнитного поля тороида и длинного соленоида.

8. Действие магнитного поля на движущийся заряд. Сила Лоренца.

9. Движение заряженных частиц в магнитном поле. Принцип действия циклических ускорителей заряженных частиц в магнитном поле.

10. Эффект Холла. МГД-генератор. Контур с током в магнитном поле.

11. Магнитный поток. Теорема Остроградского – Гаусса.

12. Работа перемещения проводника и контура с током в магнитном поле.

13. Явление электромагнитной индукции (опыты Фарадея). Правило Ленца.

14. Закон электромагнитной индукции и его вывод из закона сохранения энергии.

15. Явление самоиндукции. Индуктивность. Токи при замыкании и размыкании цепи.

16. Явление взаимной индукции. Взаимная индуктивность.

17. Энергия системы проводников с током. Объемная плотность энергии магнитного поля.

18. Магнитное поле в веществе. Магнитные моменты атомов. Типы магнетиков. Намагниченность. Микро- и макротоки.

19. Элементарная теория диа- и парамагнетизма.

20. Магнитная восприимчивость вещества и ее зависимость от температуры.

21. Закон полного тока для магнитного поля в веществе. Напряженность магнитного поля. Магнитная проницаемость среды.

22. Ферромагнетики. Опыт Столетова. Кривая намагничивания. Магнитный гистерезис. Точка Кюри. Домены. Спиновая природа ферромагнетизма.

23. Основы теории Максвелла для электромагнитного поля. Ток смещения. Уравнения Максвелла для электрического поля в интегральной форме.

#### **2.4. Электромагнитные колебания и волны**

1. Колебательные процессы и их виды.

2. Гармонические электромагнитные колебания и их характеристики.

3. Дифференциальное уравнение электромагнитных колебаний.

4. Электрический колебательный контур. Энергия электромагнитных колебаний.

5. Дифференциальное уравнение электромагнитных колебаний и его решение.

6. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний и его решение.

7. Амплитуда и фаза вынужденных колебаний. Случай резонанса.
8. Электромагнитные волны. Дифференциальное уравнение электромагнитной волны.
9. Основные свойства электромагнитных волн. Монохроматическая волна.
10. Энергия электромагнитных волн. Поток энергии. Вектор Умова – Пойнтинга. Излучение диполя.
11. Сложение гармонических колебаний одного направления и одинаковой частоты. Биения.
12. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний. Фигуры Лиссажу.

### 3. ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ

#### 3.1. Электростатика

Закон Кулона:

$$F = k \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{\varepsilon r^2}, \quad (3.1)$$

где  $F$  – сила взаимодействия точечных зарядов  $Q_1$  и  $Q_2$ ;

$r$  – расстояние между зарядами;

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;

$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$  – коэффициент пропорциональности;

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

Закон сохранения электрического заряда:

$$\sum_{i=1}^n Q_i = \text{const}, \quad (3.2)$$

где  $\sum_{i=1}^n Q_i$  – алгебраическая сумма зарядов, входящих в электрически

изолированную систему;

$n$  – число зарядов.

Напряженность электрического поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}, \quad (3.3)$$

где  $\vec{F}$  – сила, действующая на точечный положительный заряд  $Q$ , помещенный в данную точку поля.

Сила, действующая на точечный заряд  $Q$ , помещенный в электрическое поле:

$$\vec{F} = \vec{E}Q. \quad (3.4)$$

Поток вектора напряженности электрического поля через произвольную поверхность  $S$ , помещенную в неоднородное поле:

$$\Phi = \int_S E \cdot \cos\alpha \cdot dS, \quad (3.5)$$

где  $\alpha$  – угол между вектором напряженности и нормалью к элементу поверхности;

$dS$  – площадь элемента поверхности.

Поток вектора напряженности электрического поля через плоскую поверхность, помещенную в однородное электрическое поле:

$$\Phi = ESCos\alpha. \quad (3.6)$$

Теорема Остроградского – Гаусса: поток вектора напряженности  $\vec{E}$  через любую замкнутую поверхность равен сумме зарядов  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ , охватываемых этой поверхностью и умноженных на  $\frac{1}{\epsilon\epsilon_0}$ :

$$\Phi = \frac{1}{\epsilon\epsilon_0} \sum_{i=1}^n Q_i. \quad (3.7)$$

Напряженность электрического поля:

- созданного точечным зарядом  $Q$  на расстоянии  $r$  от заряда:

$$E = k \frac{|Q|}{\epsilon r^2}; \quad (3.8)$$

- созданного бесконечно длинной равномерно заряженной нитью (или цилиндром) на расстоянии  $r$  от ее оси:

$$E = k \frac{2\tau}{\epsilon r}, \quad (3.9)$$

где  $\tau = \Delta Q / \Delta l$  – линейная плотность заряда;

- созданного бесконечной равномерно заряженной плоскостью:

$$E = \frac{1}{2} \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}, \quad (3.10)$$

где  $\sigma = \Delta Q / \Delta S$  – поверхностная плотность заряда;

- созданного двумя параллельными бесконечными равномерно и разноименно заряженными плоскостями с одинаковой по модулю поверхностной плотностью  $\sigma$  заряда (поле плоского конденсатора):

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0}. \quad (3.11)$$

Вектор электрического смещения прямо пропорционально связан с вектором напряженности электрического поля:

$$\vec{D} = \varepsilon_0\varepsilon\vec{E}. \quad (3.12)$$

Потенциал электростатического поля:

$$\varphi = \frac{W}{Q} = k \frac{Q}{\varepsilon r}, \quad (3.13)$$

где  $W$  – потенциальная энергия точечного положительного заряда  $Q$ , находящегося в данной точке поля (при условии, что потенциальная энергия заряда, удаленного в бесконечность, равна нулю).

Взаимосвязь потенциала с напряженностью электрического поля:

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi; \quad E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}, \quad (3.14)$$

где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – потенциалы точек двух эквипотенциальных поверхностей;

$d$  – расстояние между этими поверхностями вдоль электрической силовой линии;

$\text{grad}\varphi$  – градиент потенциала, т. е. производная от потенциала по направлению смещения.

Работа, совершаемая электрическим полем при перемещении точечного заряда  $Q$  из одной точки поля, имеющей потенциал  $\varphi_1$  в другую, имеющую потенциал  $\varphi_2$ :

$$A = Q(\varphi_1 - \varphi_2) \quad \text{или} \quad A = Q \int_L E_l dl, \quad (3.15)$$

где  $E_l$  – проекция вектора напряженности электрического поля на направление перемещения;

$dl$  – перемещение.

Работа в случае однородного электрического поля:

$$A = QE l \cos\alpha, \quad (3.16)$$

где  $l$  – перемещение;

$\alpha$  – угол между направлением вектора напряженности электрического поля и перемещением.

Теорема о циркуляции вектора напряженности электрического поля: циркуляция вектора напряженности электростатического поля всегда равна нулю:

$$\oint_l E_l dl = 0. \quad (3.17)$$

Электрическая емкость уединенного проводника:

$$C = \frac{Q}{\varphi}. \quad (3.18)$$

Емкость конденсатора:

$$C = \frac{Q}{\varphi_1 - \varphi_2}, \quad (3.19)$$

где  $\varphi_1 - \varphi_2$  – разность потенциалов на обкладках конденсатора.

Емкость:

- плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}, \quad (3.20)$$

где  $S$  – площадь пластин (каждой пластины);

$d$  – расстояние между пластинами;

- уединенной проводящей сферы:

$$C = 4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R, \quad (3.21)$$

где  $R$  – радиус сферы.

Энергия заряженного проводника:

$$W = \frac{C\varphi^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{q\varphi}{2}. \quad (3.22)$$

Энергия заряженного конденсатора:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2}. \quad (3.23)$$

### 3.2. Постоянный электрический ток

Сила постоянного тока:

$$I = \frac{q}{t}, \quad (3.24)$$

где  $q$  – заряд, протекающий через поперечное сечение проводника за время  $t$ .

Плотность электрического тока:

$$j = \frac{I}{S}, \quad (3.25)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения проводника пластин (каждой пластины).

Сопротивление однородного проводника с током:

$$R = \rho \frac{L}{S}, \quad (3.26)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление вещества проводника;

$L$  – длина проводника.

Сопротивления соединенных проводников:

- последовательного:

$$R = \sum_{i=1}^n R_i; \quad (3.27)$$

- параллельного:

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}, \quad (3.28)$$

где  $R_i$  – сопротивление  $i$ -го элемента;

$n$  – число проводников.

Закон Ома:

- для однородного участка цепи:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}; \quad (3.29)$$

- для неоднородного участка цепи:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) \pm \varepsilon_{12}}{R}; \quad (3.30)$$

- для замкнутой цепи:

$$I = \frac{\varepsilon}{R+r}; \quad (3.31)$$

- в интегральной форме:

$$j = \sigma E, \quad (3.32)$$

где  $\varphi_1 - \varphi_2$  – разность потенциалов на концах участка цепи;

$\varepsilon_{12}$  – ЭДС источников тока, входящих в участок;

$U$  – напряжение на участке цепи;

$r$  – сопротивление источников тока;

$R$  – сопротивление элементов внешней цепи;

$j$  – плотность электрического тока;

$\sigma$  – удельная проводимость проводника;

$E$  – напряженность электрического поля.

Правила Кирхгофа:

- первое правило: алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле равна нулю, т. е.

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0, \quad (3.33)$$

где  $n$  – число токов, сходящихся в узле;

- второе правило: в замкнутом контуре алгебраическая сумма напряжений на всех участках контура равна алгебраической сумме ЭДС, т. е.

$$\sum_{i=1}^n I_i R_i = \sum_{j=1}^k \varepsilon_j, \quad (3.34)$$

где  $I_i$  – сила тока на  $i$ -м участке;

$R_i$  – активное сопротивление на  $i$ -м участке;

$\varepsilon_j$  – ЭДС источников тока на  $j$ -м участке;

$n$  – число участков, содержащих активные сопротивления;

$k$  – число участков, содержащих источники тока.

Работа, совершаемая электростатическим полем и сторонними силами в участке цепи постоянного тока за время  $t$ :

$$A = IUt. \quad (3.35)$$



Мощность тока:

$$P = IU . \quad (3.36)$$

Закон Джоуля – Ленца для определения количества теплоты, выделившегося в проводнике за время  $t$ :

$$Q = I^2 R t . \quad (3.37)$$

Законы электролиза Фарадея:

- первый закон:

$$m = kq , \quad (3.38)$$

где  $m$  – масса вещества, выделившегося на электроде при прохождении через электролит заряда  $q$ ;

$k$  – электрохимический эквивалент вещества;

- второй закон:

$$k = \frac{\mu}{FZ} , \quad (3.39)$$

где  $\mu$  – молярная масса ионов данного вещества;

$F = 96,5$  кКл/моль – постоянная Фарадея;

$Z$  – валентность ионов.

### 3.3. Электромагнетизм

Связь магнитной индукции с напряженностью магнитного поля:

$$B = \mu\mu_0 H , \quad (3.40)$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость изотропной среды;

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

Закон Био-Савара-Лапласа:

$$dB = \frac{\mu\mu_0 I \cdot \sin\alpha}{4\pi r^2} dl , \quad (3.41)$$

где  $dB$  – магнитная индукция поля, создаваемая элементом проводника  $dl$  с током  $I$ ;

$\alpha$  – угол между радиус-вектором и направлением тока в элементе проводника.

Магнитная индукция, создаваемая отрезком проводника с током (рис. 3.1):

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2). \quad (3.42)$$

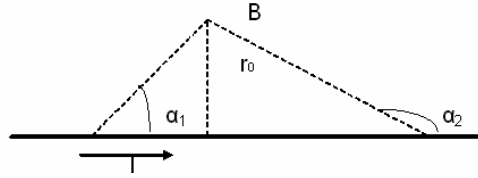


Рис. 3.1. Магнитная индукция, создаваемая отрезком проводника с током

Обозначения формулы 3.42 видны на рис. 3.1. Направление вектора магнитной индукции обозначено точкой (значит, вектор индукции направлен перпендикулярно плоскости чертежа к нам).

Магнитная индукция в центре кругового тока:

$$B = \frac{\mu\mu_0 I}{2R}, \quad (3.43)$$

где  $R$  – радиус кругового витка.

Магнитная индукция на оси кругового тока:

$$B = \frac{\mu\mu_0 R^2 I}{2\sqrt{(R^2 + h^2)^3}}, \quad (3.44)$$

где  $h$  – расстояние от центра витка до точки, в которой определяется магнитная индукция.

Магнитная индукция поля соленоида:

$$B = \mu\mu_0 n I, \quad (3.45)$$

где  $n$  – отношение числа витков соленоида к его длине.

Закон Ампера (сила, действующая на проводник с током в однородном магнитном поле):

$$F = IBL \sin\alpha, \quad (3.46)$$

где  $L$  – длина проводника;

$\alpha$  – угол между направлением тока в проводнике и вектором магнитной индукции.

Сила взаимодействия параллельных проводов с током  $I$ :

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi r}, \quad (3.47)$$

где  $r$  – расстояние между проводами.

Магнитный момент плоского контура с током:

$$p_m = IS, \quad (3.48)$$

где  $I$  – сила тока, протекающего по контуру;

$S$  – вектор площади контура, направленный перпендикулярно плоскости контура так, что с его конца виден обход контура (направление тока и т. д.) по часовой стрелке.

Сила Лоренца (сила, действующая на заряд, движущийся со скоростью  $v$  в однородном магнитном поле):

$$F = qvB\sin\alpha, \quad (3.49)$$

где  $\alpha$  – угол между вектором скорости движущейся частицы и вектором магнитной индукции.

Закон полного тока:

- для магнитного поля в вакууме:

$$\oint_L B_l dl = \mu_0 \sum_{i=1}^n I_i, \quad (3.50)$$

где  $\sum_{i=1}^n I_i$  – алгебраическая сумма токов, охватываемых контуром;

$n$  – число токов;

- для произвольной среды:

$$\oint_L H_l dl = \sum_{i=1}^n I_i. \quad (3.51)$$

Магнитный поток  $\Phi$  через плоский контур площадью  $S$ :

- в случае однородного поля:

$$\Phi = BS \cdot \cos\alpha, \quad (3.52)$$

где  $\alpha$  – угол между нормалью к плоскости контура и вектором магнитной индукции;

- в случае неоднородного поля:

$$\Phi = \int_s BS \cdot \cos\alpha . \quad (3.53)$$

Потокоцепление, т. е. полный магнитный поток, сцепленный со всеми витками соленоида или тороида:

$$\psi = N\Phi , \quad (3.54)$$

где  $N$  – число витков соленоида или тороида.

Работа сил магнитного поля, совершаемая при перемещении контура с током в магнитном поле:

$$A = I\Delta\Phi . \quad (3.55)$$

Закон Фарадея – Ленца (основной закон электромагнитной индукции):

$$\varepsilon_i = -N \frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\psi}{dt} . \quad (3.56)$$

Разность потенциалов  $U$  на концах проводника длиной  $l$ , движущегося со скоростью  $v$  в однородном магнитном поле:

$$U = Blv \sin\alpha , \quad (3.57)$$

где  $\alpha$  – угол между направлением вектора скорости и магнитной индукции.

ЭДС индукции, возникающая в рамке, содержащей  $N$  витков, площадью  $S$ , при вращении рамки с угловой скоростью  $\omega$  в однородном магнитном поле с индукцией  $B$ :

$$\varepsilon_i = BNS\omega \sin\omega t . \quad (3.58)$$

Энергия магнитного поля, создаваемого током в замкнутом контуре индуктивностью  $L$ :

$$W = \frac{LI^2}{2} . \quad (3.59)$$

### 3.4. Электромагнитные колебания и волны

Формула Томпсона (период собственных колебаний в контуре без активного сопротивления):

$$T = 2\pi\sqrt{LC} , \quad (3.60)$$

где  $L$  – индуктивность катушки;

$C$  – емкость конденсатора.

Скорость электромагнитных волн в среде:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon\mu}}. \quad (3.61)$$

## 4. ЗАДАНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ № 2

### 4.1. Задача № 1. Основные законы электростатики

Три точечных заряда  $q_0$ ,  $q_1$  и  $q_2$  (рис. 4.1) находятся соответственно в точках  $O$ ,  $A$  и  $B$ , которые заданы координатами  $O(0, 0)$ ,  $A(x_1, y_1)$  и  $B(x_2, y_2)$ . Величины, используемые в данной задаче:  $F_0$  – сила, действующая на заряд  $q_0$ ;  $F_1$  – сила, действующая на заряд  $q_1$ ;  $F_2$  – сила, действующая на заряд  $q_2$ ;  $\alpha$  – угол наклона прямой  $OA$  к оси  $Ox$ ;  $\beta$  – угол наклона прямой  $OB$  к оси  $Ox$ ;  $\gamma$  – угол наклона прямой  $BA$  к оси  $Ox$ . Найти неизвестные величины, обозначенные в табл. 4.1 знаком «?».

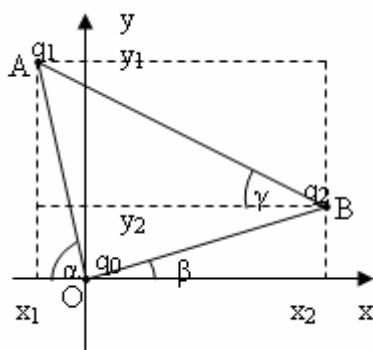


Рис. 4.1. Рисунок к задаче №1

К условию задачи дан условный чертеж расположения зарядов. Выполнить чертеж в соответствии с заданными координатами по вашему варианту. Квадраты координат округлять до целых чисел.

Таблица 4.1

Исходные данные к задаче № 1

№ вар.	$q_0$ , мкКл	$q_1$ , мкКл	$q_2$ , мкКл	$x_1$ , см	$y_1$ , см	$x_2$ , см	$y_2$ , см	$\sin\alpha$	$\sin\beta$	$\sin\gamma$	$\cos\alpha$	$\cos\beta$	$\cos\gamma$	$F_0$ , Н	$F_1$ , Н	$F_2$ , Н
1	+2	+3	-3	-8	4,12	4	-8,06	?	?	?	?	?	?	?	?	?
2	-6	+2	+3	-5	7,48	-3	8,48	?	?	?	?	?	?	?	?	?
3	+2	-3	+3	8	-4,12	2,5	8,65	?	?	?	?	?	?	?	?	?
4	+3	-2	+6	7	5,66	-3,5	8,29	?	?	?	?	?	?	?	?	?
5	-3	+2	-3	-6	6,71	4,5	7,79	?	?	?	?	?	?	?	?	?
6	+6	+3	-2	5	7,48	-5,5	7,12	?	?	?	?	?	?	?	?	?
7	+1	-9	-2	4	-8,06	6,5	6,22	?	?	?	?	?	?	?	?	?

8	-1	+3	+9	-3	8,48	-7,5	4,97	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
9	-2	+3	-6	2	8,77	-8,5	2,96	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
10	-6	+2	-4	5,5	7,12	-1,5	8,87	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?

### Пример решения задачи № 1

**Дано:**

$$q_0 = -1 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$q_1 = -3 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$q_2 = +4 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$x_1 = 3 \text{ см} = 0,03 \text{ м}$$

$$y_1 = 1 \text{ см} = 0,01 \text{ м}$$

$$x_2 = 4 \text{ см} = 0,04 \text{ м}$$

$$y_2 = -5 \text{ см} = -0,05 \text{ м}$$

$$\sin \alpha = ?$$

$$\sin \beta = ?$$

$$\sin \gamma = ?$$

$$\cos \alpha = ?$$

$$\cos \beta = ?$$

$$\cos \gamma = ?$$

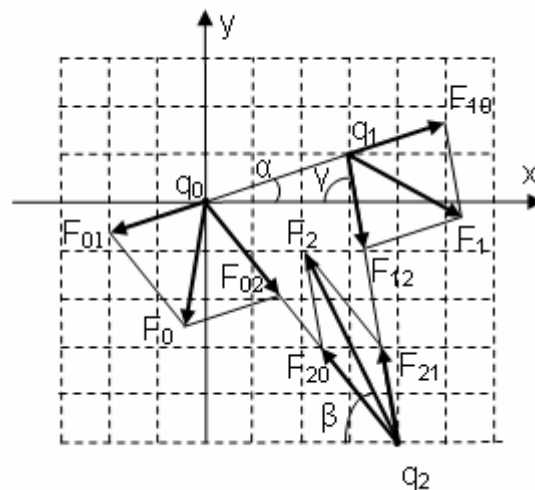
$$F_0 = ?$$

$$F_1 = ?$$

$$F_2 = ?$$

**Решение**

1. Выполним построение чертежа в соответствии с заданными координатами и выбранным масштабом:



2. Определим синусы и косинусы искомых углов из полученных при построении прямоугольных треугольников проекций точек расположения заданных зарядов на координатные оси:

$$\sin \alpha = \frac{|y_1|}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2}}; \quad \sin \alpha = \frac{1}{\sqrt{(-3)^2 + 1^2}} = 0,32;$$

$$\sin \beta = \frac{|y_2|}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2}}; \quad \sin \beta = \frac{5}{\sqrt{4^2 + (-5)^2}} = 0,78;$$

$$\sin \gamma = \frac{|y_2 - y_1|}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}; \quad \sin \gamma = \frac{|-5 - 1|}{\sqrt{1^2 + (-6)^2}} = 0,99.$$

Используем основное тригонометрическое тождество для нахождения косинусов искомых углов:

$$\sin^2\alpha + \cos^2\alpha = 1; \cos\alpha = \sqrt{1 - \sin^2\alpha};$$

$$\cos\alpha = \sqrt{1 - 0,32^2} = 0,95;$$

$$\cos\beta = \sqrt{1 - 0,78^2} = 0,63;$$

$$\cos\gamma = \sqrt{1 - 0,99^2} = 0,14.$$

3. Определим силы, действующие на заряды со стороны двух других, пользуясь законом Кулона:

$$F = k \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{r^2},$$

где  $r$  – расстояние между зарядами;

$k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$  – коэффициент пропорциональности;

$$F_{01} = F_{10} = k \frac{|q_0| \cdot |q_1|}{r_1^2} = k \frac{|q_0| \cdot |q_1|}{x_1^2 + y_1^2};$$

$$F_{01} = F_{10} = 9 \cdot 10^9 \frac{1 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^{-6}}{(-0,03)^2 + 0,01^2} = 27 \text{ (Н)};$$

$$F_{02} = F_{20} = k \frac{|q_0| \cdot |q_2|}{r_2^2} = k \frac{|q_0| \cdot |q_2|}{x_2^2 + y_2^2};$$

$$F_{02} = F_{20} = 9 \cdot 10^9 \frac{1 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^{-6}}{0,04^2 + (-0,05)^2} = 7,35 \text{ (Н)};$$

$$F_{21} = F_{12} = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2};$$

$$F_{12} = F_{21} = 9 \cdot 10^9 \frac{3 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^{-6}}{(0,04 - 0,03)^2 + (-0,05 - 0,01)^2} = 29,2 \text{ (Н)}.$$

Согласно принципу суперпозиций электрических полей  $\vec{F}_0 = \vec{F}_{01} + \vec{F}_{02}$ ;  $\vec{F}_1 = \vec{F}_{10} + \vec{F}_{12}$ ;  $\vec{F}_2 = \vec{F}_{20} + \vec{F}_{21}$ .

Таким образом, силы можно найти, воспользовавшись методом нахождения проекций сил на координатные оси:

- сила, действующая на заряд  $q_0$ :

$$F_{0x} = -F_{01}\cos\alpha + F_{02}\cos\beta; F_{0x} = -27 \cdot 0,95 + 7,35 \cdot 0,63 = -21,02 \text{ (Н)};$$

$$F_{0y} = -F_{01}\sin\alpha - F_{02}\sin\beta; F_{0y} = -27 \cdot 0,32 - 7,35 \cdot 0,78 = -14,37 \text{ (Н)};$$

$$F_0 = \sqrt{F_{0x}^2 + F_{0y}^2}; F_0 = \sqrt{(-21,02)^2 + (-14,37)^2} = 25,46 \text{ (Н)};$$

- сила, действующая на заряд  $q_1$ :

$$F_{1x} = F_{10}\cos\alpha + F_{12}\cos\gamma; F_{1x} = 27 \cdot 0,95 + 29,2 \cdot 0,14 = 29,78 \text{ (Н)};$$

$$F_{1y} = F_{10}\sin\alpha - F_{12}\sin\gamma; F_{1y} = 27 \cdot 0,32 - 29,2 \cdot 0,99 = -20,26 \text{ (Н)};$$

$$F_1 = \sqrt{F_{1x}^2 + F_{1y}^2}; F_1 = \sqrt{29,78^2 + (-20,26)^2} = 36,02 \text{ (Н)};$$

- сила, действующая на заряд  $q_2$ :

$$F_{2x} = -F_{20}\cos\beta - F_{21}\cos\gamma; F_{2x} = -7,35 \cdot 0,63 - 29,2 \cdot 0,14 = -50,39 \text{ (Н)};$$

$$F_{2y} = F_{20}\sin\beta + F_{21}\sin\gamma; F_{2y} = 7,35 \cdot 0,78 + 29,2 \cdot 0,99 = 33,74 \text{ (Н)};$$

$$F_2 = \sqrt{F_{2x}^2 + F_{2y}^2}; F_2 = \sqrt{(-50,39)^2 + 33,74^2} = 60,6 \text{ (Н)}.$$

Ответ:  $\sin\alpha = 0,32$ ;  $\sin\beta = 0,78$ ;  $\sin\gamma = 0,99$ ;  $\cos\alpha = 0,95$ ;  $\cos\beta = 0,63$ ;  $\cos\gamma = 0,14$ ;  $F_0 = 25,46 \text{ Н}$ ;  $F_1 = 36,02 \text{ Н}$ ;  $F_2 = 60,6 \text{ Н}$ .

## 4.2. Задача № 2. Напряженность электростатического поля

Три заряженных тела: бесконечно длинная заряженная плоскость с поверхностной плотностью зарядов  $\sigma_1$ ; заряженная сфера радиусом  $R=1\text{см}$  с зарядом  $q_2$ ; точечный заряд  $q_3$  – образуют общее электростатическое поле (рис. 4.2). Точка О этого поля удалена на расстояние  $r_1$  от заряженной плоскости, на расстояние  $r_2$  от центра заряженной сферы и на расстояние  $r_3$  от точечного заряда. Прямая  $r_3$  образует угол  $\alpha$  с осью  $x$ , а прямая  $r_2$  – угол  $\beta$ .

*Величины, используемые в данной задаче*

- напряженности полей в точке О:  $E_1$  – заряженной плоскости,  $E_2$  – заряженной сферы,  $E_3$  – точечного заряда и  $E_0$  – общего поля;

-  $q_0$  – точечный заряд, который помещаем в точку О;

-  $F$  – сила, действующая на заряд  $q_0$ .

Найти неизвестные величины, обозначенные в табл. 4.2 знаком «?».



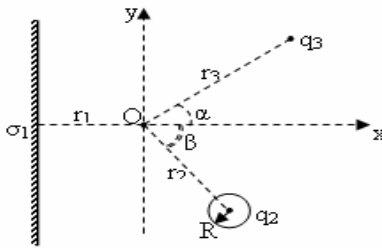


Рис. 4.2. Рисунок к задаче № 2

Таблица 4.2

Исходные данные к задаче № 2

№ вар.	$\sigma_1$ , Кл/м <sup>2</sup>	$q_2$ , мкКл	$q_3$ , мкКл	$q_0$ , мкКл	$r_1$ , см	$r_2$ , см	$r_3$ , см	$\alpha$ , °	$\beta$ , °	$E_1$ , В/м	$E_2$ , В/м	$E_3$ , В/м	$E_{об}$ , В/м	$F$ , Н
1	$10 \cdot 10^{-5}$	2	5	1	5	5	5	30	30	?	?	?	?	?
2	$12 \cdot 10^{-5}$	3	6	2	8	8	8	45	45	?	?	?	?	?
3	$15 \cdot 10^{-5}$	4	7	3	9	9	9	60	60	?	?	?	?	?
4	$18 \cdot 10^{-5}$	4	8	1	12	12	12	45	45	?	?	?	?	?
5	$20 \cdot 10^{-5}$	3	5	2	8	8	8	30	30	?	?	?	?	?
6	$20 \cdot 10^{-5}$	2	6	3	6	6	6	45	45	?	?	?	?	?
7	$18 \cdot 10^{-5}$	2	7	1	7	7	7	60	60	?	?	?	?	?
8	$15 \cdot 10^{-5}$	3	8	2	4	4	4	30	30	?	?	?	?	?
9	$12 \cdot 10^{-5}$	4	5	3	5	5	5	45	45	?	?	?	?	?
10	$10 \cdot 10^{-5}$	2	4	4	6	6	6	60	60	?	?	?	?	?

Пример решения задачи № 2

Дано:

$$\sigma_1 = 12 \cdot 10^{-5} \text{ Кл/м}^2$$

$$q_2 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$q_3 = 7 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$q_0 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$r_1 = 0,05 \text{ м}$$

$$r_2 = 0,05 \text{ м}$$

$$r_3 = 0,05 \text{ м}$$

$$R = 0,01 \text{ м}$$

$$d = 0,2 \text{ м}$$

$$\alpha = \beta = 30^\circ$$

$$E_1 = ?$$

$$E_2 = ?$$

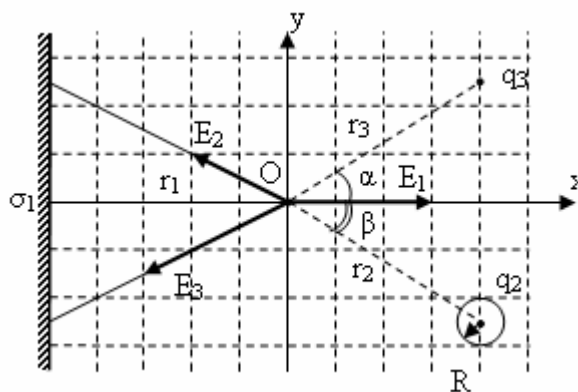
$$E_3 = ?$$

$$E_0 = ?$$

$$F = ?$$

Решение

1. Выполним чертёж:



2. Определим напряженности в точке O:  
- заряженной плоскости:

$$E_1 = \frac{\sigma_1}{2\varepsilon_0},$$

где  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ ;

$$E_1 = \frac{12 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} = 6,78 \cdot 10^6 \text{ (В/м)};$$

- заряженной сферы:

$$E_2 = k \frac{q_2}{r_2^2},$$

где  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$  – коэффициент пропорциональности;

$$E_2 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6}}{0,05^2} = 7,2 \cdot 10^6 \text{ (В/м)};$$

- заряда  $q_3$ :

$$E_3 = k \frac{q_3}{r_3^2}; E_3 = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{7 \cdot 10^{-6}}{0,05^2} = 25,2 \cdot 10^6 \text{ (В/м)};$$

3. Согласно принципу суперпозиций электрических полей общая напряженность  $\vec{E}_0 = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3$ .

Таким образом, общую напряженность можно найти, воспользовавшись методом нахождения проекций напряженностей на координатные оси:

$$E_{0x} = E_1 - E_2 \cos \alpha - E_3 \cos \beta;$$

$$E_{0x} = 6,78 \cdot 10^6 - 7,2 \cdot 10^6 \cdot 0,87 - 25,2 \cdot 10^6 \cdot 0,87 = -21,41 \cdot 10^6 \text{ (В/м)};$$

$$E_{0y} = E_2 \sin \alpha - E_3 \sin \beta;$$

$$E_{0y} = 7,2 \cdot 10^6 \cdot 0,5 - 25,2 \cdot 10^6 \cdot 0,5 = -9 \cdot 10^6 \text{ (В/м)}.$$

Согласно теореме Пифагора

$$E_0 = \sqrt{E_{0x}^2 + E_{0y}^2};$$

$$E_0 = \sqrt{(-21,41 \cdot 10^6)^2 + (-9 \cdot 10^6)^2} = 23,22 \cdot 10^6 \text{ (В/м)}.$$

4. Сила, действующая на заряд  $q_0$ , помещенный в точку O:

$$F = q_0 \cdot E_0; F = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 23,22 \cdot 10^6 = 23,22 \text{ (Н)}.$$

Ответ:  $E_1 = 6,78 \cdot 10^6 \text{ В/м} = 6,78 \text{ МВ/м}$ ;  $E_2 = 7,2 \cdot 10^6 \text{ В/м} = 7,2 \text{ МВ/м}$ ;  
 $E_3 = 25,2 \cdot 10^6 \text{ В/м} = 25,2 \text{ МВ/м}$ ;  $E_0 = 23,22 \cdot 10^6 \text{ В/м} = 23,22 \text{ МВ/м}$ ;  $F = 23,22 \text{ Н}$ .

### 4.3. Задача № 3. Разность потенциалов электростатического поля

Три заряженных тела: бесконечно длинная заряженная плоскость с поверхностной плотностью зарядов  $\sigma_1$ ; заряженная сфера радиусом  $R=1$  см с зарядом  $q_2$ ; точечный заряд  $q_3$  – образуют общее электростатическое поле (рис. 4.3). Точка O этого поля удалена на расстояние  $r_1$  от заряженной плоскости, на расстояние  $r_2$  от центра заряженной сферы и на расстояние  $r_3$  от точечного заряда. Прямая  $r_3$  образует угол  $\alpha$  с осью x, а прямая  $r_2$  – угол  $\beta$ . В этом поле из точки O перемещается точечный заряд  $q_0$  в точку A.

*Величины, используемые в данной задаче*

- разности потенциалов точек A и O полей:  $U_1$  – заряженной плоскости,  $U_2$  – заряженной сферы,  $U_3$  – точечного заряда и  $U_0$  – общего поля;

-  $OA = d$  – длина пути перемещения заряда  $q_0$ ;

-  $A$  – работа перемещения заряда  $q_0$ .

Найти неизвестные величины, обозначенные в табл. 4.3 знаком «?».

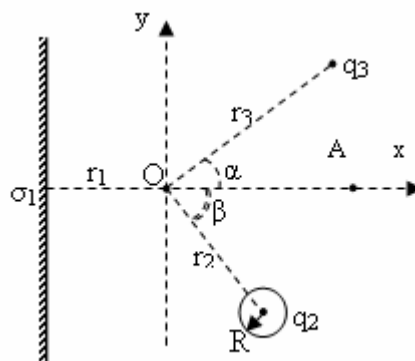


Рис. 4.3. Рисунок к задаче № 3

Таблица 4.3

Исходные данные к задаче № 3

№ вар.	$\sigma_1$ , Кл/м <sup>2</sup>	$q_2$ , мкКл	$q_3$ , мкКл	$q_0$ , мкКл	$r_1$ , см	$r_2$ , см	$r_3$ , см	$\alpha$ , °	$\beta$ , °	$d$ , см	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$U_3$ , В	$U_0$ , В	$A$ , Дж
1	$10 \cdot 10^{-5}$	2	5	1	5	5	5	30	30	10	?	?	?	?	?

2	$12 \cdot 10^{-5}$	3	6	2	8	8	8	45	45	20	?	?	?	?	?
3	$15 \cdot 10^{-5}$	4	7	3	9	9	9	60	60	30	?	?	?	?	?
4	$18 \cdot 10^{-5}$	4	8	1	12	12	12	45	45	15	?	?	?	?	?
5	$20 \cdot 10^{-5}$	3	5	2	8	8	8	30	30	25	?	?	?	?	?
6	$20 \cdot 10^{-5}$	2	6	3	6	6	6	45	45	35	?	?	?	?	?
7	$18 \cdot 10^{-5}$	2	7	1	7	7	7	60	60	45	?	?	?	?	?
8	$15 \cdot 10^{-5}$	3	8	2	4	4	4	30	30	40	?	?	?	?	?
9	$12 \cdot 10^{-5}$	4	5	3	5	5	5	45	45	50	?	?	?	?	?
10	$10 \cdot 10^{-5}$	2	4	4	6	6	6	60	60	30	?	?	?	?	?

### Пример решения задачи № 3

Дано:

$$\sigma_1 = 12 \cdot 10^{-5} \text{ Кл/м}^2$$

$$q_2 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$q_3 = 7 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$q_0 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$$

$$r_1 = 0,05 \text{ м}$$

$$r_2 = 0,05 \text{ м}$$

$$r_3 = 0,05 \text{ м}$$

$$R = 0,01 \text{ м}$$

$$d = 0,2 \text{ м}$$

$$\alpha = \beta = 30^\circ$$

$$U_1 = ?$$

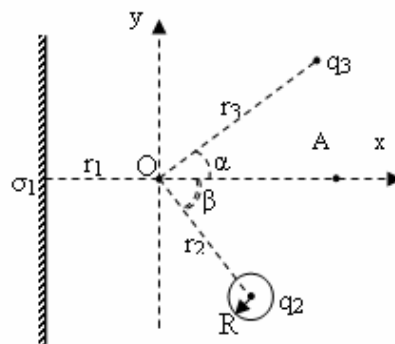
$$U_2 = ?$$

$$U_3 = ?$$

$$U_0 = ?$$

$$A = ?$$

Решение



1. Определим потенциалы в точке O:  
- заряженной плоскости:

$$\varphi_{10} = \frac{\sigma_1 r_1}{2\varepsilon_0},$$

где  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$ ;

$$\varphi_{10} = \frac{12 \cdot 10^{-5} \cdot 0,05}{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} = 338,98 \cdot 10^3 \text{ (В)};$$

- заряженной сферы:

$$\varphi_{20} = k \frac{q_2}{r_2},$$

где  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$  – коэффициент пропорциональности;

$$\varphi_{20} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6}}{0,05} = 360 \cdot 10^3 \text{ (В)};$$

- заряда  $q_3$ :

$$\varphi_{30} = k \frac{q_3}{r_3}; \quad \varphi_{30} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{7 \cdot 10^{-6}}{0,05} = 1260 \cdot 10^3 \text{ (В)};$$

в точке А:

- заряженной плоскости:

$$\varphi_{1A} = \frac{\sigma_1(r_1 + d)}{2\varepsilon_0}; \quad \varphi_{1A} = \frac{12 \cdot 10^{-5} \cdot 0,06}{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} = 406,78 \cdot 10^3 \text{ (В)};$$

- заряженной сферы:

$$\varphi_{2A} = k \frac{q_2}{r'_2},$$

где  $r'_2$  – расстояние от центра заряженной сферы до точки А, которое можно определить по теореме косинусов;

$$r'_2 = \sqrt{r_2^2 + d^2 - 2r_2d \cos \beta};$$

$$r'_2 = \sqrt{0,05^2 + 0,01^2 - 2 \cdot 0,05 \cdot 0,01 \cdot \cos 30^\circ} = 0,042 \text{ (м)};$$

$$\varphi_{2A} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{2 \cdot 10^{-6}}{0,042} = 428,57 \cdot 10^3 \text{ (В)};$$

- заряда  $q_3$ :

$$\varphi_{3A} = k \frac{q_3}{r'_3}; \quad r'_3 = r'_2 = 0,042 \text{ м};$$

$$\varphi_{3A} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{7 \cdot 10^{-6}}{0,042} = 1500 \cdot 10^3 \text{ (В)}.$$

2. Разность потенциалов между точками О и А:

- заряженной плоскости:

$$U_1 = \varphi_{1A} - \varphi_{10}; \quad U_1 = 406,78 \cdot 10^3 - 338,98 \cdot 10^3 = 67,72 \cdot 10^3 \text{ (В)};$$

- заряженной сферы:

$$U_2 = \varphi_{2A} - \varphi_{20}; \quad U_2 = 428,57 \cdot 10^3 - 360 \cdot 10^3 = 68,57 \cdot 10^3 \text{ (В)};$$

- заряда  $q_3$ :

$$U_3 = \varphi_{3A} - \varphi_{30}; \quad U_3 = 1500 \cdot 10^3 - 1260 \cdot 10^3 = 240 \cdot 10^3 \text{ (В)};$$

- общая:

$$U_0 = U_1 + U_2 + U_3;$$

$$U_0 = 67,72 \cdot 10^3 + 68,57 \cdot 10^3 + 240 \cdot 10^3 = 376,29 \cdot 10^3 \text{ (В)}.$$

3. Работа по перемещению заряда  $q_0$  в электрическом поле:

$$A = q_0 U_0; A = 1 \cdot 10^{-6} \cdot 376,98 \cdot 10^3 = 0,38 \text{ (Дж)}.$$

Ответ:  $U_1 = 67,72 \cdot 10^3 \text{ В}; U_2 = 68,57 \cdot 10^3 \text{ В}; U_3 = 240 \cdot 10^3 \text{ В}; U_0 = 376,29 \cdot 10^3 \text{ В};$   
 $A = 0,38 \text{ Дж}.$

#### 4.4. Задача № 4. Законы постоянного тока

Определить неизвестные параметры участка электрической цепи согласно табл. 4.5.

Условные обозначения некоторых физических величин:

$r_0$  – общее сопротивление участка;

$I_0$  – сила тока, подаваемая на участок;

$U_0$  – напряжение на участке;

$P_0$  – мощность тока на участке.

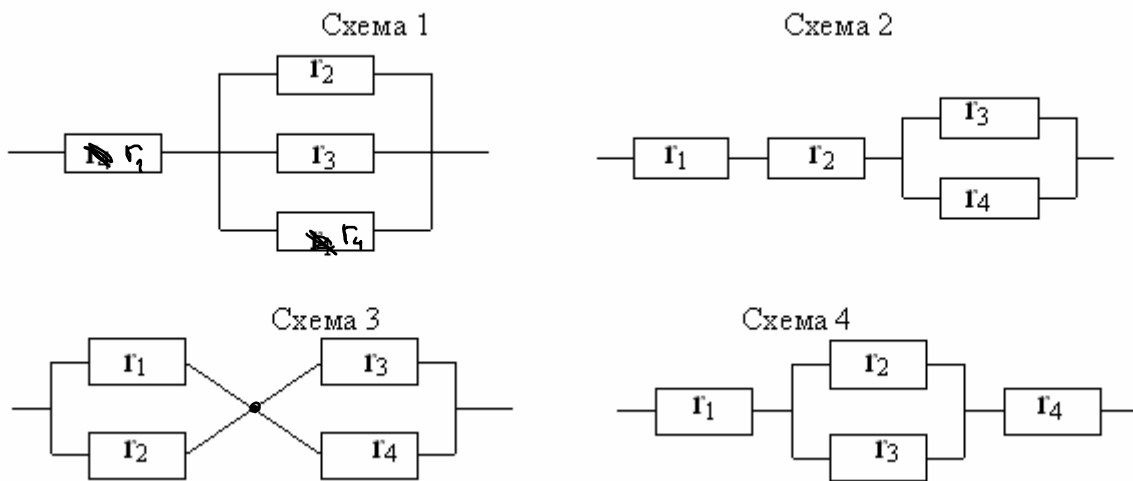


Рис. 4.4. Схематические изображения участков цепей

Таблица 4.4

Исходные данные к задаче № 4

№ вар	схема участков цепей	Сопротивление элемента участка (Ом)					Сила тока в элементе участка (А)					Напряжение на элементе участка (В)					Мощность тока на элементе участка (Вт)					
		$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	$r_0$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_0$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_0$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_0$	
1	1	8	4	12	6	?	2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?

2	2	?	3	6	3	10	?	0,15	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
3	3	30	60	90	?	50	?	?	0,3	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
4	4	?	?	?	?	?	0,5	0,2	?	?	?	10	?	?	?	?	?	?	?	?	?
5	1	6	4	8	?	8	?	?	?	?	1,2	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
6	2	?	?	?	?	?	?	0,8	0,5	?	?	12	16	?	?	43	?	?	?	?	?
7	3	?	?	?	?	?	1,0	0,6	0,5	?	?	?	?	?	55	?	?	12	?	?	?
8	4	10	?	?	?	?	2	?	?	?	?	?	?	?	10	70	?	?	?	?	?
9	1	20	40	80	?	?	?	?	?	?	?	?	?	16	?	36	?	?	?	?	?
10	2	?	2,4	9	6	?	0,5	?	?	?	?	3	?	?	1,8	?	?	?	?	?	?

### Пример решения задачи № 4

**Дано:**

$$r_1 = 4 \text{ Ом}$$

$$r_2 = 2 \text{ Ом}$$

$$r_3 = 3 \text{ Ом}$$

$$r_4 = 6 \text{ Ом}$$

$$I_2 = 2 \text{ А}$$

$$r_0 = ? \quad I_1 = ?$$

$$I_3 = ? \quad I_4 = ?$$

$$I_0 = ? \quad U_1 = ?$$

$$U_2 = ? \quad U_3 = ?$$

$$U_4 = ? \quad U_0 = ?$$

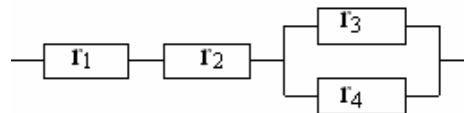
$$P_1 = ? \quad P_2 = ?$$

$$P_3 = ? \quad P_4 = ?$$

$$P_0 = ?$$

**Решение**

1. Построим схему участка электрической цепи:



Из схемы видно, что проводники  $r_3$  и  $r_4$  соединены параллельно, а затем  $r_1$ ,  $r_2$  и участок  $r_{3,4}$  – последовательно. Будем учитывать данные виды соединений и их законы при решении данной задачи.

2. Определим общее сопротивление данного участка цепи, последовательно «сворачивая» схему.

На участке 3–4 эквивалентное сопротивление  $r_{3,4}$  параллельного соединения проводников равно:

$$\frac{1}{r_{3,4}} = \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4}; \frac{1}{r_{3,4}} = \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = \frac{1}{2}; r_{3,4} = 2 \text{ (Ом)}.$$

На полном участке сопротивление  $r_1$ ,  $r_2$  и  $r_{3,4}$  соединены последовательно, поэтому общее сопротивление:  $r_0 = r_1 + r_2 + r_{3,4}$ ;  $r_0 = 4 + 2 + 2 = 8 \text{ (Ом)}$ .

3. Определим значения токов и напряжений на каждом элементе цепи и их общие значения.

Так как на участке – последовательное соединение проводников, то  $I = const$ , значит  $I_0 = I_1 = I_2 = I_{3,4} = 2 \text{ (А)}$ .

Согласно закону Ома для участка цепи, не содержащего источник тока,  $I = \frac{U}{r}$ :

$$U_1 = I_1 r_1; U_1 = 2 \cdot 4 = 8 \text{ (В)};$$

$$U_2 = I_2 r_2; U_2 = 2 \cdot 2 = 4 \text{ (В)};$$

$$U_{34} = I_{34}r_{34}; U_{34} = 2 \cdot 2 = 4 \text{ (В)};$$

$$U_0 = I_0r_0; U_0 = 2 \cdot 8 = 16 \text{ (В)}.$$

Так как на участке 3–4 – параллельное соединение проводников, то  $U = const$ , значит  $U_3 = U_4 = U_{34} = 4 \text{ (В)}$ .

По закону Ома:

$$I_3 = \frac{U_3}{r_3}; I_3 = \frac{4}{3} = 1,33 \text{ (А)};$$

$$I_4 = \frac{U_4}{r_4}; I_4 = \frac{4}{6} = 0,67 \text{ (А)}.$$

4. Определим мощности на каждом элементе цепи и общую мощность всего участка цепи. Для определения мощности можно воспользоваться одной из формул:

$$P = I^2r = \frac{U^2}{r} = IU.$$

$$P_1 = I_1^2r_1; P_1 = 2^2 \cdot 2 = 8 \text{ (Вт)};$$

$$P_2 = I_2^2r_2; P_2 = 2^2 \cdot 4 = 16 \text{ (Вт)};$$

$$P_3 = \frac{U_3^2}{r_3}; P_3 = \frac{4^2}{3} = 5,33 \text{ (Вт)};$$

$$P_4 = \frac{U_4^2}{r_4}; P_4 = \frac{4^2}{6} = 2,67 \text{ (Вт)};$$

$$P_0 = I_0U_0; P_0 = 2 \cdot 16 = 32 \text{ (Вт)}.$$

Осуществим проверку правильности решения задачи с помощью баланса мощностей:

$$P_0 = P_1 + P_2 + P_3 + P_4; P_0 = 8 + 16 + 5,33 + 2,67 = 32 \text{ (Вт)}.$$

Ответ:  $r_0 = 8 \text{ Ом}$ ;  $I_1 = 2 \text{ А}$ ;  $I_3 = 1,33 \text{ А}$ ;  $I_4 = 0,67 \text{ А}$ ;  $I_0 = 2 \text{ А}$ ;  $U_1 = 8 \text{ В}$ ;  $U_2 = 4 \text{ В}$ ;  $U_3 = U_4 = 4 \text{ В}$ ;  $U_0 = 16 \text{ В}$ ;  $P_1 = 8 \text{ Вт}$ ;  $P_2 = 16 \text{ Вт}$ ;  $P_3 = 5,33 \text{ Вт}$ ;  $P_4 = 2,67 \text{ Вт}$ ;  $P_0 = 32 \text{ Вт}$ .

#### 4.5. Задача № 5. Магнитное поле

На рис. 4.5 (А, Б, В и Г) изображены сечения двух параллельных



прямолинейных длинных проводников с токами  $I_1$  и  $I_2$ . Определить модуль вектора индукции  $B$  общего поля токов и неизвестные величины в табл. 4.5. Величины, используемые в данной задаче:

$r_1$  – расстояние от первого проводника до точки А;

$r_2$  – расстояние от второго проводника до точки А;

$r$  – расстояние между проводниками;

$B_1$  – индукция магнитного поля первого тока в точке А;

$B_2$  – индукция магнитного поля второго тока в точке А;

$B$  – общая индукция магнитного поля в точке А;

$F/L$  – сила взаимодействия токов на единицу длины проводника.

Решение задачи основано на применении принципа суперпозиции магнитных полей.

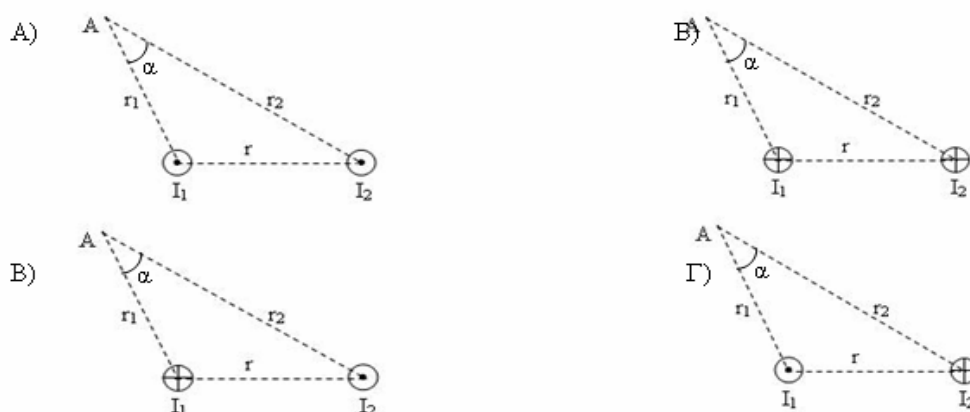


Рис. 4.5. Рисунок к задаче № 5

Таблица 4.5

Исходные данные к задаче № 5

№ вар.	Рисунок	$I_1$ , А	$I_2$ , А	$r_1$ , см	$r_2$ , см	$r$ , см	$\alpha$ , °	$B_1$ , Тл	$B_2$ , Тл	$B$ , Тл	$F/L$ , Н/м
1	А	10	20	20	30	20	?	?	?	?	?
2	Б	20	10	15	25	15	?	?	?	?	?
3	В	15	30	10	15	10	?	?	?	?	?
4	Г	30	15	20	35	20	?	?	?	?	?
5	А	15	25	12	18	12	?	?	?	?	?
6	Б	25	15	25	40	25	?	?	?	?	?
7	В	20	30	30	50	30	?	?	?	?	?
8	Г	30	20	30	45	30	?	?	?	?	?
9	А	20	40	35	60	35	?	?	?	?	?
10	Б	40	20	35	50	35	?	?	?	?	?

Пример решения задачи № 5

Дано:  
 $I_1 = 10 \text{ А}$

Решение

1. Построим чертеж с указанием направлений

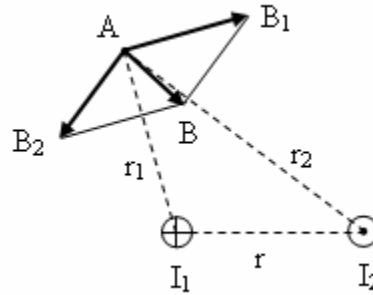
$$I_2 = 20 \text{ A}$$

$$r_1 = 0,25 \text{ м}$$

$$r_2 = 0,4 \text{ м}$$

$$r = 0,25 \text{ м}$$

векторов магнитной индукции, создаваемой каждым током:



---


$$\alpha = ?$$

$$B_1 = ?$$

$$B_2 = ?$$

$$B = ?$$

$$\frac{F}{L} = ?$$

Направление векторов магнитной индукции определим по правилу правого винта (правилу буравчика): если направление острия буравчика совпадает с направлением силы тока в проводнике, то направление вращения его рукоятки показывает направление магнитных силовых линий.

2. Определим угол  $\alpha$  по теореме косинусов:

$$r^2 = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos\alpha;$$

$$\cos\alpha = \frac{r_1^2 + r_2^2 - r^2}{2r_1r_2}; \quad \cos\alpha = \frac{0,25^2 + 0,4^2 - 0,25^2}{2 \cdot 0,25 \cdot 0,4} = 0,8;$$

$$\alpha = 36,9^\circ.$$

3. Определим магнитную индукцию в точке А:

- создаваемую первым проводником с током:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_1},$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная постоянная;

$$B_1 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10}{2\pi \cdot 0,25} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ (Тл)};$$

- создаваемую вторым проводником с током:

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_2}; \quad B_2 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 20}{2\pi \cdot 0,4} = 10 \cdot 10^{-6} \text{ (Тл)};$$

- создаваемую двумя проводниками с током (общую магнитную

индукцию можно определить по принципу суперпозиций магнитных полей, а также согласно чертежу по теореме косинусов для суммы двух векторов):

$$B^2 = B_1^2 + B_2^2 + 2B_1B_2\cos(\pi - \alpha);$$

$$B = \sqrt{(8 \cdot 10^{-6})^2 + (10 \cdot 10^{-6})^2 + 2 \cdot 8 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot \cos(180 - 36,9)} = 6 \cdot 10^{-6} \text{ (Тл)}.$$

4. Сила взаимодействия двух проводников с током:

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi r}.$$

Определим силу взаимодействия данных проводников на единицу длины проводника:

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r}; \quad \frac{F}{L} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10 \cdot 20}{2\pi \cdot 0,25} = 16 \cdot 10^{-5} \text{ (Н/м)}.$$

Ответ:  $\alpha = 36,9^\circ$ ;  $B_1 = 8 \cdot 10^{-6}$  Тл;  $B_2 = 10 \cdot 10^{-6}$  Тл;  $B = 6 \cdot 10^{-6}$  Тл;  $\frac{F}{L} = 16 \cdot 10^{-5}$  Н/м.

#### 4.6. Задача № 6. Действие магнитного поля на контур с током

В магнитном поле с индукцией  $B$  находится контур с током. Площадь, ограниченная контуром,  $S$ . Сила тока в контуре  $I$ . Ток в контуре создает магнитный момент  $p_m$ . В начальный момент времени  $t_0=0$ : 1) угол между нормалью к плоскости, в которой находится контур, и вектором индукции магнитного поля  $B$  равен  $\alpha_0$ ; 2) магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром  $\Phi_0$ ; 3) момент силы, действующий на рамку в магнитном поле, равен  $M_0$ . Контур равномерно вращается с частотой  $n$  в направлении роста угла  $\alpha$ . В момент времени  $t$  эти три величины становятся равными  $\alpha$ ,  $\Phi$  и  $M$ . Работа перемещения контура  $A$ . При движении контура в нем возникает ЭДС электромагнитной индукции,  $E_{max}$  – ее максимальное значение, а  $E$  – мгновенное значение в момент времени  $t$ . Найти неизвестные величины, обозначенные в табл. 4.6. знаком «?».

Таблица 4.6

Исходные данные к задаче № 6

№ вар.	$I$ , А	$S$ , см <sup>2</sup>	$p_m$ , А·м <sup>2</sup>	$B$ , мТл	$\alpha_0$ , рад	$\Phi_0$ , Вб	$M_0$ , Н·м	$n$ , Гц	$t$ , с	$\alpha$ , рад	$\Phi$ , Вб	$M$ , Н·м	$A$ , Дж	$\varepsilon_{max}$ , В	$\varepsilon$ , В
1	0,5	600	?	0,5	0	?	?	10	0,0125	?	?	?	?	?	?

2	1	?	0,055	?	$\pi/6$	?	0,011	20	0,025	?	?	?	?	?	?
3	?	400	0,06	0,3	?	?	0,0127	30	0,0375	?	?	?	?	?	?
4	2	450	?	?	$\pi/3$	0,0045	?	40	0,05	?	?	?	?	?	?
5	2,5	?	?	0,1	$\pi/2$	?	0,0075	50	0,0625	?	?	?	?	?	?
6	?	250	0,075	0,1	?	0,0025	?	10	0,075	?	?	?	?	?	?
7	3,5	?	0,07	?	?	0,0035	0,007	20	0,075	?	?	?	?	?	?
8	4	150	?	0,3	?	0,0032	?	30	0,0625	?	?	?	?	?	?
9	4,5	?	?	?	$\pi/3$	0,002	0,0156	40	0,05	?	?	?	?	?	?
10	5	?	?	0,5	$\pi/2$	?	0,0125	50	0,0375	?	?	?	?	?	?

### Пример решения задачи № 6

Дано:

$$I = 1 \text{ А}$$

$$p_m = 0,07 \text{ А} \cdot \text{м}^2$$

$$B = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ Тл}$$

$$M_0 = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м}$$

$$n = 20 \text{ Гц}$$

$$t = 0,05 \text{ с}$$

$$S = ? \quad \alpha_0 = ?$$

$$\Phi_0 = ? \quad \alpha = ?$$

$$\Phi = ? \quad M = ?$$

$$A = ? \quad \varepsilon_{\max} = ?$$

$$\varepsilon = ?$$

Решение

1. Магнитный момент в контуре:

$$p_m = IS;$$

$$S = \frac{p_m}{I}; \quad S = \frac{0,07}{1} = 0,07 \text{ (м}^2\text{)}.$$

2. Момент силы, действующий на рамку в магнитном поле:

$$M_0 = p_m B \sin \alpha_0;$$

$$\sin \alpha_0 = \frac{M_0}{p_m B}; \quad \sin \alpha_0 = \frac{3,5 \cdot 10^{-6}}{0,07 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}} = 0,5; \quad \alpha_0 = \frac{\pi}{6}.$$

3. Магнитный поток в начальный момент времени можно определить по формуле

$$\Phi_0 = B S \cos \alpha_0;$$

$$\Phi_0 = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,07 \cdot \cos \frac{\pi}{6} = 6,1 \cdot 10^{-6} \text{ (Вб)}.$$

4. Определим угол поворота контура с течением времени:

$$\alpha = \alpha_0 + \omega t = \alpha_0 + 2\pi n t; \quad \alpha = \frac{\pi}{6} + 2\pi \cdot 20 \cdot 0,05 = \frac{13}{6} \pi.$$

5. Момент силы, действующий на рамку в конечный момент времени:

$$M = p_m B \sin \alpha ; M = 0,07 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot \sin \frac{13\pi}{6} = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ (Н}\cdot\text{м)};$$

6. Магнитный поток в конечный момент времени:

$$\Phi = BS \cos \alpha ; \Phi = 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,07 \cdot \cos \frac{13\pi}{6} = 6,1 \cdot 10^{-6} \text{ (Вб)}.$$

7. Работа, совершаемая при вращении рамки:

$$A = I \Delta \Phi = I \cdot (\Phi - \Phi_0); A = 1 \cdot (6,1 \cdot 10^{-6} - 6,1 \cdot 10^{-6}) = 0.$$

8. Максимальное значение ЭДС индукции, возникающей в рамке:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\max} &= \omega BS = 2\pi n BS ; \\ \varepsilon_{\max} &= 2 \cdot 3,14 \cdot 20 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,07 = 0,88 \cdot 10^{-3} \text{ (В)}. \end{aligned}$$

9. ЭДС индукции в конечный момент времени:

$$\varepsilon = -\Phi' = -(BS \cos(\omega t + \varphi_0))' = Bs \omega \sin(\omega t + \varphi_0) = \varepsilon_{\max} \sin(\omega t + \varphi_0);$$

$$\varepsilon = 0,88 \cdot 10^{-3} \cdot \sin \frac{13\pi}{6} = 0,44 \cdot 10^{-3} \text{ (В)}.$$

Ответ:  $S = \frac{0,07}{1} = 0,07 \text{ м}^2;$   $\alpha_0 = \frac{\pi}{6};$   $\Phi_0 = 6,1 \cdot 10^{-6} \text{ Вб} = 6,1 \text{ мкВб};$   $\alpha = \frac{13}{6} \pi;$

$M = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ Н}\cdot\text{м} = 3,3 \text{ мН}\cdot\text{м};$   $\Phi = 6,1 \cdot 10^{-6} \text{ Вб} = 6,1 \text{ мВб};$   $\varepsilon_{\max} = 0,88 \cdot 10^{-3} \text{ В} = 0,88 \text{ мВ};$   
 $\varepsilon = 0,44 \cdot 10^{-3} \text{ В} = 0,44 \text{ мВ}.$

#### 4.7. Задача № 7. Движение заряженной частицы в магнитном поле

Частица массой  $m$  и зарядом  $q$  влетает с начальной скоростью  $v_0$  в электрическое поле вдоль силовых линий. Частица проходит в поле разность потенциалов  $U$ , которое совершает работу  $A$ , и вылетает из поля со скоростью  $v$ . Затем частица влетает в магнитное поле индукцией  $B$  перпендикулярно магнитным силовым линиям. В результате действия поля частица движется по окружности радиусом  $R$  с периодом  $T$  и частотой  $n$ . В этом случае ее движение характеризуется магнитным моментом  $p_m$ , силой эквивалентного тока  $I_{\text{экв}}$ , механическим моментом импульса  $L$  и гиромангнитным отношением  $p_m/L$ . Найти неизвестные величины, обозначенные в табл. 4.7 знаком «?».

Таблица 4.7

Исходные данные к задаче № 7

№ вар.	$v_0$ , ММ/С	$A$ , $10^{-19}$ Дж	$U$ , В	$v$ , ММ/С	$q$ , $10^{-19}$ Кл	$m$ , кг	$B$ , МТл	$R$ , ММ	$T$ , МКС	$n$ , $10^6$ 1/С	$\rho_m$ , А·М <sup>2</sup>	$I_{эке}$ , А	$L$ , КГ·М <sup>2</sup> ·С <sup>-1</sup>	$\rho_m / L$ , Кл/КГ
1	?	1,77	?	0,8	1,6	$9,31 \cdot 10^{-31}$	?	41,4	?	?	?	?	?	?
2	0,04	?	33,72	?	1,6	$1,66 \cdot 10^{-27}$	?	?	5,43	?	?	?	?	?
3	0,04	139,44	?	?	1,6	$3,32 \cdot 10^{-27}$	?	?	?	0,123	?	?	?	?
4	?	?	49,8	0,06	1,6	$4,98 \cdot 10^{-27}$	?	?	?	0,074	?	?	?	?
5	?	99,6	?	0,07	3,2	$4,98 \cdot 10^{-27}$	?	?	6,46	?	?	?	?	?
6	0,04	?	49,8	?	3,2	$6,64 \cdot 10^{-27}$	?	104	?	?	?	?	?	?
7	0,1	1,117	?	?	1,6	$9,31 \cdot 10^{-31}$	?	17,1	?	?	?	?	?	?
8	?	?	16,6	0,06	1,6	$1,66 \cdot 10^{-27}$	?	?	3,62	?	?	?	?	?
9	?	24,9	?	0,04	1,6	$3,32 \cdot 10^{-27}$	?	?	?	0,146	?	?	?	?
10	0,04	?	101,6	?	1,6	$4,98 \cdot 10^{-27}$	?	?	?	0,102	?	?	?	?

### Пример решения задачи № 7

**Дано:**

$$v_0 = 0,04 \cdot 10^6 \text{ м/с}$$

$$A = 160 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$m = 1,6 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$$

$$R = 0,1 \text{ м}$$

$$U = ?$$

$$v = ?$$

$$B = ?$$

$$T = ?$$

$$n = ?$$

$$\rho_m = ?$$

$$I_{эке} = ?$$

$$L = ?$$

$$\rho_m / L = ?$$

**Решение**

1. Определим ускоряющую разность потенциалов, воспользовавшись формулой работы, совершаемой электрическим полем при перемещении электрического заряда:

$$A = qU; U = \frac{A}{q}; U = \frac{160 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 100 \text{ (В)}.$$

2. Определим скорость частицы, с которой она вылетает из электрического поля, воспользовавшись формулой работы, совершаемой при движении заряда:

$$A = \Delta E = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2}; v = \sqrt{v_0^2 + \frac{2A}{m}};$$

$$v = \sqrt{(0,04 \cdot 10^6)^2 + \frac{2 \cdot 160 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-27}}} = 14,7 \cdot 10^4 \text{ (м/с)}.$$

3. В магнитном поле на заряженную частицу действует сила Лоренца, которая является центростремительной:

$$F = qvB; F = ma = \frac{mv^2}{R}; qvB = \frac{mv^2}{R};$$

$$B = \frac{mv}{Rq}; B = \frac{1,6 \cdot 10^{-27} \cdot 14,7 \cdot 10^4}{0,1 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 14,7 \cdot 10^{-3} \text{ (Тл)} = 14,7 \text{ (мТл)}.$$

4. Определим период вращения заряженной частицы:

$$T = \frac{2\pi R}{v}; T = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,1}{14,7 \cdot 10^4} = 4,27 \cdot 10^{-6} \text{ (с)} = 4,27 \text{ (мкс)}.$$

5. Частота вращения частицы обратно пропорциональна периоду вращения:

$$n = \frac{1}{T}; n = \frac{1}{4,27 \cdot 10^{-6}} = 0,23 \cdot 10^6 \text{ (Гц)} = 0,23 \text{ (МГц)}.$$

6. Определим силу эквивалентного тока, создаваемого частицей:

$$I_{\text{эке}} = \frac{q}{T}; I_{\text{эке}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19}}{4,27 \cdot 10^{-6}} = 0,37 \cdot 10^{-13} \text{ (А)}.$$

7. Магнитный момент частицы прямо пропорционален произведению эквивалентного тока и площади, описываемой частицей при вращении:

$$\rho_m = I_{\text{эке}} S; S = \pi R^2;$$

$$\rho_m = 0,37 \cdot 10^{-13} \cdot 3,14 \cdot 0,1^2 = 11,62 \cdot 10^{-16} \text{ (А} \cdot \text{м}^2\text{)}.$$

8. Вычислим механический момент импульса частицы:

$$L = mvR; L = 1,6 \cdot 10^{-27} \cdot 14,7 \cdot 10^4 \cdot 0,1 = 23,52 \cdot 10^{-22} \text{ (кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}\text{)}.$$

9. Гиромагнитное отношение:

$$\frac{\rho_m}{L} = \frac{11,62 \cdot 10^{-16}}{23,52 \cdot 10^{-22}} = 0,49 \cdot 10^6 \text{ (Кл/кг)}.$$

Ответ:  $U = 100 \text{ В}$ ;  $v = 0,147 \text{ Мм/с}$ ;  $B = 14,7 \text{ мТл}$ ;  $T = 4,27 \text{ мкс}$ ;  $n = 0,23 \text{ МГц}$ ;  
 $I_{\text{эке}} = 0,37 \cdot 10^{-13} \text{ А}$ ;  $\rho_m = 11,62 \cdot 10^{-16} \text{ А} \cdot \text{м}^2$ ;  $L = 23,52 \cdot 10^{-22} \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ ;  $\frac{\rho_m}{L} = 0,49 \cdot 10^6 \text{ Кл/кг}$ .

#### 4.8. Задача № 8. Явление электромагнитной индукции

Замкнутая рамка, состоящая из  $N$  витков, равномерно вращается с частотой  $\nu$  в однородном магнитном поле индукцией  $B$ . Площадь рамки

равна  $S$ . Ось вращения перпендикулярна магнитным силовым линиям. Циклическая частота колебаний ЭДС индукции равна  $\omega$ . Активное сопротивление рамки равно  $R$ . Максимальная ЭДС индукции равна  $\varepsilon_{max}$ , а максимальная сила тока в рамке равна  $I_{max}$ . Максимальный магнитный поток, пересекающий витки рамки равен  $\Phi_{max}$ . Заряд, протекший по рамке за одну четверть периода вращения, равен  $q$ . Уравнение колебаний силы тока  $i=f(t)$  в рамке. Найти неизвестные величины, обозначенные в табл. 4.8. знаком «?».

Таблица 4.8

Исходные данные к задаче № 8

№ вар.	$B$ , Тл	$S$ , м <sup>2</sup>	$N$	$\Phi_{max}$ , Вб	$\nu$ , Гц	$\omega$ , с <sup>-1</sup>	$R$ , Ом	$\varepsilon_{max}$ , В	$I_{max}$ , А	$q$ , Кл	$i=f(t)$ , А
1	0,1	0,02	800	?	50	?	10	?	?	?	?
2	0,2	0,01	600	?	100	?	30	?	?	?	?
3	0,3	0,03	450	?	200	?	40	?	?	?	?
4	0,4	0,02	500	?	50	?	50	?	?	?	?
5	0,5	0,04	400	?	100	?	60	?	?	?	?
6	0,6	0,03	150	?	200	?	50	?	?	?	?
7	0,7	0,05	250	?	50	?	40	?	?	?	?
8	0,8	0,04	300	?	100	?	30	?	?	?	?
9	0,9	0,06	200	?	200	?	20	?	?	?	?
10	1,0	0,05	100	?	150	?	10	?	?	?	?

Пример решения задачи № 8

**Дано:**

$$B = 0,3 \text{ Тл}$$

$$S = 0,01 \text{ м}^2$$

$$N = 100$$

$$\nu = 50 \text{ Гц}$$

$$R = 60 \text{ Ом}$$

$$\Phi_{max} = ?$$

$$\omega = ?$$

$$\varepsilon_{max} = ?$$

$$I_{max} = ?$$

$$q = ?$$

$$i = f(t)$$

**Решение**

1. Максимальный магнитный поток:

$$\Phi_{max} = BS; \Phi_{max} = 0,3 \cdot 0,01 = 0,003 \text{ (Вб)}.$$

2. Циклическая частота колебаний ЭДС индукции:

$$\omega = 2\pi\nu; \omega = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314 \text{ (1/с)}.$$

3. Максимальная ЭДС индукции согласно закону Фарадея – Ленца для явления электромагнитной индукции  $\varepsilon_{max} = \omega N \Phi_{max}$ ;  $\varepsilon_{max} = 314 \cdot 100 \cdot 0,003 = 94,2 \text{ (В)}$ .



4. Максимальное значение силы тока определим так же по закону Ома для соленоида:

$$I_{max} = \frac{\varepsilon_{max}}{R}; I_{max} = \frac{94,2}{60} = 1,57 \text{ (A)}.$$

5. Закон изменения силы тока с течением времени:

$$i = I_{max} \cdot \sin \omega t; i = 1,57 \cdot \sin 314 t.$$

6. Заряд, протекающий по рамке за определенное время:

$$q = \frac{N \Delta \Phi}{R},$$

где  $\Delta \Phi$  – изменение магнитного потока за определенное время.

Так как по условию задачи необходимо определить заряд, протекающий через контур за время равное четверти периода, то  $\Delta \Phi = \Phi$ , тогда

$$q = \frac{100 \cdot 0,003}{60} = 0,005 \text{ (Кл)}.$$

Ответ:  $\Phi_{max} = 0,003 \text{ Вб}; \omega = 314 \text{ 1/с}; \varepsilon_{max} = 94,2 \text{ В}; I_{max} = 1,57 \text{ А};$   
 $i = 1,57 \cdot \sin 314 t; q = 0,005 \text{ Кл} = 5 \text{ мКл}.$

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новиков С. М. Сборник заданий по общей физике: учеб. пособие для студ. вузов. М.:ООО «Изд-во Оникс», 2007. 512 с.
2. Трофимова Т. И. Краткий курс физики с примерами решения задач: учеб. пособ. М.:КНОРУС, 2007. 280 с.
3. Трофимова Т. И. Краткий курс физики с примерами решения задач: учеб. пособ. М.:КНОРУС, 2010. 280 с.
4. Трофимова Т. И., Фирсов А. В. Курс физики с примерами решения задач: учеб. в 2 томах. М.: КНОРУС, 2010. 384 с.
5. Трофимова Т. И. Краткий курс физики. 6-е изд., стереотип. М.: Высшая школа, 2007. 352 с.
6. Трофимова Т. И. Курс физики. Оптика и атомная физика: Теория. Задачи и решения: учеб. пособ. 3-е изд., стер. М.: Высшая школа, 2008. 288 с.
7. Трофимова Т. И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. 15-е изд., стереотип. М.: Издательский центр «Академия», 2007. 560 с.
8. Трофимова Т. И. Курс физики: учеб. пособие для вузов. 16-е изд., стереотип. М.: ИЦ «Академия», 2008. 560 с.
9. Трофимова Т. И. Сборник задач по курсу физики с решениями: учеб. пособие для студ. вузов. 8-е изд., перераб. М.: Высшая школа, 2007. 591 с.
10. Трофимова Т. И. Сборник задач по курсу физики: учеб. пособ. для вузов. М.: Высшая школа, 2008. 405 с.
11. Хавруняк В. Г. Курс физики: учеб. пособие для вузов. М.: Высшая школа, 2007. 400 с.
12. Чертов А. Г., Воробьёв А. А. Задачник по физике: учеб. пособие для вузов. 8-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во Физико-математической литературы, 2006. 640 с.

